



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN | INSTITUT FÜR MASSIVBAU

Abschlussbericht | Final report

SPP 1542

Leicht Bauen mit Beton

*Grundlagen für das Bauen der
Zukunft mit bionischen und
mathematischen Entwurfsprinzipien*

Concrete Light

*Future Concrete Structures using
Bionic, Mathematical and Engineering
Formfinding Principles*

DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) |
Funded by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Herausgeber | Edited by
Silke Scheerer, Manfred Curbach
Dresden, März 2022

Abschlussbericht | Final report

SPP 1542

Leicht Bauen mit Beton | Concrete Light

Abschlussbericht | Final report

SPP 1542

**Leicht Bauen mit Beton
– Grundlagen für das Bauen der
Zukunft mit bionischen und
mathematischen Entwurfsprinzipien**

**Concrete Light
– Future Concrete Structures using
Bionic, Mathematical and Engineering
Formfinding Principles**

Ergebnisse des Schwerpunktprogrammes 1542
Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
Projektnummer 172438440

Results of the Priority Programme 1542
Funded by Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
Project number 172438440

Herausgeber | Edited by
Silke Scheerer und Manfred Curbach

Dresden, März 2022

Impressum | Imprint

Herausgeber

Dr.-Ing. Silke Scheerer
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Postadresse:

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden
01062 Dresden

Besucheradresse:

August-Bebel-Straße 30/30A
01219 Dresden

Paketadresse:

Technische Universität Dresden
Institut für Massivbau
Helmholtzstr. 10
01069 Dresden

Tel. +49 351 463-36568

Fax +49 351 463-37289

www.massivbau.tu-dresden.de

Redaktion

Silke Scheerer

Gestaltung/Satz

Stefan Gröschel

Texte

Die Texte wurden von den jeweiligen
Autor:innen verfasst.

Druck

Addprint AG, Bannewitz

Online

Der Bericht ist Open Access auf Qucosa®,
dem sächsischen Dokumenten- und
Publikationsserver, verfügbar.

ISBN

978-3-86780-701-2

Dresden, März 2022

Inhaltsverzeichnis | Content

Vorwort Preface	13
Silke Scheerer, Manfred Curbach	
Teil 1: SPP-Projekte Part 1: SPP projects	
<i>Bletzinger</i>	
Nichtlineare Optimierung geometrisch definierter Fugen von räumlich gekrümmten Betonfertigteilen mit isogeometrischen Verfahren Non-linear optimization of geometrically defined joints of spatially curved prefabricated concrete elements with isogeometric analysis	18
Anna M. Bauer, Michael Breitenberger, Kai-Uwe Bletzinger	
<i>Budelmann/Kloft</i>	
Entwicklung neuartiger Verbindungen für komplexe Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC Development of novel jointing systems for complex beam surface and spatial elements made of UHPFRC	50
Lukas Ledderose, Sven Lehmborg, Franz Wirth, Harald Kloft, Harald Budelmann	
<i>Chudoba/Hegger</i>	
Entwurf und Herstellung von dünnwandigen Faltenwerken aus zementbasierten Verbundwerkstoffen Design and construction of folded plate structures made of novel cementitious composites	90
Jan Dirk van der Woerd, Josef Hegger, Rostislav Chudoba	
<i>Curbach (1D)</i>	
Querschnittsadaption für stabförmige Druckbauteile Cross sectional adaption for rod-shaped elements in compression	118
Angela Schmidt, Manfred Curbach	
<i>TP Curbach (2D)</i>	
Leichte Deckentragwerke aus geschichteten Hochleistungsbetonen Light-weight ceiling structures made of layered high-performance concrete	144
Michael Frenzel, Kristina Farwig, Manfred Curbach	
<i>Dröder/Kloft</i>	
Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisions-Schalungen aus 100 % recycelbaren Industrie-Wachsen zur Herstellung von geometrisch komplexen Betonbauteilen Non-Waste-Wax-Formwork: Novel precise formwork-technology on basis of 100% recyclable industrial wax for the fabrication of geometrically complex concrete elements	170
Sarah Baron, Jeldrik Mainka, Hans Werner Hoffmeister, Klaus Dröder, Harald Kloft	

Empelmann

- Ultraleichte, dünnwandige stabförmige Betonhohlbauteile | Ultra-light, thin-walled hollow concrete members** 196
Daniel Busse, Martin Empelmann

Fischer

- Formoptimierte filigrane Stäbe aus UHPC und korrosionsfreier CFK-Bewehrung für variable räumliche Stabtragwerke | Shape optimized filigree rods made of UHPC and non-corrosive CFRP reinforcement for variable three-dimensional trusses** 226
Michael Henke, Oliver Fischer

Garrecht/Sawodny/Sobek

- Effiziente automatisierte Herstellung multi-funktional gradierter Bauteile mit mineralischen Hohlkörpern | Efficient automated production of multifunctional graded components with mineral hollow bodies** 250
Daniel Schmeer, Mark Wörner, Harald Garrecht, Oliver Sawodny, Werner Sobek

Gehlen

- Schalentragwerke mit funktionaler Gradierung | Shell structures with functional grading** 284
Sandy Illguth, Dirk Lowke, Thomas Kränkel, Christoph Gehlen

Gehlen/Winter

- Additive Fertigung frei geformter Betonbauteile durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen | Additive manufacturing of free formed concrete elements by selective binding with calcium silicate based cements** 300
Daniel Weger, Daniel Talke, Dirk Lowke, Klaudius Henke, Christoph Gehlen, Stefan Winter

Graubner/Knaack

- Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile | Fundamental research towards an adaptive formwork system development for freeform concrete building components** 328
Carl-Alexander Graubner, Ulrich Knaack, Tilo Proske, Björn Freund, Matthias Michel, Sascha Hickert

Hegger

- Sandwichbauteile mit gefalteten und gekrümmten Betondeckschichten | Sandwich panels with folded plate and curved concrete facings** 356
Alexander Stark, Josef Hegger

Jäger

- Untersuchungen zu Trageigenschaften von plattenförmigen Betonleichtbauelementen in Kreuz-Kanal-Technologie | Investigations into the load-bearing properties of slab-shaped lightweight concrete elements in CC technology** 390
Wolfram Jäger

Kohlmeyer/Andrä

- Konstruktion und Optimierung von Klebever-bindungen für Platten- und Scheibenbauteile aus hochfestem Beton | Construction and optimization of adhesive joints for plate and shell construction elements composed of high performance concrete** 412

Matti Schneider, Heiko Andrä, Christian Kohlmeyer, Sebastian Oster

Kroll/Gelbrich

- Flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit stabilisierten Abstandsgewirken | Flexible GFRP-formwork for the production of double curved concrete lightweight elements with stabilized spacer fabrics** 436

Henrik Funke, Andreas Ehrlich, Lars Ulke-Winter, Carolin Petzoldt, Sandra Gelbrich, Lothar Kroll

Kroll/Gelbrich

- Gekrümmte Beton-Leichtbauelemente mit bionisch inspirierten Krafteinleitungssystemen durch Einsatz flexibler GFK-Schalungen | Curved lightweight concrete structures with bionic inspired force transmission elements by the use of flexible GFRP-formworks** 452

Henrik Funke, Lars Ulke-Winter, Carolin Petzoldt, Christian Müller, Sandra Gelbrich, Lothar Kroll

Lohaus

- Wickelverstärkte Hybridrohre | Wrapping-reinforced hybrid tubes** 472

Ludger Lohaus, Jan Markowski

Lordick/Schlaich

- Methoden und Werkzeuge für Entwurf und Herstellung schalenartiger und dünnwandiger Betonbauteile mit Regelflächengeometrie | Methods and tools for the design and construction of thin-walled concrete structures with ruled surface geometry** 488

Mike Schlaich, Arndt Goldack, Juan Pablo Osman-Letelier, Daniel Lordick, Kevin Noack, Martin Friedrich Eichenauer, Robert Päßler Michael Pott

Lordick/Weiß

- Liniengeometrie für den Leichtbau | Line geometry for lightweight structures** 514

Daniel Lordick, Daniel Klawitter, Markus Hagemann

Mark/Schnell

- Leichte verformungsoptimierte Schalentragerwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke | Light-weight shape-optimised shell structures made from high-performance concrete for collector modules of parabolic trough power plants** 536

Christoph Kämper, Tobias Stallmann, Patrick Forman, Jürgen Schnell, Peter Mark

Reese

Modellreduktion und Substrukturtechnik am Beispiel von modularen Schalentragerwerken aus ultrahochfestem Beton | Model order reduction and substructures – application to modular shell structures made of ultra-high performance concrete 590

Lei Zhou, Jaan Simon, Stefanie Reese

Schnellenbach-Held

Leichte Platten aus Beton mit biaxialem Lastabtrag als bionische Strukturen 610

Martina Schnellenbach-Held, Jan-Eric Habersaat

Sobek

Abfallfreie Herstellung von Betonbauteilen durch die Verwendung einer gefrorenen Sandschalung | Waste-free production of concrete components by means of a frozen sand formwork 626

Oliver Gericke, Daria Kovaleva, Walter Haase, Werner Sobek

Sobek/Sawodny/Reinhardt

Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen – Entwurf, Berechnung und automatisierte Herstellung | Optimal structures made of functional graded concrete – design, dimensioning and automated production 642

Mark Wörner, Daniel Schmeer, Harald Garrecht, Oliver Sawodny, Werner Sobek

Teil 2: Demonstratoren und Anschlussprojekte | Part 2: Demonstrators and follow-up projects

TU Braunschweig

uni-con² – universal concrete construction 676

Daniel Busse, Lukas Ledderose

TU Chemnitz

Carbonbeton-Schalendemonstrator | Shell demonstrator out of carbon reinforced concrete 682

Christian Müller, Henrik Funke, Sandra Gelbrich, Lothar Kroll

TU Dresden

CarboLight Bridge – eine ultraleichte Konstruktion aus kohlefaserverstärktem und infraleichtem Beton | CarboLight Bridge – an ultra-lightweight construction made of carbon reinforced and infra-lightweight concrete for the German Museum in Munich 686

Marc Koschemann, Silke Scheerer

Curbach/Hegger

Konstruktionsstrategien für materialminimierte Carbonbetonstrukturen – Grundlagen für eine neue Art zu bauen | CRC/Transregio 280: Design strategies for material-minimised carbon reinforced concrete structures – principles of a new approach to construction **700**

Silke Scheerer, Birgit Beckmann, Jan Bielak, Sven Bosbach, Christopher Schmidt, Josef Hegger, Manfred Curbach

Gehlen/Winter/Lowke

Industrieller 3D-Betondruck durch selektive Zementaktivierung – Verfahren, Material, Anwendungen | Industrial 3D concrete printing by selective cement activation – process, material, applications **706**

Daniel Talke, Daniel Weger, Klaudius Henke, Thomas Kränkel, Dirk Lowke, Christoph Gehlen, Stefan Winter

Gelbrich

Automatisierte Herstellungstechnologie zur Fertigung von dünnwandigen 3D-geformten Verbundelementen für nachhaltige energie-effiziente Fassadenlösungen – „GreenFACE“ | Automated manufacturing technology for the production of thin-walled 3D-shaped composite elements for sustainable, energy-efficient facade solutions – “GreenFACE” **710**

Daniel Schönfelder, Henrik Funke, Sandra Gelbrich, Lothar Kroll

Hegger

Weitspannende Sandwichelemente mit vorgespannten Deckschichten aus Carbonbeton | Wide-span sandwich elements with prestressed facings made of carbon reinforced concrete **714**

Ann-Christine von der Heid, Norbert Will, Josef Hegger

Kloft

Magnetische Ausrichtung von Mikro-Stahldrahtfasern in UHPFRC | Magnetic alignment of microsteel fibers in UHPFRC **720**

Lukas Ledderose, Harald Kloft

Kroll/Gelbrich

Wiederverwendbare flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen | Re-usable and flexible GFRP formwork for the production of double curved concrete lightweight elements **726**

Carolin Petzoldt, Christian Müller, Henrik Funke, Sandra Gelbrich, Lothar Kroll

Lohaus/Rolfes

UHFB-Drucktragglieder (basierend auf wickelverstärkten Hybridrohren) in voll digital datengestützter Fließfertigung als Basis für eine modulare Betonbauweise | UHPC compression rods (based on wrapped hybrid tubes) in fully digitally data-supported flow production as the basis for a modular concrete construction method **734**

Ludger Lohaus, Jan Markowski, Raimund Rolfes, Franz Ferdinand Tritschel

Mark/Schnell

Auslegung von Parabolrinnen für Solarkraftwerke im Originalmaßstab 738
Patrick Forman, Tobias Stallmann, Peter Mark, Jürgen Schnell

Mark/Schnell

Punktfokussierende Heliostaten aus Hochleistungsbeton | Point-focusing heliostats made from high-performance concretes 754
Patrick Forman, Sebastian Penkert, Peter Mark, Jürgen Schnell

Sobek

Herstellung von biomimetischen und biologisch inspirierten (modularen) Strukturen | Fabrication of biomimetic and biologically inspired (modular) structures 758
Daria Kovaleva, Oliver Gericke, Werner Sobek

Sobek

Sandschalung zur Herstellung von dünnwandigen Sandwiches aus Carbonbeton | Sand formwork for the production of thin-walled sandwiches made from carbon concrete 762
Oliver Gericke, Walter Haase, Werner Sobek

Sobek/Sawodny/Leistner

Integrale Planung und Herstellung von ressourceneffizienten Betonbauteilen aus mineralischer Faserverbundbewehrung und gradiertem Beton | Design and production of resource-efficient concrete components made of mineral fibre composite reinforcement and graded concrete 766
David Nigl, Daniel Schmeer, Walter Haase, Benjamin Schönemann, Katrin Lenz, Steffen Steier, Oliver Sawodny, Philip Leistner, Lucio Blandini, Werner Sobek

Teil 3: Koordination | Part 3: Coordination

Curbach (Z)

Koordination des SPP 1542 | Coordination of SPP 1542 774
Silke Scheerer, Manfred Curbach

Vorwort | Preface

Bereits vor 50 Jahren zeigte ein Forscherteam um Donella und Dennis Meadows am MIT in einer vom Club of Rome initiierten Studie¹ mögliche Zukünfte der Weltwirtschaft unter Einbeziehung der globalen Wirkung von Industrialisierung, Bevölkerungswachstum, Unterernährung, Ausbeutung von Rohstoffreserven und Zerstörung von Lebensraum auf. Heute – ein halbes Jahrhundert später – haben diese Szenarien nichts an Aktualität verloren. Sie sind vielmehr verstärkt ins Bewusstsein gerückt. Themen wie globale Ressourcenknappheit, Klimaveränderung, Bevölkerungswachstum, Verantwortung und Generationengerechtigkeit im ökologischen, ökonomischen und sozialen Sinne sind heute allgegenwärtig und prägen weite Bereiche unseres Lebens und Arbeitens. Das Prinzip der Nachhaltigkeit, erstmals 1713 von Hans Carl von Carlowitz schriftlich formuliert², gehört heute zur Vision und Philosophie fast jedes Unternehmens und ist wesentlicher Bestandteil von Wissenschaft und Bildung.

Gebautes prägt unsere heutige Umwelt. Ohne Bauwerke sind Leben und Arbeiten nicht denkbar. Es ist also nicht verwunderlich, dass das Bauwesen weltweit zu den wachstumsstärksten Branchen gehört. Doch das Bauen hat auch Schattenseiten; exemplarisch genannt seien neben einem erheblichen Flächen- und Energieverbrauch der enorme Bedarf an Sand und Kies und ein hoher CO₂-Footprint gerade beim Massenbaustoff Beton. Folglich stellt sich die Frage, wie das Bauen mit Beton zukunftsfähig gemacht werden kann.

As early as 50 years ago, a team of researchers around Donella and Dennis Meadows at MIT showed possible futures of the world economy in a study¹ initiated by the Club of Rome, taking into account the global impact of industrialisation, population growth, malnutrition, exploitation of raw material reserves and destruction of living space. Today – half a century later – these scenarios have lost none of their relevance. On the contrary, they have become more prominent. Topics such as global resource scarcity, climate change, population growth, responsibility and intergenerational fairness in the ecological, economic and social sense are omnipresent today and influence wide areas of our life and work. The principle of sustainability, first formulated in written form by Hans Carl von Carlowitz in 1713², is now part of the vision and philosophy of almost every company and is an essential ingredient of science and education.

Buildings shape our environment today. Life and work are inconceivable without buildings. It is therefore not surprising that construction is one of the fastest-growing industries worldwide. However, construction also has its downsides; for example, in addition to considerable land and energy consumption, there is an enormous demand for sand and gravel and a high CO₂ footprint, especially for the mass construction material concrete. Consequently, the question arises of how construction with concrete can be made sustainable.

¹ Donella H. Meadows, D. H.; Meadows, D. L.; Randers, J.; Behrens III, W. W.: The Limits to Growth : A report for the CLUB OF ROME'S project on the predicament of mankind. Potomac Associates – Universe Books, 1972 – http://collections.dartmouth.edu/teitexts/meadows/diplomatic/meadows_itg-diplomatic.html

² s. u. a. | see e.g.: Das Lexikon der Nachhaltigkeit: <https://www.nachhaltigkeit.info/> (02.03.2022) oder | https://de.wikipedia.org/wiki/Hans_Carl_von_Carlowitz – dort verwiesen auf | there reference to: von Carlowitz, H. C.: Sylvicultura oeconomica oder haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur wilden Baum-Zucht. 1713

Hier setzte die Initiativgruppe des SPP 1542 im Jahr 2009 an. Ziel war es, mit gezielter, konzentrierter, interdisziplinärer Grundlagenforschung einen Paradigmenwechsel im Bauwesen zu befördern. Die Vision: Concrete light = leichter, effizienter, intelligenter, ästhetischer, ressourcenschonender Betonbau der Zukunft als Beitrag zu einer neuen Baukultur. 2010 richtete die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) das Schwerpunktprogramm 1542 ein, Mitte 2011 war Start für die erste Förderperiode, der 2014 eine zweite folgte.

Kernpunkt des SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton – Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien“ war die bauteilspezifische Grundlagenforschung nach dem Prinzip „*form follows force*“, wobei die ganze Fülle baubarer Strukturen vom eindimensionalen Stab bis zum dreidimensionalen Schalentragswerk adressiert werden sollte. Die Natur diente als Inspirationsquelle. Parallel sollten Aspekte der Herstellung beginnend bei innovativen Schalungssystemen und Bautechnologien für frei geformte Betonbauteile bis hin zu Fügetechniken für filigrane Betonbauteile sowie geeignete Berechnungsverfahren für dynamisch kritische und stabilitätsgefährdete Strukturen entwickelt und erforscht werden.

Im vorliegenden Buch sind nun die wichtigsten Ergebnisse der Forschung im SPP 1542 zusammengestellt. Der erste Teil enthält die Ergebnisberichte aller SPP-Projekte, ergänzt um Zusatzinformationen wie beispielsweise Publikationen und studentische Arbeiten. Im zweiten Teil werden zum einen Demonstratoren vorgestellt, die an verschiedenen SPP-Standorten entstanden sind und die sich hervorragend eignen, die Grundlagenforschung im wahrsten Sinne des Wortes greifbar zu machen. Zum anderen werden ausgewählte Anschlussprojekte vorgestellt, die aus den SPP-Projekten heraus initiiert wurden und zeigen, dass die Thematik „Leicht Bauen mit Beton“ auch über das SPP 1542 hinaus hoch aktuell ist. Im abschließenden dritten Teil wurden allgemeine Daten und Fakten rund

This was the starting point for the SPP 1542 initiative group in 2009. The goal was to promote a paradigm shift in the construction industry with focused, coordinated, interdisciplinary basic research. The vision: Concrete light = lighter, more efficient, intelligent, aesthetic, resource-saving concrete construction of the future as a contribution to a new building culture. In 2010, the Deutsche Forschungsgemeinschaft (German Research Foundation, DFG) established the Priority Programme 1542, and in mid-2011 the first funding period was launched, followed by a second in 2014.

The core of SPP 1542 “Concrete light – foundations for building the future with bionic and mathematical design principles” was building component-specific basic research according to the principle “*form follows force*”, whereby the entire range of buildable structures from one-dimensional bars to three-dimensional shell structures was to be addressed. Nature served as a source of inspiration. In parallel, aspects of production were to be developed and researched, beginning with innovative formwork systems and construction technologies for freely formed concrete components and extending to joining techniques for filigree concrete components, as well as suitable calculation methods for dynamically critical structures and structures at risk of stability.

In the present book, the most important results of the research in SPP 1542 are compiled. The first part contains the final reports of all SPP subprojects, supplemented by additional information such as publications and student work. In the second part, on the one hand, demonstrators are presented that were created at various SPP locations and that are excellently suited to make basic research graspable in the truest sense of the word. On the other hand, selected follow-up projects are presented that were initiated from the SPP projects and show that the topic of “Concrete light” is also highly up-to-date beyond SPP 1542. In the concluding third part, general data and facts

um die Koordination des Schwerpunktprogramms zusammengestellt.

Im SPP 1542 wirkten über die gesamte Laufzeit hinweg über 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit, wurden circa 290 Publikationen erstellt und 190 studentische Arbeiten verfasst. Hinzu kommen 28 Dissertationen, zwei Habilitationsschriften und drei Patente. Die Beteiligten sind eng vernetzt, es entstanden neue Kooperationen und Forschungsideen. Nicht zuletzt werden Ideen aus dem SPP in mehreren DFG-Sonderforschungsbereichen fortgeführt. Deshalb danken wir an dieser Stelle im Namen aller Beteiligten der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Einrichtung des Schwerpunktprogramms 1542, die Unterstützung und die Förderung. Ausdrücklich danken möchten wir zudem den Gutachterinnen und Gutachtern, die durch ihre Tätigkeit das Schwerpunktprogramm mitgestaltet haben. Und nicht zuletzt gilt ein Dank allen Autorinnen und Autoren, die an diesem Buch mitgewirkt haben, allen Forschenden für die inspirierenden Ergebnisse sowie dem Team des Instituts für Massivbau der TU Dresden für die allumfassende Unterstützung rund um die Organisation und Koordination des SPP 1542.

Dresden, 10. März 2022

Silke Scheerer und Manfred Curbach

about the coordination of the priority programme were compiled.

Over the entire funding time of SPP 1542, more than 100 scientists were involved, about 290 publications and 190 student theses were written. In addition, there were 28 dissertations, two habilitation theses and three patents. The participants are closely linked, and new collaborations and research ideas have emerged. Last but not least, ideas from the SPP are being continued in several DFG Collaborative Research Centres. Therefore, on behalf of all those involved, we would like to take this opportunity to thank the DFG for establishing Priority Programme 1542, for support and funding. We would also like to expressly thank the reviewers who helped shape the priority programme through their work. Last but not least, we would like to thank all the authors who contributed to this book, all the researchers for their inspiring results, and the team at the Institute of Concrete Structures at TU Dresden for their all-round support in organising and coordinating the SPP.

Teil 1 | Part 1



SPP-Projekte | SPP projects

Nichtlineare Optimierung geometrisch definierter Fugen von räumlich gekrümmten Betonfertigteilen mit isogeometrischen Verfahren | Non-linear optimization of geometrically defined joints of spatially curved prefabricated concrete elements with isogeometric analysis

► Anna M. Bauer, Michael Breitenberger, Kai-Uwe Bletzinger
► Lehrstuhl für Statik, Technische Universität München

1 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Die Vision dieses Projektes ist es, einen durchgängigen Prozess zu entwickeln, der es erlaubt, den Entwurf, die Berechnung und die Fugenoptimierung von flächigen Strukturen aus Betonfertigteilen sehr einfach und effizient durchzuführen. Damit soll die Herstellung von freien Formen, wie beispielsweise „Blobs“ und Hängedarmen aus Beton, unterstützt und gefördert werden.

Den zentralen Kern des Projektes bildet die *isogeometrische B-Rep-Analyse* (IBRA) [1], [2]. Diese Methode wurde im Projekt neu entwickelt und ermöglicht die direkte Berechnung und Optimierung des CAD-Modells (CAD: *computer-aided design*), ohne dieses zu vernetzen, wie das bei der klassischen Finite-Elemente-Analyse (FEA) gemacht werden muss. IBRA basiert auf der *isogeometrischen Analyse* (IGA) [3]–[5] und verwendet für die Berechnung und Optimierung die gleichen Basisfunktionen sowie die gleiche Randbeschreibung (*boundary representation*, kurz B-Rep) und Topologie des CAD-Modells.

In CAD-Programmen werden üblicherweise NURBS (*non-uniform rational B-splines*) für die

1 Initial questions and objectives of the project

The vision of this project is to develop a continuous process that allows very easy and efficient design, calculation and joint optimization of surface-like structures made of precast concrete elements. This should support and encourage the production of free forms, such as “blobs” and hanging forms made of concrete.

The essential part of the project is the *isogeometric B-Rep analysis* (IBRA) [1], [2]. This method was newly developed in the project and enables the direct calculation and optimization of the CAD model (CAD: *computer-aided design*) without meshing it, as is necessary in classical finite element analysis (FEA). IBRA is based on the *isogeometric analysis* (IGA) [3]–[5] and uses the same basic functions for calculation and optimization as well as the same boundary representation (B-Rep) and topology of the CAD model.

In CAD programs, NURBS (*non-uniform rational B-splines*) are usually used for the representation of free-form geometries, since they allow a uniform description of analytical and free forms. Furthermore, intuitive modelling [6] is possible. Therefore, NURBS were used for the geometry descriptions in the project.

Darstellung von Freiformgeometrien verwendet, da diese eine einheitliche Beschreibung von analytischen und freien Formen ermöglichen und zudem intuitives Modellieren erlauben [6]. Deshalb wurden im Projekt NURBS für die Geometriebeschreibungen verwendet.

Mit IBRA ist es möglich, für den gesamten Prozess vom Entwurf in CAD über die Berechnung und Optimierung in *Computer Aided Engineering* (CAE) bis zur Herstellungsunterstützung mit *Computer Aided Manufacturing* (CAM) dasselbe Geometriemodell zu verwenden. Somit kann zum einen der gesamte Prozess wesentlich vereinfacht werden. Zum anderen können ganz neue Ansätze verfolgt werden, welche mit der klassischen Finite-Elemente-Methode (FEM) kaum denkbar sind. Mit IBRA eröffnen sich viele neue Möglichkeiten in den verschiedensten Bereichen, wie z. B. Formfindung, Strukturoptimierung und Fluid-Struktur-Interaktion, um nur einige zu nennen.

In diesem Projekt sollten die Potentiale von IBRA für die Fugenoptimierung erschlossen werden. IBRA ermöglicht eine elegante Modellierung von geometrisch definierten Fugen und deren Optimierung. Außerdem lassen sich mit IBRA beliebige Versteifungen bzw. Rippen in der Schale berücksichtigen. Im Rahmen dieses Projektes sollte der Ansatz einer in einer gekrümmten Fläche integrierten Kinematik weiterentwickelt werden, um die Mechanik von Fugen und Rippen für Schalenmodelle mit dem Ziel zu berücksichtigen, Fertigbetonschalen zu berechnen und deren Fugenmuster zu optimieren. Neben den Entwurfskriterien (u. a. Steifigkeit, Gewicht, Kosten, Umweltverträglichkeit) und Nebenbedingungen (z. B. Festigkeiten, Herstellrestriktionen, Abmessungen) sollten zusätzliche praxisrelevante Aspekte, wie z. B. die geometrische Ausbildung der Fugen und die Stabilität für unterschiedliche Lastfallkombinationen, berücksichtigt werden. Diese Aspekte müssen bei der Fugenoptimierung beachtet werden, um die entwickelte Methode für die Praxis verwenden zu können.

With IBRA, it is possible to use the same geometry model for the entire process, i.e. from design in CAD to calculation and optimization in Computer Aided Engineering (CAE) to supporting manufacturing with Computer Aided Manufacturing (CAM). On the one hand, the entire process can thus be simplified considerably. On the other hand, completely new approaches can be pursued, which are hardly conceivable with the classic finite element method (FEM). IBRA opens up many new possibilities in a wide variety of fields, such as form finding, structural optimization and fluid-structure interaction, to name just a few.

The aim of this project was to unlock the potential of IBRA for joint optimization. IBRA enables elegant modelling of geometrically defined joints and their optimization. In addition, IBRA can be used to consider any stiffeners or ribs in the shell. Within the scope of this project, the approach of kinematics integrated in a curved surface, which considers the mechanics of joints and ribs for shell models, should be further developed with the aim of calculating precast concrete shells and optimizing their joint patterns. In addition to the design criteria (including stiffness, weight, costs, environmental compatibility) and constraints (e.g. strength, manufacturing restrictions, dimensions), additional practical aspects, such as the geometric design of the joints and the stability for different load combinations, should be considered. These aspects have to be taken into account in the joint optimization in order to use the developed method in practice.

The shapes of the shells can basically be chosen freely for the presented approach. However, mechanically motivated forms are desirable, such as forms that have been developed according to the hanging principle [7], [8]. Due to better load transfer, the shells can be made thinner. A modern example of a mechanically motivated structure is the roof of the bus and tram stop "Münchner Freiheit" (Fig. 1). Its shape follows the principle of a hanging model and is made of prefabricated steel elements.



Bild 1: Dach der Bus- und Trambahnhaltestelle „Münchner Freiheit“ in München | **Fig. 1:** Roof of the bus and tram stop “Münchner Freiheit” in Munich

Für den gewählten Ansatz können die Formen der Schalen grundsätzlich frei gewählt werden. Anzustreben sind jedoch mechanisch motivierte Formen, wie beispielsweise Formen, welche nach dem Hängeprinzip entwickelt worden sind [7], [8]. Damit können die Schalen aufgrund der besseren Lastabtragung schlanker gebaut werden. Ein modernes Beispiel für eine mechanisch motivierte Struktur ist das Dach der Bus- und Trambahnhaltestelle „Münchner Freiheit“ (Bild 1). Dieses ist nach dem Hängeprinzip geformt und aus Stahl-Fertigteilen gefügt.

Mit dem hier abschließend vorgestellten Projekt soll das Bauen solcher Strukturen mit Betonfertigteilen gefördert werden. Die Kosten sollten dabei durch computergestützte Fertigteilherstellung und den effizienten Montagevorgang niedrig gehalten werden. Die Kombination aus computergestützten Entwurfswerkzeugen, modernsten Materialien und automatisierten Fertigteilproduktion birgt erhebliche Potentiale für anspruchsvolles, nachhaltiges und kostengünstiges Bauen. Die daraus resultierenden Visionen für einen gesamtheitlichen, digitalen Entwurfsprozess sind z. B. Gegenstand des neu eingerichteten SPP 2187 [9] und wurden über die speziellen Fragestellungen des Projektes hinaus nicht verfolgt. Gleichwohl gelangen mit der Entwicklung von IBRA wichtige Vorarbeiten, die eine derartige Weiterentwicklung mit großen Erfolgsaussichten geradezu aufdrängt.

Was die aus Fertigteilen zusammengesetzte Schale betrifft, hilft die bildhafte Vorstellung

The project presented here had the intent to support the construction of such structures with precast concrete elements. Computer-aided precast manufacturing and an efficient assembly process should keep the costs low. The combination of computer-aided design tools, state-of-the-art materials and automated production of precasted elements holds considerable potential for sophisticated, sustainable and cost-effective construction. The resulting visions for a holistic, digital design process are, for example, the subject of the newly established SPP 2187 [9] and were not pursued beyond the specific issues of the project. Nevertheless, with the development of IBRA, important preliminary work has been achieved which virtually imposes such a further development with great prospects of success.

The turtle shell illustrates a shell composed of several parts (cf. Fig. 2). Just as the segments of the turtle shell are optimally arranged, the joints for the concrete shells should also be optimally positioned. The optimization criterion can be freely selected. For example, the costs should be minimized while ensuring stability and taking into account different load combinations. It should also be possible to individually adjust the material properties in the individual precast elements in order to achieve the defined optimization targets for the individual segment (production, formwork technology, material and thickness distribution), the complete shell (overall load-bearing behaviour, stability), costs (joint length, material, production, joining technology) as well as sustainability and environ-

eines Schildkrötenpanzers (vgl. Bild 2). So wie bei der Schildkröte die Segmente optimal angeordnet sind, sollten die Fugen für die Betonschalen ebenfalls optimal positioniert werden. Das Optimierungskriterium kann dabei frei gewählt werden. Beispielsweise sollten die Kosten, bei gleichzeitiger Gewährleistung der Stabilität und Berücksichtigung unterschiedlicher Lastfallkombinationen, minimiert werden. Für die Optimierung sollten auch die Materialeigenschaften in den einzelnen Fertigteilen individuell eingestellt werden können, um die definierten Optimierungsziele für das einzelne Segment (Herstellung, Schalungstechnik, Material- und Dickenverteilung), die komplette Schale (Gesamttragverhalten, Stabilität), Kosten (Fugenlänge, Materialaufwand, Herstellung, Fügetechnik) sowie Nachhaltigkeits- und Umweltkriterien (Dauerhaftigkeit, Energieaufwand, Recyclingfähigkeit) zu erreichen.

2 Entwicklung der durchgeführten Arbeiten einschließlich Abweichungen vom ursprünglichen Konzept, ggf. wissenschaftliche Fehlschläge, Probleme in der Projektorganisation oder technischen Durchführung

Das Projekt war sehr erfolgreich und führte u. a. zur Promotion von Herrn Michael Breitenberger [2]. Der Kernpunkt – die Entwicklung und Umsetzung des neuartigen IBRA-Konzeptes – wurde erfolgreich umgesetzt. Die Neuartigkeit

mental criteria (durability, energy expenditure, recyclability).

2 Progress of the work carried out, including deviations from the original concept, scientific failures, problems in project organization or technical implementation, if any

The project was very successful and led, among other things, to the doctorate of Michael Breitenberger [2]. The key point – the development and implementation of the novel IBRA concept – was successfully completed. The novelty of the procedure allowed a very intensive and successful publication activity, which was supported by the great general attractiveness of isogeometric analysis (IGA). The extension of IGA to the consistently implemented B-Rep model as well as the development of arbitrarily parameterized and trimmed patches for IGA is the methodologically significant contribution of the working group. In the meantime, the IBRA format has been adopted by leading commercial software solutions (ANSA by BETA CAE Systems) with good prospects for a commercial standard.

At the time of the preparation of the proposal, it was originally planned to determine the joint geometry by means of a further development of the SIMP method of topology optimization. Instead of the usual topology of a rigid system, we would have determined the topology of a



Bild 2: Schildkrötenpanzer als Analogie zu Schalen, zusammengesetzt aus Betonfertigteilen | **Fig. 2:** Turtle shell as analogy to shells, which are composed by prefabricated concrete components

des Verfahrens erlaubte eine sehr intensive und erfolgreiche Publikationstätigkeit, was durch die große, allgemeine Attraktivität der isogeometrischen Analyse (IGA) gefördert wurde. Die Erweiterung von IGA auf das konsequent umgesetzte B-Rep-Modell sowie die Erschließung beliebig parametrisierter und getrimmter Patches für IGA ist der methodisch bedeutende Beitrag der Arbeitsgruppe. Inzwischen wurde das IBRA-Format von führenden, kommerziellen Softwarelösungen (ANSA von BETA CAE Systems) übernommen mit guter Aussicht für einen kommerziellen Standard.

Zur Zeit der Ausarbeitung des Antrags war ursprünglich geplant, die Fugengeometrie mithilfe einer Weiterentwicklung des SIMP-Verfahrens der Topologieoptimierung zu ermitteln. Anstatt wie üblich die Topologie eines steifen Systems hätten wir die Topologie eines geschwächten Fugenmusters ermittelt, was theoretisch wie methodisch eine sehr reizvolle Forschungsidee darstellt. Erste Untersuchungen wurden diesbezüglich angestellt, aber schlussendlich nicht weiterverfolgt, s. Abschnitt 3.6. Eine Abwägung der Potentiale führte zur Entscheidung, das Thema zugunsten der IBRA-Methode zu modifizieren, insbesondere was deren Vorteile bei der Erfassung realistischer Geometrien und Konstruktionsformen sowie die Einbettung in eine durchgängige, digitale Entwurfskette betrifft. Der Erfolg hat dies bestätigt.

Für die Abbildung der Fugenkinematiken wurden das IGA/IBRA-Grundkonzept erweitert und verschiedene Varianten entwickelt. Diese können jeweils an den vorliegenden Fugentyp

weakened joint pattern, which is a very attractive research idea both theoretically and methodically. Initial investigations were carried out in this regard, but were ultimately not pursued further, see Section 3.6. A weighing of the potentials led to the decision to modify the topic in favour of the IBRA method, especially with regard to its advantages in capturing realistic geometries and design shapes and its embedding in a continuous, digital design chain. The success has confirmed this.

The basic IGA/IBRA concept was extended, and different variants were developed for the representation of joint kinematics. These can each be adapted and combined to the existing joint type. The concept allows a smooth workflow from design to execution planning. While working on the assignment of the optimization of the joint positions, it turned out that these are mainly dominated by geometrical boundary conditions such as component dimensions (see Fig. 3) and therefore no general statements can be made about the optimal position.

In addition, due to their double curvature, shells can transfer any load almost arbitrarily, which is why the optimization does not provide clear and often not very useful results. For this reason, during the course of the project the focus was set on the full CAD integration of the results obtained, which additionally justified the fundamental change in the research approach. Since the process is fully integrated and can be automated, an optimization adapted to the respective project constraints is possible.

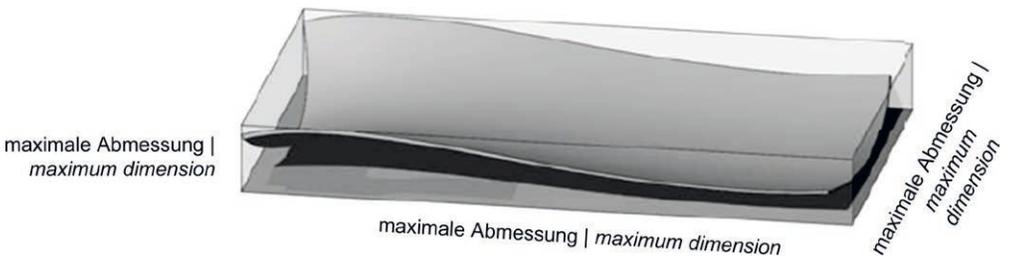


Bild 3: Nebenbedingung: Maximale Abmessungen (Länge, Breite, Höhe) für ein Betonfertigteil | **Fig. 3:** Constraint: maximum dimensions (length, width, height) of a precasted concrete element



Bild 4: Raststätte Deitingen Süd von Heinz Isler in der Schweiz | Fig. 4: Highway service area Deitingen south by Heinz Isler in Switzerland

angepasst und kombiniert werden. Dieses Konzept erlaubt einen flüssigen Arbeitslauf von der Entwurfs- bis zur Ausführungsplanung. Beim Arbeitspunkt der Optimierung der Fugenpositionen stellte sich heraus, dass diese hauptsächlich von geometrischen Randbedingungen, wie Bauteilabmessungen (s. Bild 3) dominiert wird und deswegen keine allgemeinen Aussagen über die optimale Position getroffen werden können.

Darüber hinaus können Schalen wegen ihrer doppelten Krümmung jede Belastung nahezu beliebig umlagern, weshalb die Optimierung keine eindeutigen und oft wenig brauchbaren Ergebnisse liefert. Deswegen wurde im Laufe des Projektes der Fokus auf die volle CAD-Integrierung der erarbeiteten Ergebnisse gelegt, was die grundsätzliche Änderung des Forschungsansatzes zusätzlich rechtfertigte. Da der Ablauf vollständig integriert ist und automatisiert werden kann, ist eine Optimierung angepasst an die entsprechenden Projektrandbedingungen möglich.

3 Darstellung der erreichten Ergebnisse

3.1 Isogeometrische Analyse (IGA)

Die *isogeometrische Analyse* ist eine Finite-Elemente-Methode, welche für die Lösung dieselben Basisfunktionen verwendet wie die CAD-Geometriebeschreibung [3]. In den meisten Fällen werden dafür NURBS-Funktionen [6] verwendet, da diese in den meisten CAD-Programmen für die Beschreibung von Freiformflächen

3 Outline of the achieved result

3.1 Isogeometric analysis (IGA)

The *isogeometric analysis* is a finite element method, which uses the same basic functions as the CAD geometry description [3]. In most cases, NURBS functions [6] are used for this purpose, as these are used in most CAD programs for the description of free-form surfaces. Fig. 5 shows, for example, the NURBS representation of the Deitingen Süd service station by Heinz Isler from Fig. 4. The shaping parameters for the front shell are shown as white dots.

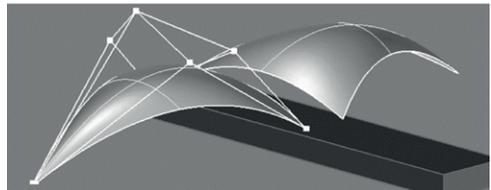


Bild 5: NURBS-modelliertes CAD-Modell der Raststätte Deitingen Süd | Fig. 5: CAD model of the highway service area Deitingen south modelled by NURBS

3.2 Isogeometric B-Rep analysis (IBRA)

In the project, the isogeometric B-Rep analysis was developed on the basis of isogeometric analysis. In addition to the basic functions, IBRA considers the boundary description (B-Rep) [1] and the topology of the CAD model. This means that the CAD model is used to approximate the solution. To ensure that the solution can be captured as accurately as possible, the CAD model is additionally refined. However, neither the

verwendet werden. In Bild 5 ist beispielsweise die NURBS-Darstellung der Raststätte Deitingen Süd von Heinz Isler aus Bild 4 gezeigt. Die formgebenden Parameter für die vordere Schale sind als weiße Punkte dargestellt.

3.2 Isogeometrische B-Rep Analyse (IBRA)

Im Projekt wurde auf Basis der isogeometrischen Analyse die isogeometrische B-Rep Analyse entwickelt. Dabei übernimmt IBRA zusätzlich zu den Basisfunktionen, die Randbeschreibung (B-Rep) [1] und die Topologie des CAD-Modelles. Das heißt, für die Approximation der Lösung wird das CAD-Modell verwendet. Damit die Lösung möglichst genau erfasst werden kann, wird das CAD-Modell zusätzlich verfeinert. Dabei ändern sich allerdings weder die Topologie, die Geometrie noch die Parametrisierung des CAD-Modells. IBRA ist ein allgemeiner und sehr vielversprechender Ansatz für die Integration von Entwurf und Berechnung, der in den verschiedensten Bereichen wie Formfindung, Dynamik, Strukturoptimierung eingesetzt werden kann.

Eine wichtige Komponente der IBRA-Methode ist die Berechnung von getrimmten NURBS-Flächen. Getrimmte Flächen sind nur zu Teilen sichtbare, ungetrimmte NURBS-Flächen, definiert durch eine Randbeschreibung im Parameterraum. Für die Analyse von getrimmten Flächen

topology, the geometry nor the parameterization type of the CAD model are changed. IBRA is a general and very promising approach for the integration of design and analysis that can be used in a wide range of areas such as form finding, dynamics and structural optimization.

An important component of the IBRA method is the analysis of trimmed NURBS surfaces. Trimmed surfaces are only partially visible, untrimmed NURBS surfaces defined by an edge description in the parameter space. An IBRA-consistent computation technique has been developed within this project, which allows a very efficient and accurate analysis of trimmed surfaces. This technique is based on a hidden Jacobi approach (adaptive Gaussian integration procedure, short AGIP), which was also developed in the project. For this approach, the visible area of a trimmed NURBS surface is parameterized with NURBS surfaces in the parameter space [1]. Thus, the visible area of the trimmed surface can be described explicitly (see Fig. 6).

3.3 Joining of individual segments – joint kinematics

First of all, the individual concrete segments must be joined together. This can be done by using strong or weak coupling methods.

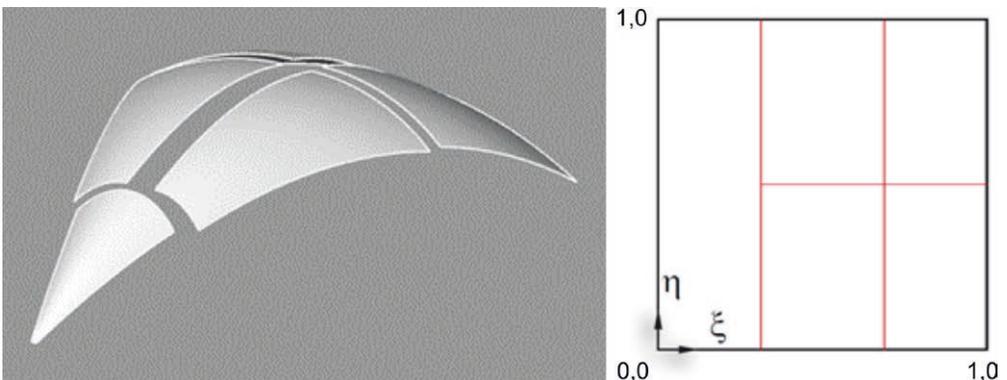


Bild 6: Segmentierte NURBS-Fläche aus Bild 5, zusammengesetzt aus getrimmten NURBS-Flächen (B-Rep Darstellung) mit dem entsprechenden Parameterraum; im Parameterraum ist die Randbeschreibung (Segmentierung) definiert | **Fig. 6:** Segmented NURBS surface of Fig. 5, assembled from several trimmed NURBS surfaces (B-Rep description) with their respective domain in the parameter space; the segmentation is defined in the parameter space

wurde im Rahmen dieses Projektes eine IBRA-konsistente Berechnungstechnik entwickelt, welche es erlaubt, getrimmte Flächen sehr effizient und genau zu berechnen. Diese Technik basiert auf einem versteckten Jacobi-Ansatz (*adaptive Gaussian integration procedure*, kurz AGIP), welcher ebenfalls im Projekt entwickelt wurde. Für diese Technik wird der sichtbare Bereich einer getrimmten NURBS-Fläche mit NURBS-Flächen im Parameterraum parametrisiert [1]. So kann der sichtbare Bereich der getrimmten Fläche explizit beschrieben werden (s. Bild 6).

3.3 Fügen einzelner Segmente – Fugenkinematiken

Zunächst einmal müssen die einzelnen Betonsegmente zusammengefügt werden. Dazu stehen starke und schwache Kopplungsmethoden zur Verfügung.

3.3.1 Starke Kopplung

Die starke Kopplung der Segmente, d. h. das Verwenden derselben Freiheitsgrade, ist nur im Spezialfall möglich. Für den speziellen Fall der Segmentierung einer Schale, die mit nur einem NURBS-Patch modelliert und durch Trimmen segmentiert wird, ist dies jedoch möglich. Die Segmente werden so gekoppelt, als ob keine Fuge vorhanden wäre.

3.3.2 Schwache Kopplung – Elementformulierung

Da in diesem Projekt aber explizit die Abbildung der Fuge im Tragverhalten ein Schwerpunkt ist, wurden weitere Varianten entwickelt. Die schwache Kopplung zur Umsetzung des allgemeinen Kopplungsfalles zweier unabhängig voneinander definierten NURBS-Flächen kann durch einen zusätzlichen Term in der virtuellen Arbeit abgebildet werden. Verschiedene Verfahren wie Penalty- und Lagrange-Multiplikatoren sind hierbei zielführend. Im Folgenden ist dieser zusätzliche Term mit dem Penaltyverfahren dargestellt, da dies eine schnelle und flexible Umsetzung und effiziente Rechenzeit ermöglicht. Die Kopplung wird hierbei, auch in Anlehnung an die Fugenkinematik, in einen

3.3.1 Strong coupling

The strong coupling of the segments, i.e. using the same degrees of freedom, is only possible in special cases. However, this is possible for the special case of segmenting a shell that is modelled with only one NURBS patch and segmented by trimming. The segments are coupled as if there were no joints.

3.3.2 Weak coupling – element formulation

However, since the modelling of the joint in the load-bearing behaviour is an explicit task of this project, further variants were developed. The weak coupling for implementing the general coupling case of two independently defined NURBS surfaces can be represented by an additional term in the virtual work. Different methods such as penalty method and Lagrange multipliers are useful in this context. In the following, this additional term is defined by the penalty method, since it allows a fast and flexible implementation and efficient computing time. The coupling is divided into a displacement (δW^{disp}) and a rotation part (δW^{rot}), also based on the joint kinematics. Each part receives its own penalty factor α_{disp} and α_{rot} , which acts like a spring between the two coupled surfaces.

$$\delta W^{\text{disp}} = \alpha_{\text{disp}} \int_{\Gamma} (\mathbf{u}^1 - \mathbf{u}^2) \cdot (\delta \mathbf{u}^1 - \delta \mathbf{u}^2) d\Gamma$$

$$\delta W^{\text{rot}} = \alpha_{\text{rot}} \int_{\Gamma} (\boldsymbol{\omega}^1 - \boldsymbol{\omega}^2) \cdot (\delta \boldsymbol{\omega}^1 - \delta \boldsymbol{\omega}^2) d\Gamma$$

If a high penalty factor is selected, the joined parts behave like a monolithic shell. If a lower penalty factor is chosen, the weakening of the shell can be represented by the joint. The spring stiffnesses can be determined by numerical or experimental tests. This is described in more detail in section 3.3.4.

3.3.3 Benchmark example – mainspring

The functionality of the formulation can be tested with a highly non-linear example. For this purpose, a thin plate strip is clamped on one of the narrow sides and a moment is applied to

Verschiebungs- (δW^{disp}) und einen Rotationsanteil (δW^{rot}) aufgeteilt. Jeder Teil erhält seinen eigenen Penaltyfaktor α_{disp} und α_{rot} , welcher wie eine Feder zwischen den beiden gekoppelten Flächen wirkt.

$$\delta W^{disp} = \alpha_{disp} \int_{\Gamma} (u^1 - u^2) \cdot (\delta u^1 - \delta u^2) d\Gamma$$

$$\delta W^{rot} = \alpha_{rot} \int_{\Gamma} (\omega^1 - \omega^2) \cdot (\delta \omega^1 - \delta \omega^2) d\Gamma$$

Wird ein hoher Penaltyfaktor gewählt, verhalten sich die gefügten Teile wie eine monolithische Schale. Bei geringerem Penaltyfaktor kann die Schwächung der Schale durch die Fuge abgebildet werden. Die Federsteifigkeiten können durch numerische oder experimentelle Versuche bestimmt werden. Dies wird genauer in Abschnitt 3.3.4 beschrieben.

3.3.3 Validierungsbeispiel – Uhrfeder

Die Funktionstüchtigkeit der Formulierung kann mit einem hochgradig nichtlinearen Beispiel getestet werden. Hierzu wird ein dünner Plattenstreifen an einer schmalen Seite eingespannt und auf der anderen Seite mit einem Moment M beansprucht. Für $M = 2 \pi E I / L$ rollt sich der Plattenstreifen zu einem exakten Kreis auf (Bild 7).

the other side. The flat plate strip rolls up into an exact circle if it is subjected to a tip moment $M = 2 \pi E I / L$ (Fig. 7).

Fig. 8 describes various coupling scenarios with increasing complexity. The mainspring was tested for all parameterizations. The weakly coupled, deformed strip for $M = M_{max}$ is shown in Fig. 9. All displacement fields agree very well with the analytical solution. For the non-matching and straight-trimmed patches, the error of the tip displacement as a function of the mesh refinement and the polynomial degree of the parameterization is shown in Fig. 10.

3.3.4 Determination of the spring stiffness

As already mentioned above, the spring stiffnesses of the different types of joints can be determined by experiments or numerical simulation. The connection types (see Fig. 11) were developed and experimentally tested in the SPP project by Prof. Harald Budelmann and Prof. Harald Kloft (page 50 seq.).

For the numerical simulation, the joints shown in Fig. 11 were modelled in Autodesk Simulation Mechanical 2017 [10] with 3D elements, see also [11]. All failure mechanisms occurring in the ten-

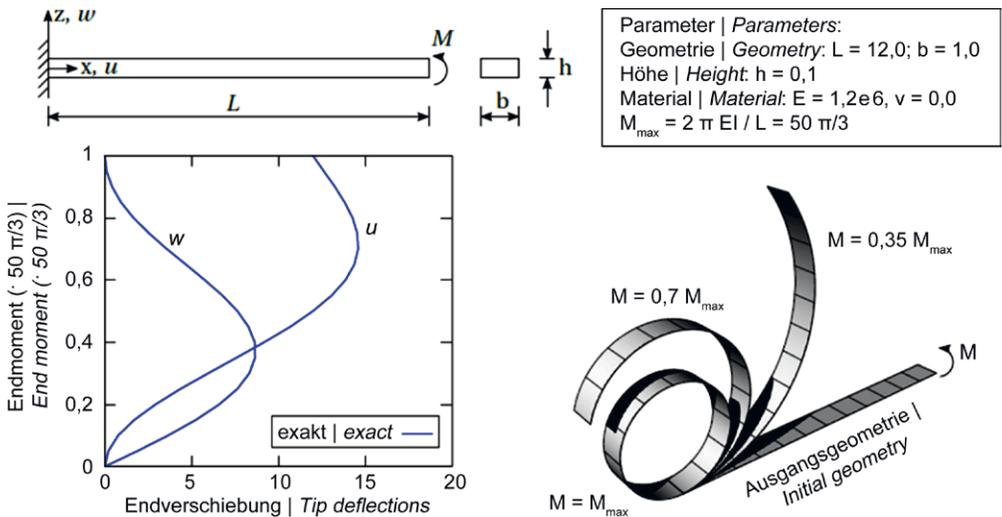


Bild 7: Uhrfeder – Beispielaufbau mit Referenzlösung | Fig. 7: Example of mainspring – problem description with reference solution

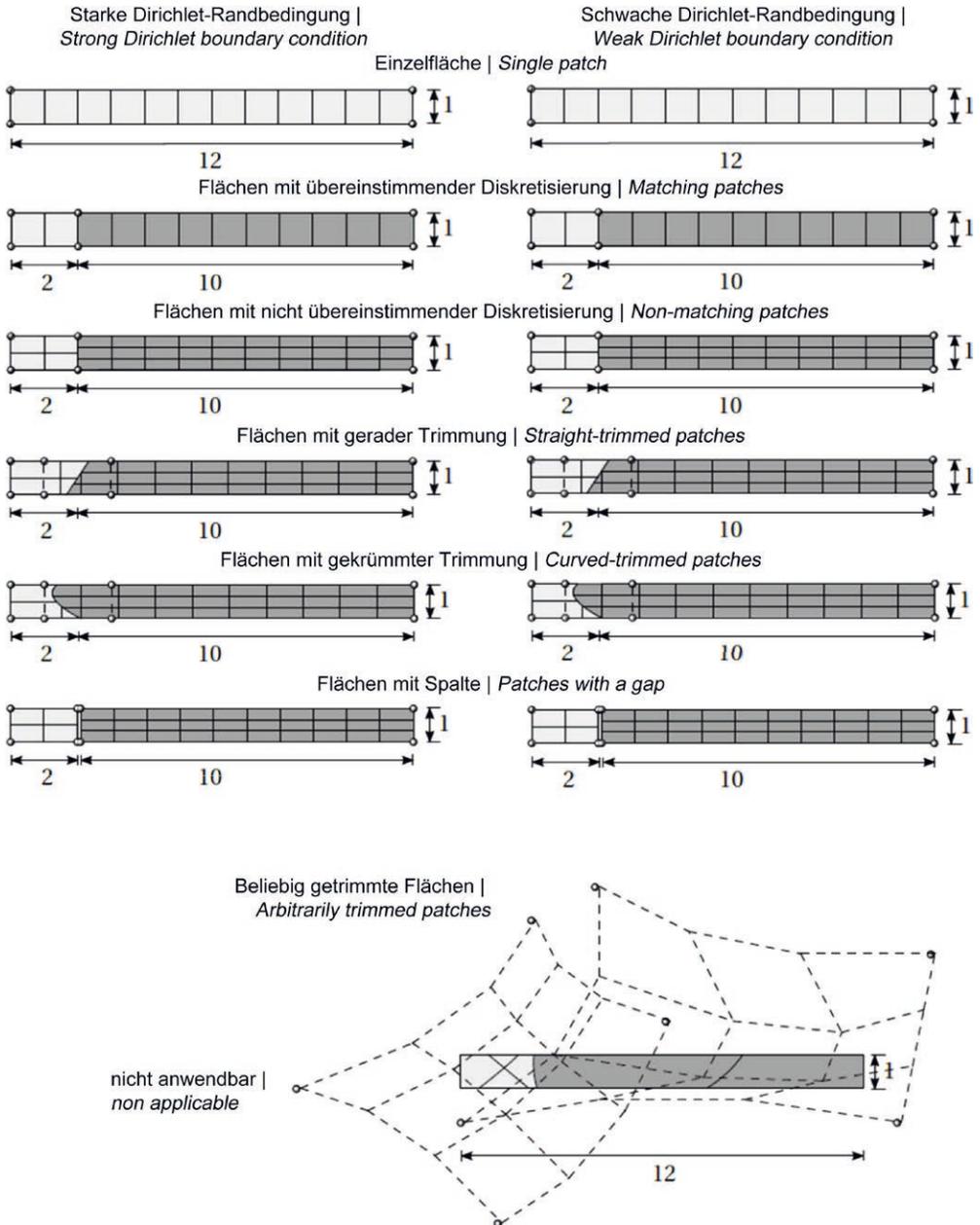


Bild 8: Verschiedene Geometriebeschreibungen des in Bild 7 dargestellten Problems. Die Punkte repräsentieren die charakteristischen Kontrollpunkte. Für alle mehrteiligen Geometrien wurde eine schwache Kopplung benutzt. Beide Arten für Dirichlet-Randbedingungen, stark und schwach, können verwendet werden. | **Fig. 8:** Different geometry descriptions of problem in Fig. 7. The points represent characteristic control points. For all multi-patch geometries, a weak coupling boundary condition is used. Both types of Dirichlet boundary conditions, strong and weak, can be used.

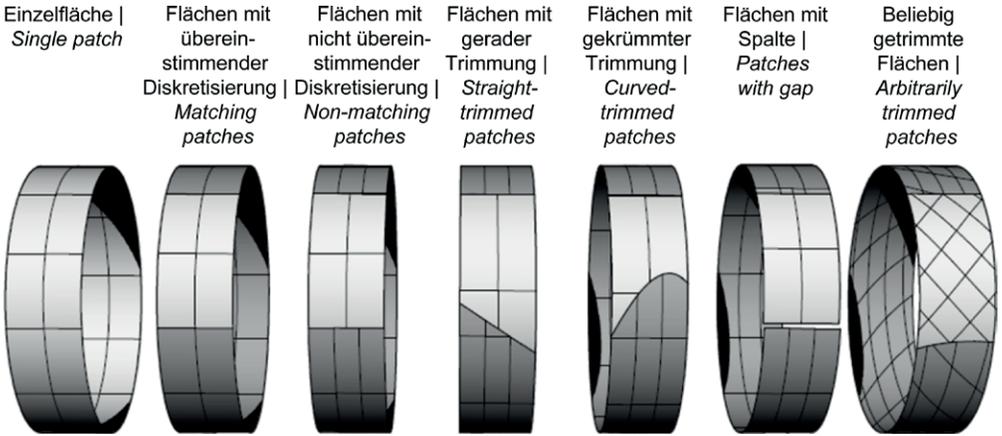


Bild 9: IBRA-Lösungen für das in Bild 7 dargestellte Problem mit $M = M_{max}$ mit den verschiedenen Geometriebeschreibungen aus Bild 8 | Fig. 9: IBRA solutions of the problem in Fig. 7 with $M = M_{max}$ using different geometry descriptions from Fig. 8

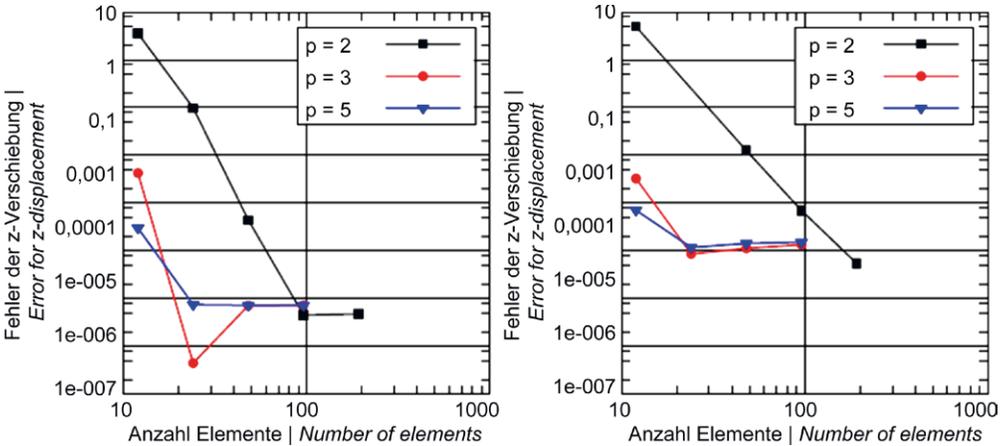


Bild 10: Fehler der Verschiebung in z-Richtung (Mitte der Spitze) für das in Bild 7 dargestellte Problem für verschiedene Polynomgrade mit $M = M_{max}$; links: non-matching patches, rechts: straight-trimmed patches | Fig. 10: Error of displacement in z-direction (middle of tip) for the problem in Fig. 7 by using different geometry descriptions with $M = M_{max}$; left: non-matching patches, right: straight-trimmed patches.

Bild 8 beschreibt verschiedene Kopplungsszenarien mit aufsteigender Komplexität. Für all diese Parametrisierungen wurde das Beispiel Uhrfeder getestet. Die Verformungsfigur für $M = M_{max}$ und schwache Kopplung wird in Bild 9 abgebildet. Alle Verschiebungsfelder stimmen sehr gut mit der analytischen Lösung überein. Für die *non-matching* und die *straight-trimmed patches* wird der Fehler der Spitzenverschiebung in Abhängigkeit der Netzfeinheit und des Polynomgrades der Parametrisierung in Bild 10 gezeigt.

sile (see Fig. 12) and the tensile bending tests (see Fig. 13) could be simulated. In total, there are three possible forms of failure, which were also confirmed by the FEM analysis. On the one hand, a shear failure of the tooth flanks or a tensile failure of the tooth necks can occur. On the other hand, an edge failure can occur, especially in the case of panel joint types with narrow edge pieces. The latter failure can be counteracted by a transverse strain restraint.

In the following, the test results (see Fig. 14 left) from the SPP project of Budelmann/Kloft for

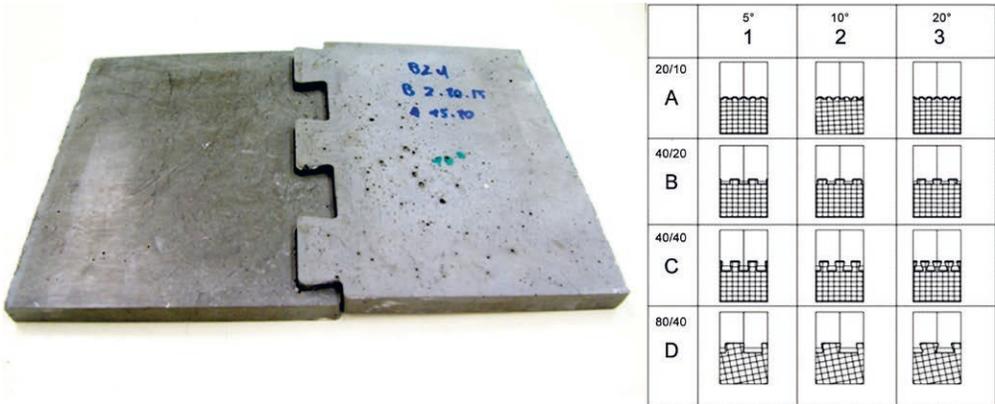


Bild 11: Trockenstoßverbindung aus UHPFRC (links) und Matrix der verschiedenen Plattenstoßtypen, die sich in den Abmessungen der Zähne und dem Flankenwinkel unterscheiden (rechts) | **Fig. 11:** Dry jointing system with UHPFRC (left) and matrix of different types of shell joints, characterized by tooth dimensions and angles (right) from Fig. 8

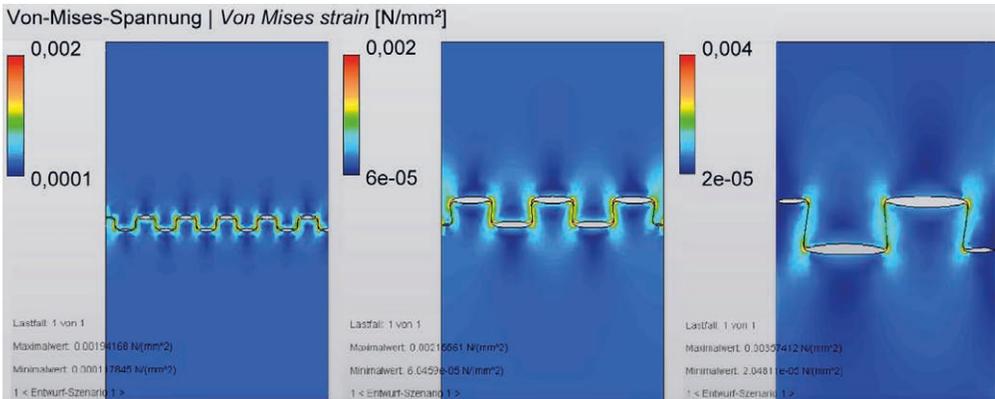


Bild 12: Spannungsverlauf bei Zugversuchen mit Querdehnungsbehinderung der Varianten A2, B2 und D2 (von links nach rechts, vgl. Bild 11); D2 zeigt eine deutlich ungleichmäßigere Verteilung der Spannung als die anderen beiden Verbindungen | **Fig. 12:** Stress distribution of tension test with restrained lateral strain of variants A2, B2 and D2 (from left to right, compare Fig. 11); D2 shows a more nonuniform distribution of stresses than the other two types of joints

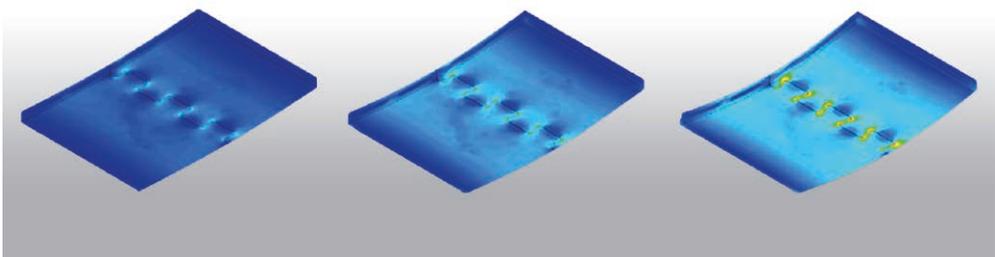


Bild 13: Spannungsverteilung zu drei verschiedenen Zeitpunkten während der Simulation eines Biegezugversuches mit dem Plattentyp B2 aus Bild 11 | **Fig. 13:** Stress distribution of three different time steps during the simulation of a bending tension test of type B2 acc. to Fig. 11

3.3.4 Ermittlung der Federsteifigkeiten

Wie bereits zuvor erwähnt, können die Federsteifigkeiten der verschiedenen Verbindungstypen über Experimente oder numerische Simulation bestimmt werden. Die Verbindungstypen (s. Bild 11) wurden im SPP-Projekt von Prof. Harald Budelmann und Prof. Harald Kloft (S. 50 ff.) entwickelt und experimentell getestet.

Für die numerische Simulation wurde exemplarisch die in Bild 11 dargestellte Verbindung mit 3D-Elementen in *Autodesk Simulation Mechanical 2017* [10] modelliert, s. a. [11]. Es konnten alle im Versuch auftretenden Versagensmechanismen für Zug- (s. Bild 12) und Biegezugversuche (s. Bild 13) nachempfunden werden. Insgesamt gibt es drei mögliche Versagensformen, die auch bei der FEM-Analyse bestätigt wurden. Zum einen kann ein Schubversagen der Zahnflanken oder ein Zugversagen der Zahnhäuse eintreten. Zum anderen kann besonders bei Plattenstoßtypen mit schmalen Randstücken ein Randbruch stattfinden. Durch eine Querdehnungsbehinderung kann letzterem Versagen entgegengewirkt werden.

Im Folgenden wurden die Versuchsergebnisse (s. Bild 14 links) aus dem SPP-Projekt von Budelmann/Kloft zur Ermittlung der Federsteifigkeiten im Kraft-Verschiebungs-Diagramm linear angenähert (s. Bild 14 rechts). Da in diesem Projekt nur elastische, nicht plastische oder spröde Materialgesetze verwendet wurden, ist für uns nur die Steifigkeit im nicht gerissenen Bereich von Bedeutung.

determining the spring stiffnesses were linearly approximated in the force-displacement diagram (see Fig. 14 right). Since only elastic and no plastic or brittle material laws were used in this project, only the stiffness in the non-cracked area is of importance for us.

Using the principle of virtual work, the rotational spring stiffness k_{ϕ} can be determined with the system described in Fig. 15. This results in

$$k_{\phi} = (F \cdot l^2) / (4 \cdot w)$$

The tension spring stiffness is determined analogously.

3.4 Embedded beams and curve-like modifications of the shell

Embedded curves are used to model curve-like properties in a surface structure. In a master's thesis [12] supervised by the Chair of Structural Analysis of the TUM, cables (stiffeners) integrated in membranes were successfully used for form finding. In the context of lightweight construction with concrete, this element can also be used for prestressing with bond. Stiffeners by beams were developed in [13] and can be used e.g. for the computation of beams, edge stiffeners or possible thickening, as required for some joining techniques. For joints, a negative stiffness can be used and thus the surface can be weakened on a curve-like area. In general, these embedded lines can be used for curve-like modifications of the shell with a respective element formulation.

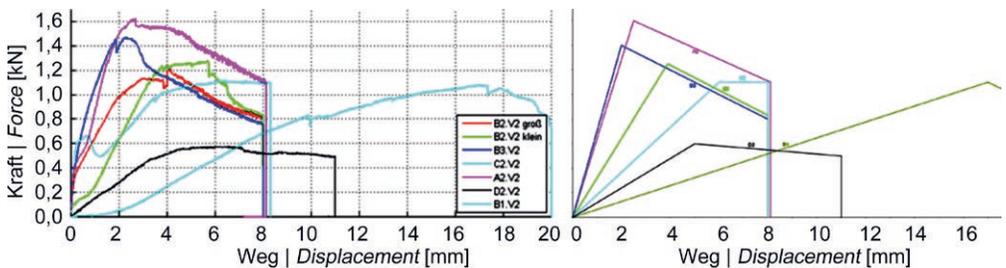


Bild 14: Kraft-Weg-Diagramm des 4-Punkt-Biegezugversuches der Platten A2, B1, B2, B3, C2 und D2 aus Bild 11 (links) und linear approximierte Verläufe der Graphen (rechts) | Fig. 14: Force-displacement plots of the 4-point bending tension test of the plate types A2, B1, B2, B3, C2 and D2 acc. to Fig. 11 and linear approximation of the plots (right)

1D-Fugemodell | 1D joint model

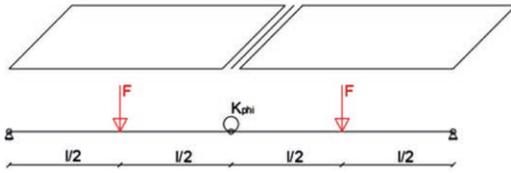
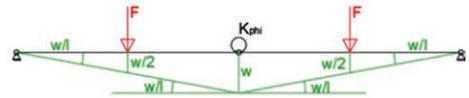


Bild 15: Darstellung des zweidimensionalen Systems mit einwirkenden Kräften, Verschiebungsfigur und Momentenverlauf | Fig. 15: Two-dimensional system with acting forces, displacements and bending moments

Verschiebung | Displacement



Moment | Moment



Über das Prinzip der virtuellen Arbeit kann die Rotationsfedersteifigkeit k_{ϕ} mit dem in Bild 15 beschriebenen System bestimmt werden. Sie ergibt sich zu

$$k_{\phi} = (F \cdot l^2) / (4 \cdot w)$$

Die Ermittlung der Zugfedersteifigkeit erfolgt analog.

3.4 Eingebettete Balken und linienförmige Modifikationen der Schale

Die eingebetteten Linien dienen zur Modellierung linienförmiger Eigenschaften in einem Flächentragwerk. In einer am Lehrstuhl für Statik der TUM betreuten Masterarbeit [12] wurden in Membranen integrierte Seile (Versteifung) für die Formfindung erfolgreich verwendet. Im Kontext Leichtbauten mit Beton lässt sich dieses Element auch für Vorspannungsseile mit festem Verbund einsetzen. Versteifungen durch Balken wurden in [13] entwickelt und können z. B. für die Berechnung von Unterzügen, Randversteifungen oder eventuellen Aufdickungen, wie bei einigen Fügeverfahren notwendig, verwendet werden. Für Fugen kann eine negative Steifigkeit eingesetzt und somit die Fläche linienförmig geschwächt werden. Generell können diese eingebetteten Linien mit der entsprechenden Elementformulierung zur linienförmigen Modifikationen der Schale verwendet werden.

Hierzu wird zunächst die Kurve im Parameterraum der Fläche definiert. Es wird ebenfalls eine NURBS-Kurvenbeschreibung verwendet, jedoch liegen die Kontrollpunkte \mathbf{P}_k nicht im Geometrieraum, sondern im Parameterraum. Durch eine Schachtelung der Parameterräume

For this purpose, the curve is defined in the parameter space of the surface. A NURBS curve description is used, but the control points \mathbf{P}_k are not in the geometry space but in the parameter space. Nesting the parameter spaces of curve and surface creates an implicit description of the curve \mathbf{C} in space.

$$\mathbf{C}(\theta^1) = \sum_i \sum_j R_{ij,pq} (\sum_k R_{k,r}(\theta^1) \cdot \mathbf{P}_k) \cdot \mathbf{P}_{ij}$$

Fig. 16 shows the NURBS surface and the corresponding parameter space in which the parameter curve is defined. A base coordinate system \mathbf{B}_i along the curve is given for corresponding element formulations.

As an example, the embedded beam formulation is briefly shown here. This is derived from the continuum. The following description results for each point of the continuum of the beam (see also Fig. 17).

$$\mathbf{X}(\theta^1, \theta^2, \theta^3) = \mathbf{X}_c(\theta^1) + \theta^2 \cdot \mathbf{B}_2 + \theta^3 \cdot \mathbf{B}_3$$

The Green-Lagrange strain can be determined as follows.

$$E_{ij} = \frac{1}{2} (g_{ij} - G_{ij})$$

with: $G_{ij} = G_i \cdot G_j$ and $G_i = \partial \mathbf{X} / \partial \theta^i$

With the energetically conjugated 2nd Piola-Kirchhoff stress measure $\mathbf{S} = E_{mod} \cdot \mathbf{E}$, the following additional term results in the principle of virtual work:

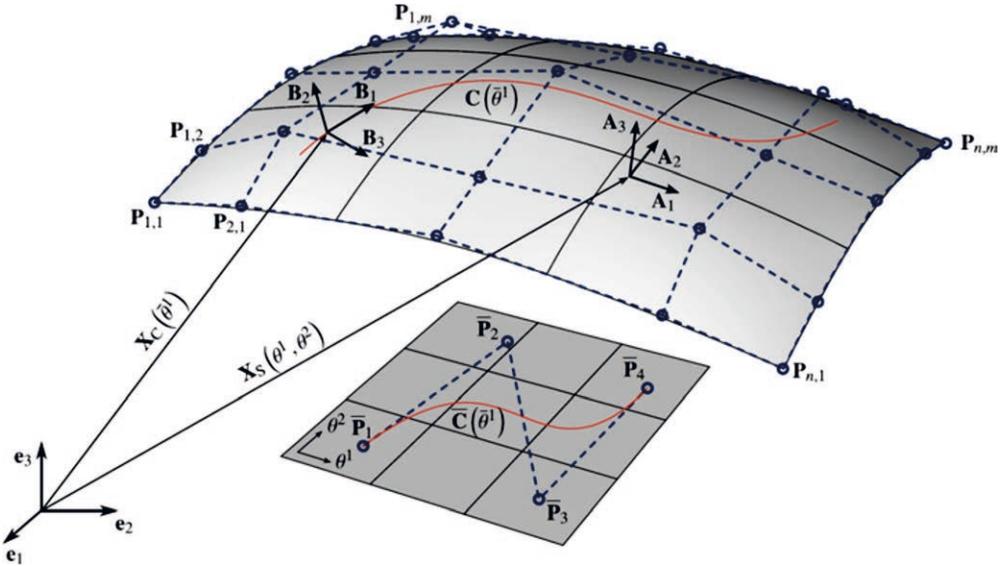


Bild 16: Fläche mit eingebetteter Kurve im Parameterraum und deren Basiskoordinatensystem **B** im Geometrieraum | **Fig. 16:** Surface with embedded curve in the parameter space and its base coordinate system **B** in the geometry space

von Kurve und Fläche entsteht eine implizite Beschreibung der Kurve **C** im Raum.

$$\mathbf{C}(\theta^1) = \sum_i \sum_j R_{ij,pq} (\sum_k R_{k,r}(\theta^1) \cdot \mathbf{P}_k) \cdot \mathbf{P}_{ij}$$

Bild 16 zeigt die NURBS-Fläche und den zugehörigen Parameterraum, in welchem die Parameterkurve definiert ist. Ein Basiskoordinatensystem **B**, entlang der Kurve ist für entsprechende Elementformulierungen gegeben.

Exemplarisch wird hier kurz die eingebettete Balkenformulierung gezeigt. Diese wird aus dem Kontinuum abgeleitet. Es ergibt sich folgende Beschreibung für jeden Punkt des Kontinuums des Balkens (s. a. Bild 17).

$$\mathbf{X}(\theta^1, \theta^2, \theta^3) = \mathbf{X}_c(\theta^1) + \theta^2 \cdot \mathbf{B}_2 + \theta^3 \cdot \mathbf{B}_3$$

Das Green-Lagrange-Verzerrungsmaß lässt sich nun wie folgt bestimmen:

$$E_{ij} = \frac{1}{2} (g_{ij} - G_{ij})$$

mit: $G_{ij} = G_i \cdot G_j$ und $G_i = \partial \mathbf{X} / \partial \theta^i$

$$\begin{aligned} \delta W^{\text{Beam}} &= \int_{\Gamma} \mathbf{S} : \delta \mathbf{E} \, d\Gamma \\ &= \int_{\Gamma} E / \|\mathbf{B}_1\|^4 \cdot (A \, \varepsilon \, \delta \varepsilon + I_{B3} \, \kappa_{21} \, \delta \kappa_{21} + I_{B2} \, \kappa_{31} \, \delta \kappa_{31}) \\ &\quad + G I_{B1} / \|\mathbf{B}_1\|^2 \cdot (0.5 \, \kappa_{23} \, \delta \kappa_{23} + 0.5 \, \kappa_{32} \, \delta \kappa_{32}) \, d\Gamma \end{aligned}$$

For the cable formulation, this term is simplified to the stiffness in tangential direction by setting the bending stiffnesses to zero:

$$\delta W^{\text{Cable}} = \int_{\Gamma} \mathbf{S} : \delta \mathbf{E} \, d\Gamma = \int_{\Gamma} E \, A / \|\mathbf{B}_1\|^4 \cdot \varepsilon \cdot \delta \varepsilon \, d\Gamma$$

Fig. 18 shows the embedded beam formulation in application. A curved embedded line (blue) is inserted in the middle of a slab under its own weight, which is simply supported on the left and right. The uppermost illustration shows the displacement of the slab without a beam. Below this, the stiffening effect of a beam with positive cross-section is shown. At the bottom, the beam inserted with negative stiffness affects the displacement shape. A kink can be perceived.

3.5 Embedded surfaces

For the simulation of less local, wider effects, embedded surfaces can be used. These are de-

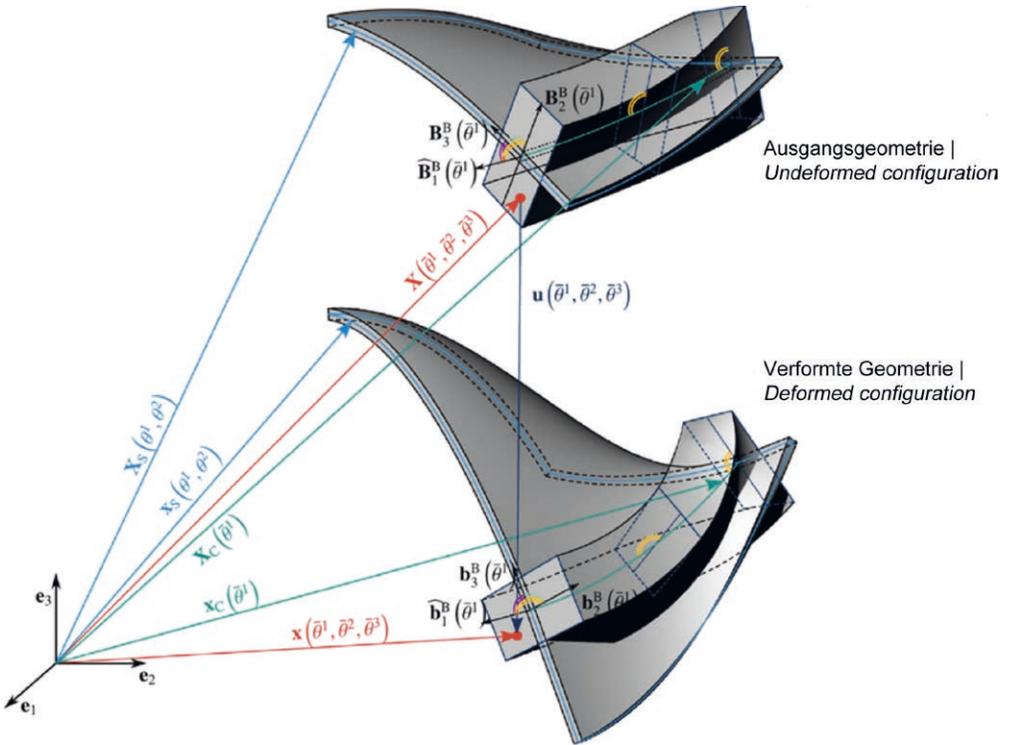


Bild 17: Eingebetteter Balken in Ausgangs- und verformter Lage mit den Basisvektoren | Fig. 17: Embedded beam in undeformed and deformed configuration with base vectors

Mit dem energetisch konjugierten 2. Piola-Kirchhoff-Spannungsmaß $\mathbf{S} = \mathbf{E}_{\text{mod}} \cdot \mathbf{E}$ ergibt sich folgender zusätzlicher Term im Prinzip der virtuellen Arbeit:

$$\begin{aligned} \delta W^{\text{Balken}} &= \int_{\Gamma} \mathbf{S} : \delta \mathbf{E} \, d\Gamma \\ &= \int_{\Gamma} E / \|\mathbf{B}_1\|^4 \cdot (\mathbf{A} \cdot \delta \boldsymbol{\varepsilon} + I_{B3} \kappa_{21} \delta \kappa_{21} + I_{B2} \kappa_{31} \delta \kappa_{31}) \\ &\quad + G I_{B1} / \|\mathbf{B}_1\|^2 \cdot (0,5 \kappa_{23} \delta \kappa_{23} + 0,5 \kappa_{32} \delta \kappa_{32}) \, d\Gamma \end{aligned}$$

Für die Seilformulierung vereinfacht sich dieser Term auf die Steifigkeit in Tangentialrichtung und die Biegesteifigkeiten können zu null gesetzt werden:

$$\delta W^{\text{Seil}} = \int_{\Gamma} \mathbf{S} : \delta \mathbf{E} \, d\Gamma = \int_{\Gamma} E A / \|\mathbf{B}_1\|^4 \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \delta \boldsymbol{\varepsilon} \, d\Gamma$$

Bild 18 zeigt die eingebettete Balkenformulierung in der Anwendung. In eine links und rechts

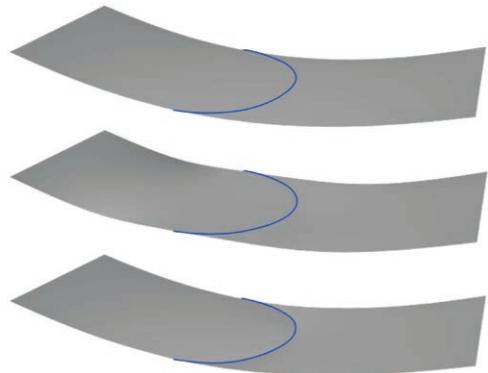


Bild 18: Anwendung des Balkens als Querschnittsverstärkung bzw. -schwächung | Fig. 18: Application of the embedded beam for a weakening of the cross section

einfach gelagerte Platte unter Eigengewicht wird mittig eine gekrümmte Kurve (blaue Linien) eingefügt. Die oberste Darstellung zeigt die Verschiebung der Platte ohne einen Balken. Darunter zeigt sich die versteifende Wirkung eines Balkens mit positivem Querschnitt. Ganz unten wirkt sich der mit negativer Steifigkeit eingebrachte Balken auf die Verschiebungsform aus. Ein Knick ist zu erkennen.

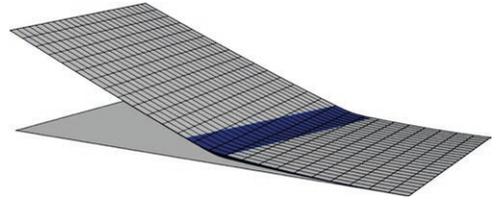


Bild 19: Anwendung eingebetteter Flächen als Querschnittsschwächung | Fig. 19: Application of the embedded areas for reduction of cross section

3.5 Eingebettete Flächen

Bei weniger lokalen, breiteren Effekten, die simuliert werden sollen, können auch eingebettete Flächen benutzt werden. Diese werden ebenfalls mit der B-Rep-Beschreibung für Trimming definiert. Zusätzlich zur Plattensteifigkeit werden dann im Bereich der Modifizierung Steifigkeitsterme ins Gleichungssystem eingebracht. In Bild 19 wird die rechts eingespannte Platte im blauen Bereich abgeschwächt. Unter einer linksseitigen Randlast ergibt sich ein nicht homogenes Verschiebungsfeld und die Platte knickt im geschwächten Bereich.

3.6 Evaluierung der vorhandenen Methoden zur Optimierung der Fugen

Das Projekt „Zuschnittsoptimierung von räumlichen gekrümmten Betonfertigteilen unter Beachtung von Material und Tragwerksaspekten mit numerischen Methoden der Topologieoptimierung“ sollte die Fugenoptimierung mit Verfahren der Topologieoptimierung (SIMP – *solid isotropic material with penalization* [14]) gemacht werden. Dieser Ansatz wurde anfänglich auch verfolgt und erste Erfahrungen wurden damit gemacht.

Allerdings stellte sich heraus, dass sich mit diesem Verfahren wichtige praxisrelevante Aspekte nur mit großem Aufwand realisieren lassen. Deshalb wurde im Projekt bereits sehr früh nach Alternativen gesucht. Nachfolgend werden der Ansatz aus dem Antrag und der verfolgte Ansatz mit IBRA kurz erklärt und anschließend verglichen.

finied with the B-Rep description for trimming. In addition to the plate stiffness, stiffness terms are then introduced into the equation system in the modified area. In Fig. 19, the plate clamped on the right is weakened in the blue area. Under a left-sided edge load, a non-homogeneous displacement field results and the plate bends more in the weakened area.

3.6 Evaluation of existing methods for the joint optimization

The project “Cutting pattern optimization of spatially curved precast concrete parts under consideration of material and structural aspects with numerical methods of topology optimization” should have investigated the joint optimization with methods of topology optimization (SIMP – *solid isotropic material with penalization* [14]). This approach was initially followed and first experiences were made with it.

However, it turned out that important practical aspects can only be realized with great effort using this method. Therefore, alternatives were sought very early on in the project. In the following, the approach from the proposal and the approach pursued with IBRA are briefly explained and then compared.

3.6.1 Joint optimization with the “inverse” SIMP approach (invSIMP)

With the “inverse” SIMP method, the joints are interpreted as areas with structural weakening. Based on a finite element discretization of the entire shell, structural weaknesses are formulated as local element properties. The classical

3.6.1 Fugenoptimierung mit der „inversen“ SIMP-Methode (invSIMP)

Bei der „inversen“ SIMP-Methode werden die Fugen als Bereiche mit Tragwerksschwächung interpretiert. Ausgehend von einer Finite-Elemente-Diskretisierung der gesamten Schale werden Tragwerksschwächungen als lokale Elementeneigenschaften formuliert. Dabei werden die klassische Vorgehensweise von SIMP übernommen und die Materialdichte als Variable verwendet. Alternativ können Komponenten der konstitutiven Materialmatrix oder auch die Querschnittsdicke verwendet werden. Im Gegensatz zur klassischen Topologieoptimierung wird nicht Material mit dem Ziel akkumuliert, ein Stabwerk zu entwickeln, sondern es wird Material geschwächt mit dem Ziel, das Fugennetz zu finden. Aufgrund der Analogie können bekannte Eigenschaften und Techniken der SIMP-Methode übernommen werden.

Bild 20 zeigt beispielhaft eine SIMP-Stabwerksoptimierung, angewandt auf eine Schale. Die Abbildung zeigt die unverformte Schalengeometrie (oben) und vier Optimierungsschritte. Letztere zeigen zum einen die Materialverteilung und die entsprechend (überhöhte) Verschiebung unter Eigenlast. Dabei wird Material akkumuliert, damit sich eine möglichst steife Struktur ergibt. Im Bild ist gut zu erkennen, dass sich das Material vor allem in den Randzonen (schwarzer Bereich) ansammelt. Man erkennt auch das Problem der Methode, dass sich im Inneren kein klares Schwarz-Weiß-Muster trotz der Anwendung von Filtern ergibt. Der Grund ist die typische Eigenschaft von Schalen, wegen der doppelten Krümmung ein und dieselbe Belastung auf alternativen Lastpfaden abtragen zu können. Die inverse SIMP-Methode liefert grundsätzlich als Ergebnis auch ein Schwarz-Weiß-Feld (mit denselben Problemen im Inneren), in dem die Fugentopologie erkennbar sein würde. Diese muss dann interpretiert und in ein genau definiertes Schnittmuster (Fugen) überführt werden.

Mit der inversen SIMP-Fugenoptimierung können wichtige praxisrelevante Aspekte, wie un-

approach of SIMP is adopted and the material density is used as a variable. Alternatively, components of the constitutive material matrix or the cross-section thickness can be used. In contrast to the classical topology optimization, material is not accumulated with the aim of developing a framework, but material is weakened with the aim of finding the joint network. Due to the analogy, known properties and techniques of the SIMP method can be adopted.

Fig. 20 shows an example of a SIMP framework optimization applied to a shell. The figure shows the undeformed shell geometry (top) and four optimization steps with the material distribution and the corresponding (scaled) displacement under dead load. Material is accumulated in order to obtain a structure that is as stiff as possible. It is apparent that the material accumulates mainly in the edge zones (black areas). One can also see the problem of the method; No clear black and white pattern is produced inside the shell despite the application of filters. The reason is the typical characteristic of shells

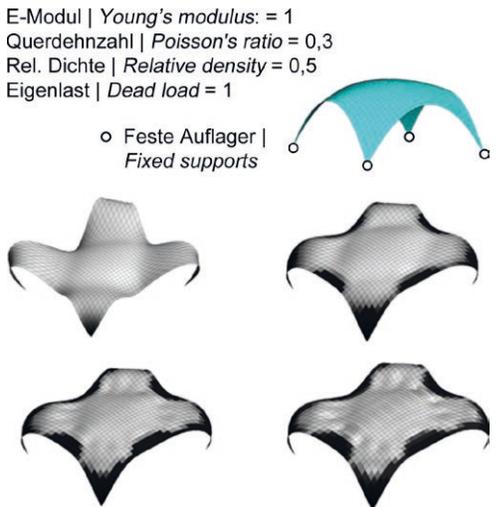


Bild 20: Stabwerksoptimierung mit der SIMP-Methode, angewandt auf eine Schale – dargestellt sind die unverformte Geometrie (oben) und vier Optimierungsschritte, welche die Materialverteilung und die entsprechende verformte Geometrie unter Eigenlast zeigen | **Fig. 20:** Optimization of a truss framework with SIMP approach applied to a shell – undeformed geometry (top) and four optimization steps, which show the material distribution and the deformed geometry under dead load

terschiedliche Fugenausbildungen [15] und zusätzliche Aussteifungen (Rippen), nicht berücksichtigt werden. Vor allem aber hat sich gezeigt, dass eine Topologieoptimierung des Fugenmusters von Schalen mit mechanischen Kriterien sehr problematisch ist. Infolge ihrer doppelten Krümmung können Schalen jede Belastung nahezu beliebig umlagern, weshalb die Optimierung keine eindeutigen oder brauchbaren Ergebnisse liefert.

3.6.2 Optimierung der Fugen mit IBRA

Neben den oben genannten Vorteilen von IBRA bezüglich der Integration von Entwurf und Berechnung besitzt IBRA sehr großes Potential für die Fugenoptimierung, da die Fugentopologie bereits klar vorgegeben ist bzw. direkt behandelt werden kann. Im Projekt wurde eine Fugenoptimierungstechnik entwickelt, die es erlaubt, das Fugenmuster eines Schalenmodelles derart anzupassen, dass die Schnittgrößen in den Fugen minimal werden. Dafür muss die Topologie des Fugenmusters allerdings festgelegt werden, indem die Schale, dargestellt durch eine NURBS-Fläche, grob in Segmente zerlegt wird. Die Zerlegung lässt sich mit Standard-CAD-Operationen (splitten bzw. trimmen) durchführen. In Bild 6 ist beispielsweise die NURBS-Fläche aus Bild 5 als segmentierte Fläche dargestellt. Dabei sind die Segmente mit getrimmten Flächen beschrieben und über die Randbeschreibung (B-Rep) bzw. Trimmkurven im Parameterraum definiert (Bild 6, rechts).

Mit IBRA lassen sich nun diese Segmente unabhängig und gemeinsam berechnen. Für die gemeinsame Berechnung, müssen die einzelnen Segmente entweder stark oder schwach gekoppelt werden.

Mit der bereits entwickelten Fugenoptimierung lässt sich die Randbeschreibung der Segmente bzw. das Fugenmuster entsprechend den Optimierungszielen modifizieren. Als Optimierungsziel kann beispielsweise die Minimierung einer maximalen Schnittgröße (Kraft oder Moment) in der Fuge oder die Minimierung des Integrals einer Schnittgröße entlang der Fuge verwendet

to be able to carry the same load on alternative load paths due to the double curvature. In principle, the “inverse” SIMP method also yields a black and white field (with the same problems inside) as a result in which the joint topology would be identifiable. This must then be interpreted and converted into a precisely defined cutting pattern (joints).

With the “inverse” SIMP joint optimization, important practical aspects such as different joint designs [15] and additional stiffeners (ribs) cannot be taken into account. In particular, it has been shown that topology optimization of the joint pattern on shells with mechanical criteria is very problematic. Due to their double curvature, shells can transfer any load almost arbitrarily, which is why the optimization does not provide clear or useful results.

3.6.2 Joint optimization with IBRA

In addition to the above-mentioned advantages of IBRA with regard to the integration of design and calculation, IBRA has great potential for joint optimization, since the joint topology is already clearly defined or can be dealt with directly. In the project, a joint optimization technique was developed that allows to adjust the joint pattern of a shell model in such a way that the internal forces in the joints are minimized. For this, however, the topology of the joint pattern must be defined by roughly dividing the shell, represented by a NURBS surface, into segments. The decomposition can be performed using standard CAD operations (split or trim). In Fig. 6, for example, the NURBS surface from Fig. 5 is shown as a segmented surface. The segments are described with trimmed surfaces and defined via the boundary description (B-Rep) or trim curves in the parameter space (Fig. 6, right).

With IBRA, these segments can now be calculated independently or together. For the joint calculation, the individual segments must be either strongly or weakly coupled.

With the already developed joint optimization, the edge description of the segments or the

werden. Für die Minimierung der maximalen Schnittgröße kann die Kreiselmeyer-Steinhauser-Funktion verwendet werden [16].

Die Fugenoptimierung mit IBRA bringt entscheidende Vorteile:

- Optimierung auf der exakten CAD-Geometrie,
- Resultat der Fugenoptimierung ist bereits ein CAD-Modell, welches für die Herstellung weiter verwendet werden kann (keine Erfassung der Segmente nötig),
- Bestmögliche Bestimmung der Schnittgrößen entlang der Fugen aufgrund der gewählten NURBS-Ansatzfunktionen.

In Bild 21 sind die Optimierungsvariablen für die vorgeschlagene Fugenoptimierung gezeigt. Für die Optimierung werden die Sensitivitäten von den Kontrollpunkten der Randkurven über einen globalen Finite-Differenz-Ansatz bestimmt. Aufgrund der geringen Anzahl an Optimierungsvariablen hält sich der Rechenaufwand in Grenzen, zumal sich durch die Verschiebung der inneren Randkurven das Tragverhalten der Schale nicht ändert. Das bedeutet, in diesem Fall kann die Fugenoptimierung im Postprocessing durchgeführt werden.

Ein Verifikationsbeispiel für eine Fugenoptimierung mit IBRA ist in Bild 22 und Bild 23 dar-

joint pattern can be modified according to the optimization goals. For example, the minimization of a maximum internal force or moment in the joint or the minimization of the integral of an internal force along the joint can be used as an optimization goal. The Kreiselmeyer-Steinhauser function can be used to minimize the maximum internal force [16].

The joint optimization with IBRA brings significant advantages:

- optimization on the exact CAD geometry,
- the result of the joint optimization is already a CAD model, which can be used for the production (no detection of the segments necessary),
- best possible determination of internal forces along the joints based on the selected NURBS approach functions.

Fig. 21 shows the optimization variables for the proposed joint optimization. The sensitivities are determined from the control points of the boundary curves for the optimization using a global finite difference approach. Due to the small number of optimization variables, the computational effort is within limits, especially since the displacement of the inner boundary curves does not change the load bearing behaviour of the shell. This means that in this

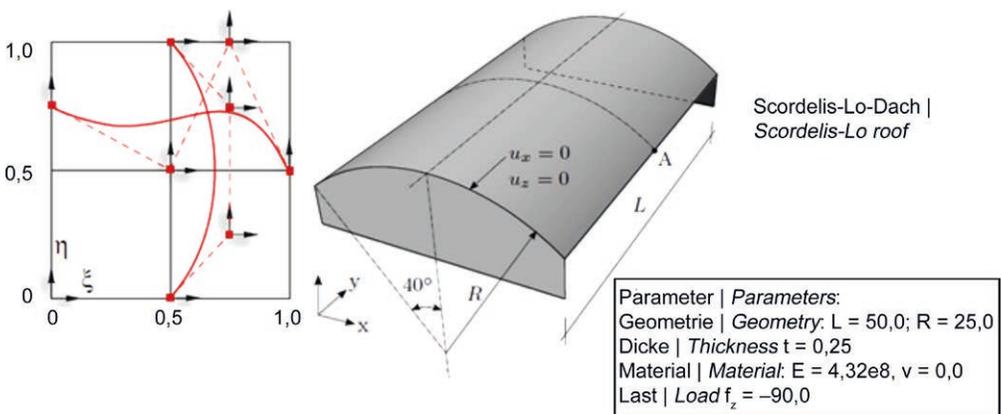


Bild 21: Optimierungsvariablen (Pfeile) für die Fugenoptimierung mit IBRA (links) und Problembeschreibung für das Scordelis-Lo-Dach (rechts) | Fig. 21: Optimization variables (arrows) of the joint optimization with IBRA (left) and problem set-up of the Scordelis-Lo roof (right)

gestellt. Damit kann gezeigt werden, dass die Fugenoptimierung die bekannte Lösung finden kann. Die Abbildung rechts zeigt das Scordelis-Lo Roof [17], ein berühmtes Schalenbenchmarkbeispiel. An diesem Beispiel wird nun eine Fugenoptimierung durchgeführt, wobei die maximale Schnittgröße m_{12} entlang einer Fuge minimiert werden soll.

Die grobe Zerlegung der Schale in zwei Segmente ist in Bild 22 gezeigt. Die Anfangsschätzung der Fuge kann mit der Standard-CAD-Operation „split“ bzw. „trimmen“ durchgeführt werden, um die entsprechenden Randbeschreibungen der Segmente im Parameterraum (s. a. Bild 6) zu erhalten.

Für die Fugenoptimierung wird nun die Lage der Fuge so modifiziert, dass die maximale Schnittgröße m_{12} in der Fuge minimiert wird. Natürlich kann auch jede andere Schnittgröße oder eine Kombination aus Schnittgrößen für die Optimierung verwendet werden. Die einzelnen Optimierungsschritte für dieses Beispiel sind in Bild 23 gezeigt. Die optimale Lösung ist die Positionierung der Fuge in der Mitte, parallel zu den langen Kanten, da in diesem Fall die maximale Schnittgröße m_{12} (Drillmoment) in der Fuge zu Null wird (Optimierungsschritt 20).

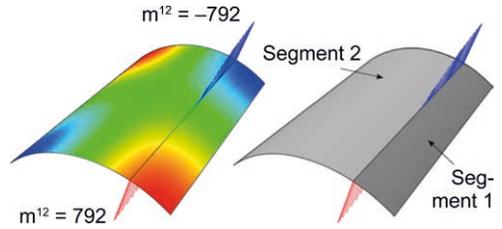


Bild 22: Grobe Zerlegung der Schale aus Bild 21 mit dem Verlauf des Drillmomentes m_{12} entlang der Fuge | Fig. 22: Coarse segmentation of the shell of Fig. 21 with bending moment m_{12} along the joint

case the joint optimization can be carried out in post-processing.

A verification example of a joint optimization with IBRA is shown in Fig. 21 using the famous shell benchmark example of the Scordelis-Lo Roof [17]. It can be shown that joint optimization can find the known solution. A joint optimization is now performed on this example, where the maximum internal moment m_{12} along a joint is minimized.

The coarse division of the shell into two segments is shown in Fig. 22. The initial estimation of the joint can be carried out using the standard CAD operation “split” or “trim” to obtain the corresponding edge descriptions of the seg-

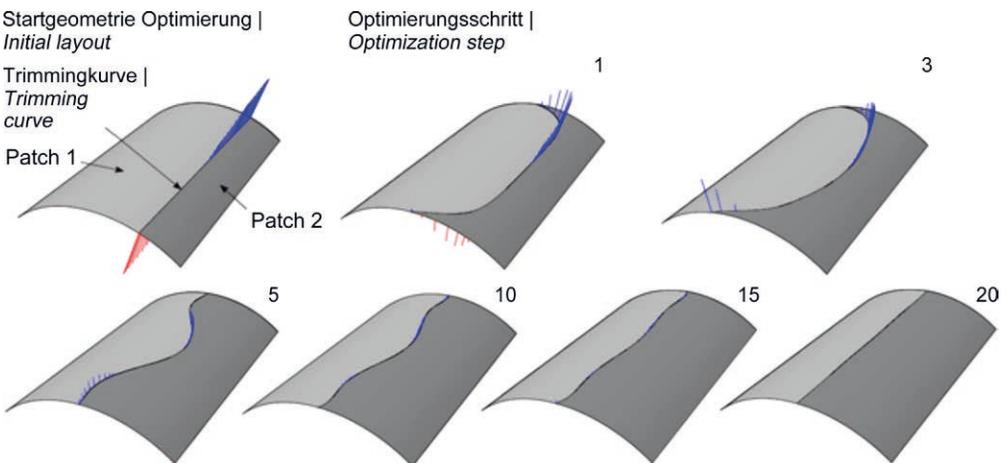


Bild 23: Verifikationsbeispiel: einzelne Optimierungsschritte für die Fugenoptimierung des Scordelis-Lo Roof aus Bild 21 | Fig. 23: Benchmark example: several optimization steps of the joint optimization of the Scordelis-Lo roof (Fig. 21)

Arbeitspunkte Key aspects in the joint optimization	invSIMP	IBRA
Erfassung der Segmentgeometrie Detection of the geometry of the segments	aufwändig complex	bereits enthalten inherent
Berücksichtigung des Gesamttragverhaltens (inkl. Fugenmodellierung) Consideration of the load bearing behaviour (including joint modelling)	kaum möglich hardly possible	möglich possible
Bestimmung von geometrischen Parametern (Krümmung) Determination of geometrical parameters (curvature)	aufwändig complex	sehr einfach very simple
Berücksichtigung von Nebenbedingungen Consideration of constraints	gleich similar	gleich similar
Mehrkriterienoptimierung Multi-objective optimization	gleich similar	gleich similar
Bestimmung der Schnittgrößen entlang der Fugen Computation of the inner forces	aufwändig complex	sehr einfach very simple

Tabelle 1: Gegenüberstellung der vorgestellten Fugenoptimierungsansätze mit invSIMP und IBRA | **Table 1:** Comparison of the presented approaches for joint optimization with invSIMP and IBRA

Mit dem gezeigten Ansatz muss zwar die Topologie des Fugennetzes vorgegeben werden, allerdings ist das für praktische Anwendungen meistens sowieso gewünscht, da üblicherweise Herstellungsrestriktionen höhere Priorität haben als kleine Änderungen im Tragverhalten.

3.6.3 Vergleich der Ansätze

Nachfolgend sind die wesentlichen Unterschiede der beiden Ansätze zur Optimierung von Fugen für den Arbeitspunkt aus dem Projekt gegenübergestellt (Tabelle 1). Die Gegenüberstellung der Ansätze zeigt, dass sich durch die Verwendung der neu entwickelten IBRA-Methode wesentliche Vorteile ergeben.

3.7 Einbettung in den Gesamtprozess

Aufgrund der geforderten Kriterien für die Fugenerstellung (Schnittkräfte in den Fugen müssen bekannt sein) wurde im Projekt festgestellt, dass eine isolierte Betrachtung der Fugenoptimierung nicht zielführend ist. Die Fugenoptimierung ist nämlich sehr stark von der Schalenform, der Füge-technik und dem verwendeten Material abhängig. Deswegen wurde ein durchgängiges Konzept vom Entwurf bis zur Bereitstellung der Schalungsgeometrie für die Betonfertigteile erarbeitet. Dieses Konzept basiert auf der isogeometrischen B-Rep Analyse und profitiert deshalb von allen Vorteilen, die IBRA mit sich bringt. Dieses Konzept wurde in einem Beitrag der Zeitschrift „Beton- und Stahlbetonbau“ ausführlich erklärt [18].

ments in the parameter space (see also Fig. 6). For joint optimization, the position of the joint is now modified such that the maximum internal moment m_{12} in the joint is minimized. Of course, any other internal force or a combination of internal forces can be used for the optimization. The individual optimization steps for this example are shown in Fig. 23. A joint in the middle, which is parallel to the long edges, is the optimal solution, because in this case the maximum internal moment m_{12} (twisting moment) in the joint becomes zero (optimization step 20).

With the presented approach, the topology of the joint network must be specified, but for practical applications, this is usually desired anyway since manufacturing restrictions usually have higher priority than small changes in load-bearing behaviour.

3.6.3 Comparison of the approaches

In the following, the main aspects of the two approaches for optimizing joints are compared and evaluated (Table 1). The comparison of the approaches shows that the use of the newly developed IBRA method offers significant advantages.

3.7 Integration in the design process

Due to the required criteria for the production of joints (inner forces in the joints must be known), it was determined in the project that an

Der Gesamtprozess setzt sich aus folgenden Schritten zusammen:

- Entwurf der Schale mit mechanischen Formfindungsmethoden (IBRA),
- Berechnung (IBRA),
- Bemessung,
- Fugenoptimierung (IBRA),
- Fugenausbildung.

Nachfolgend werden diese Punkte kurz erläutert.

3.7.1 Formfindung

Die Formfindung bzw. der Entwurf von Betonschalen spielt im Gesamtprozess eine entscheidende Rolle. Im Bereich Formfindung und Formoptimierung hat der Lehrstuhl für Statik der TUM jahrelange Erfahrung [19]–[28]. Nachfolgend sind die drei wichtigsten Aspekte für die Formfindung gelistet:

- Ästhetik,
- Herstellbarkeit,
- Begrenzung der Schnittgrößen.

Die ersten zwei Punkte sind selbsterklärend. Der dritte Punkt ist wichtig, um effiziente und wirtschaftliche Lösungen bereitstellen zu können. Ungünstig geformte Schalen führen nämlich zu ungünstigen Schnittgrößenverläufen (große Momente, Zug und Schubkräfte), was zu großen Schalendicken in Bereichen der Ränder und Fugen [15] führt. Dick ausgebildete Randträger lassen die Schalenträgerwerke dann unnötig schwer aussehen, was ungewünscht ist.

In Bild 24 ist ein Beispiel für eine IBRA-Formfindung gezeigt, welches ein Hängemodell nachempfunden. Dabei handelt es sich um eine geometrisch nichtlineare Berechnung eines vorgespannten, isogeometrischen Membranelementes, welches im Rahmen einer Master's Thesis [12] entwickelt wurde. Für die schwach formulierten Auflager wurden die Ansätze aus [29] übernommen, welche ebenfalls am Lehrstuhl entwickelt wurden und im Rahmen des Projektes auf die Randkurven der getrimmten Flächen übertragen wurden.

isolated consideration of joint optimization is not appropriate. The joint optimization is very much dependent on the shell shape, the joining technique and the used material. For this reason, a consistent concept, which includes the design, the provision of the formwork geometry for the precast concrete elements and the steps between, was developed. This concept is based on the isogeometric B-Rep analysis and therefore benefits from all the advantages that IBRA offers. This concept was explained in detail in an article in the journal "Beton- und Stahlbetonbau" [18].

The overall process consists of the following steps:

- design of the shell with mechanical formfinding methods (IBRA),
- structural analysis (IBRA),
- dimensioning,
- joint optimization (IBRA),
- joint dimensioning.

These points are briefly explained below.

3.7.1 Form finding

The form finding, i.e. the design, of concrete shells plays a crucial role in the overall process. The Chair of Structural Analysis of the TUM has many years of experience in the field of form finding and shape optimization [19]–[28]. In the following, the three most important aspects for form finding are listed:

- aesthetics,
- manufacturability,
- limiting the internal forces.

The first two points are self-explanatory. The third point is important for providing efficient and economical solutions. Unfavourably shaped shells lead to unfavourable internal forces (large moments, normal and shear forces), which results in large shell thicknesses in the area of edges and joints [15]. Thick edge beams make the shell structure look unnecessarily heavy, which is undesirable.

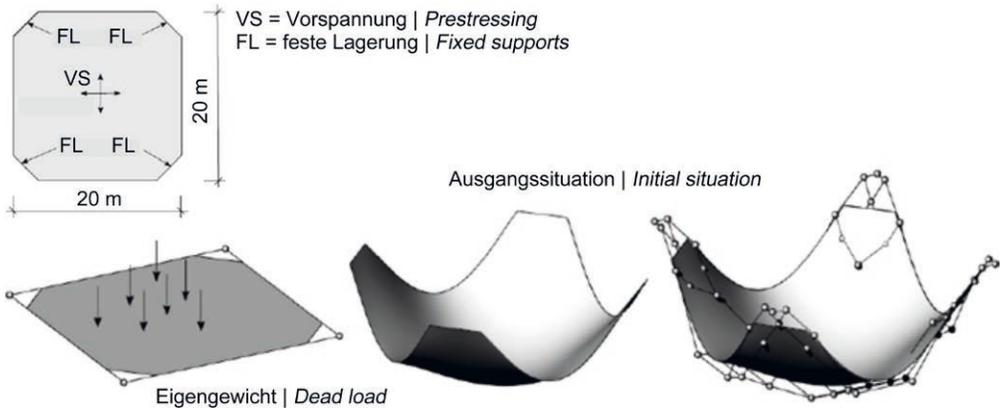


Bild 24: Numerisches Hängemodell: mechanische Formfindung mit IBRA | Fig. 24: Numeric hanging model: mechanical form finding with IBRA

3.7.2 Berechnung

Nach der Formfindung ist der nächste Schritt, die Schale zu berechnen, um die Schnittgrößen im Tragwerk zu bestimmen. Diese werden für die Bemessung der Struktur benötigt. Für die Berechnung kann wiederum die IBRA Methode verwendet werden.

In Bild 25 ist die Schale für die formgefundene Form aus Bild 24 gezeigt. Das Bild zeigt die jeweilige Diskretisierung für IBRA und die klassische Finite-Elemente-Analyse (FEA). Für IBRA kann die exakte Geometrie verwendet werden. Für die klassische FEA muss hingegen ein Finite-Elemente-Netz erstellt werden, welches die ursprüngliche Geometrie in den meisten Fällen lediglich approximiert. In Bild 25 ist zudem eine Konvergenzstudie für die Schale unter Eigenlast für den Punkt in der Mitte gezeigt. Die Graphen zeigen die guten Eigenschaften der NURBS-Funktionen für Schalenberechnungen. Berechnung, Bemessung und Fugenoptimierung sind sehr eng verknüpft und müssen in der Regel iterativ gelöst werden.

3.7.3 Bemessung

In der Bemessung wird die Mindestdickenverteilung aufgrund des gewählten Materiales bestimmt. Das geschieht auf Basis der im Schritt „Berechnung“ ermittelten Schnittgrößen. Dafür werden über die Schale eine beliebige Anzahl

Fig. 24 shows an example of an IBRA form finding, which is based on a hanging model. This is a geometrically non-linear analysis of a prestressed isogeometric membrane element, which was developed in the context of a master’s thesis [12] at the Chair of Structural Analysis of the TUM. For the weakly formulated supports, the approaches from [29] were used, which were also developed at the Chair and transferred to the boundary curves of the trimmed surfaces within the framework of the project.

3.7.2 Structural analysis

After the form finding of the shell, the next step is to compute the internal forces of the structure. These are required for the design of the structure. The IBRA method can also be used for the structural analysis.

Fig. 25 shows the resulting shell of the form found geometry in Fig. 24. The figure shows the respective discretization for IBRA and the classic Finite Element Analysis (FEA). For IBRA, the exact geometry can be used. For classical FEA, however, a finite element mesh must be created, which in most cases only approximates the original geometry. Fig. 25 also shows a convergence study for the shell under dead load for the point in the middle. The graphs prove the good properties of the NURBS functions for shell calculations. Struc-

Stahlfaserbeton | *Steel fibre concrete:*
 Druck | *Compression:* C25/30
 Zug | *Tension:* L1 = 2,1; L2 = 1,8
 Dicke | *Thickness* $t = 0,2$
 Material | *Material:* $E = 31.000 \text{ MPa}$, $\nu = 0,2$

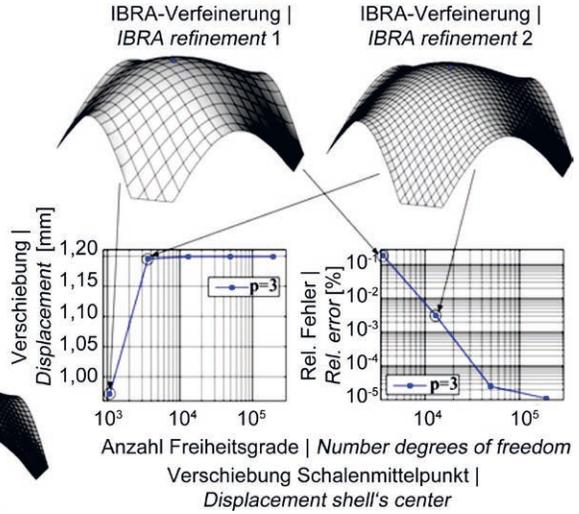
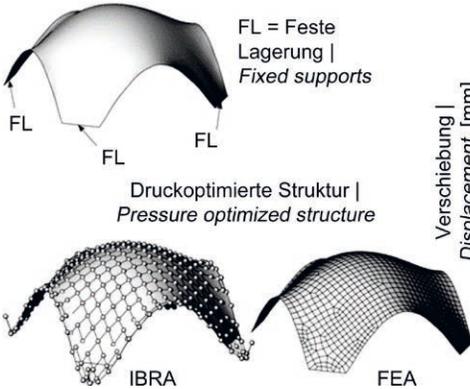


Bild 25: Berechnung einer Schale: Vergleich der Diskretisierungen für IBRA und die klassische FEA (links) und eine Konvergenzstudie für unterschiedliche Verfeinerungen mit IBRA unter Eigenlast | Fig. 25: Structural analysis of a shell; comparison of different discretizations of IBRA and classical FEA (left) and convergence study of different discretizations of IBRA under dead load (right)

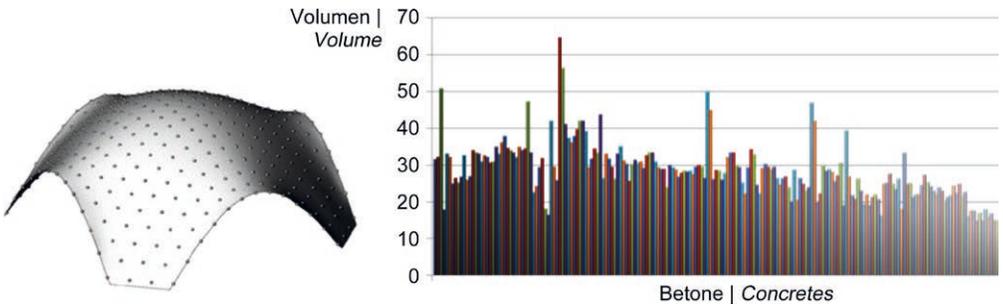


Bild 26: Auswertungspunkte auf der Schale (links) und benötigtes Volumen für die Schale aus Bild 25 für unterschiedliche Betonmischungen (rechts) | Fig. 26: Evaluations points of a shell (left) and necessary volume of the shell of Fig. 25 for different concrete types (right)

von Auswertungspunkten definiert (s. Bild 26), an denen eine Bemessung durchgeführt wird, um eine erforderliche Mindestdickenverteilung der Schale zu bestimmen. Dafür können verschiedene Bemessungsansätze (s. bspw. [30]) verwendet werden.

Nach der Bestimmung der Mindestdicken kann mit Hilfe der ermittelten Punktdicken und eines *Least-Squares*-Ansatzes ein dreidimensionales CAD-Volumenmodell erstellt werden. Daraus kann das benötigte Volumen für die Schale für das entsprechende Material bestimmt werden. Rechts in Bild 26 sind beispielsweise die erforderlichen

Strukturanalysen, Design und Gelenkoptimierung sind sehr eng miteinander verknüpft und müssen in der Regel iterativ gelöst werden.

3.7.3 Dimensioning

Für das Design wird die Mindestdickenverteilung auf Basis der im Designprozess bestimmten inneren Kräfte bestimmt. Dies geschieht auf Basis der im Designprozess bestimmten inneren Kräfte. Für diesen Zweck wird eine beliebige Anzahl von Auswertungspunkten über die Schale definiert (siehe Bild 26), an denen ein Design durchgeführt wird, um die erforderliche Mindestdickenverteilung zu bestimmen.

derlichen Volumina für die Schale aus Bild 25 für unterschiedliche Stahlfaserbetonmischungen in einem Diagramm gezeigt. Dieses wurde während des Projekts erzeugt, um in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern (Team von Prof. Gehlen, s. S. 284 ff.) das wirtschaftlichste bzw. ökologischste Material zu bestimmen.

3.7.4 Iterative Bemessung

In einer Bachelorarbeit [31] wurde untersucht, wie sich die Bemessung (Festlegung der Dickenverteilung) auf das Tragverhalten von Schalen auswirkt. Dabei zeigte sich, dass sich durch die Anpassung der Dicke (Bemessung) teilweise komplett andere Tragmechanismen in der Schale ausbilden. Deshalb können die Schritte Berechnung, Bemessung und Fugenoptimierung nicht komplett unabhängig untersucht werden. Eine Lösung für eine sinnvolle Verschmelzung (iterativer Prozess) dieser Schritte war sehr wichtig, um die Wirtschaftlichkeit und Standsicherheit der untersuchten Schalen zu gewährleisten.

3.7.5 Materialoptimierung

Für die Verstärkung lokaler Schwächungen bzw. stark belasteter Zonen (Randbereiche) in der Schale sollen lokale Anpassungen der Materialeigenschaften mit gezielter Gradierung in den Segmenten gemacht werden. Für das Projekt wird die Optimierung der Dicke und Gradierung zunächst nicht gleichzeitig durchgeführt. Es wird zunächst die Minstdicke bei der Bemessung durch eine Obergrenze begrenzt und eventuell durch eine höhere Gradierung oder Zusatzbewehrung verstärkt.

3.7.6 Herstellung

Die Geometrien der Simulationsmodelle konnten aufgrund der Verwendung der CAD-üblichen NURBS-Funktionen auch direkt für die Ausführungsplanung verwendet werden. Die Fugen können im Detail geplant und die erforderlichen Aufdickungen in hoch beanspruchten Bereichen ins Modell einbezogen werden. Bild 27 zeigt einen 3D-Druck der direkt ohne Nachbe-

tribution of the shell. Different dimensioning approaches are possible (see e.g. [30]).

After determining the minimum thicknesses, a three-dimensional CAD solid model can be created using the determined point thicknesses and a least-squares approach. Based on this model, the required volume of the shell for the corresponding material can be determined. As an example, the diagram in Fig. 26 shows the required volumes for the shell from Fig. 25 for different steel fibre reinforced concretes. This was generated during the project in order to determine the most economical or ecological material in cooperation with the project partners (team of Prof. Gehlen, see page 284 et seq).

3.7.4 Iterative dimensioning

In a bachelor's thesis [31] it was investigated how the design, i.e. determination of thickness distribution, affects the load-bearing behaviour of shells. It was found that by adjusting the thickness (dimensioning), completely different load-bearing mechanisms can evolve in the shell. Therefore, the steps structural analysis, design and joint optimization cannot be evaluated completely independently. A solution for a meaningful fusion of these steps was very important in order to guarantee the cost efficiency and stability of the investigated shells.

3.7.5 Material optimization

Local adjustments of the material properties with targeted grading in the segments have to be made for the reinforcement of local weaknesses or heavily loaded zones (edge areas) in the shell. For this project, the optimization of thickness and grading was not carried out simultaneously. First, the minimum thickness is limited by an upper bound during design and the shell is reinforced by a higher grading or additional reinforcement, if necessary.

3.7.6 Manufacturing

The geometry of the analysis model could be used directly for manufacturing due to the use

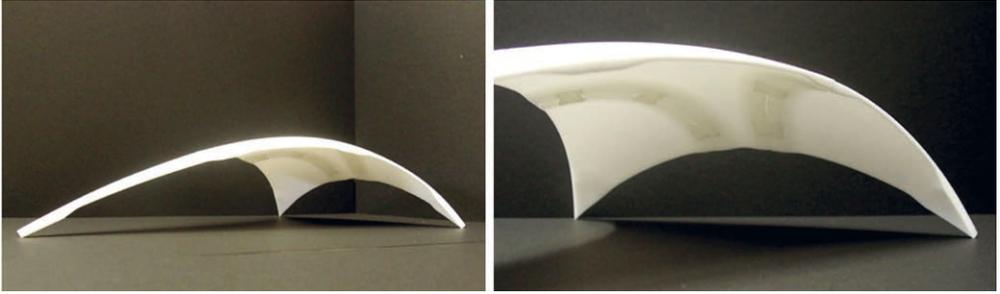


Bild 26: Gedrucktes 3D-Modell der Raststätte Deitingen Süd von Heinz Isler (Bild 4) mit Fugen und Aufdickungen | **Fig. 26:** Printed 3D-model of the highway service station Deitingen south by Heinz Isler (Fig. 4) with joints and thickening

arbeitung aus dem CAD-Rechenmodell erstellt werden konnte.

3.8 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der IBRA-Methode wurde im Projekt eine sehr vielversprechende Methode zur Planung von leichten Betonbauwerken mit hohem Vorfertigungsgrad entwickelt. In den nahtlosen, CAD-integrierten Planungsprozess können wichtige Aspekte vom Entwurf bis zu Bereitstellung der Schalungsgeometrie mit eingebracht werden [1], [16], [18].

Dies ist auch in anderen Planungsaufgaben mit flächenähnlichen oder linienförmigen Bauteilen vorteilhaft. Da die mathematische Beschreibung des Modells weder für die Geometrie noch für die Simulation verändert wird, können auch verschiedene Schritte aus Geometriebearbeitung und Analyse aufeinander folgen, wie z. B. für die Baufortschrittsmodellierung oder den Entwurfszyklus von Membrantragwerken nötig. Viele CAD-Programme bieten bereits auch parametrisierte Modellbeschreibungen mit NURBS. Die automatisierte Erstellung und Anpassung von Modellen bietet die Möglichkeit, einfach und schnell Variantenstudien zu erstellen und somit die Entwurfs Grenzen besser auszutesten. Aufbauend auf der IBRA-Methode konnte das Plugin Kiwi!3d [32] für Rhino/Grasshopper [33], [34] entwickelt werden, welches typische Fragestellungen des Bauwesens und komplexe Formfindungsaufgaben parametrisch bearbeiten kann.

of the standard NURBS functions provided by the CAD tool. The joints can be planned in detail and the required thickening in highly stressed areas can be included in the model. Fig. 27 shows a 3D print that was created directly from the CAD model without any post-processing.

3.8 Summary and outlook

The IBRA method, which was developed in this project, is a very promising method for the design of lightweight concrete structures considering a high degree of prefabrication. The seamless, CAD-integrated planning process can incorporate important aspects from design to the provision of formwork geometry [1], [16], [18].

This is also advantageous in other planning tasks with surface-like or linear components. Since the mathematical description of the model is not changed for either geometry or simulation, different steps of geometry processing and analysis can alternate. This is e.g. required for construction stage modelling or the design cycle of membrane structures. In addition, many CAD programs already offer parameterized model descriptions with NURBS. The automated creation and adaptation of models offers the possibility to create variation studies quickly and easily and thus make it possible to explore the design limits. Based on the IBRA method, the plug-in Kiwi!3d [32] for Rhino/Grasshopper [33], [34] could subsequently be developed, which is able to parametrically process typical questions of civil engineering and complex form finding tasks.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198016927 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (number 198016927) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Breitenberger, M.; Apostolatos, A.; Philipp, B.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Analysis in computer aided design: Nonlinear isogeometric B-Rep analysis of shell structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 284 (2015), S. 401–457 – DOI: 10.1016/j.cma.2014.09.033
- [2] Breitenberger, M.: CAD-integrated design and analysis of shell structures. Diss., TU München, 2016
- [3] Hughes, T. J. R.; Cottrell, J. A.; Bazilevs, Y.: Isogeometric analysis: CAD, finite elements, NURBS, exact geometry and mesh refinement. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 194 (2005), S. 4135–4195 – DOI: 10.1016/j.cma.2004.10.008
- [4] Kiendl, J.; Bletzinger, K.-U.; Linhard, J.; Wüchner, R.: Isogeometric shell analysis with Kirchhoff-Love elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 198 (2009), S. 3902–3914 – DOI: 10.1016/j.cma.2009.08.013
- [5] Cottrell, J. A.; Hughes, T. J. R.; Bazilevs, Y.: *Isogeometric analysis: Toward integration of CAD and FEA*. Chichester: Wiley, 2009
- [6] Piegl, L. A.; Tiller, W.: *The NURBS book*. 2nd Ed., Berlin · New York: Springer, 1997
- [7] Huerta, S.: Structural Design in the Work of Gaudí. *Architectural Science Review* 49 (2011) 4, S. 324–339 – DOI: 10.3763/asre.2006.4943
- [8] Isler, H.: New shapes for shells. *Bulletin of the International Association for Shell Structures* 8 (1961), S. 123–130
- [9] <https://www.ruhr-uni-bochum.de/spp2187/> (geprüft am 16.04.2020)
- [10] Homepage Autodesk: <http://www.autodesk.de>
- [11] Hechtel, M.: Modellierung und Validierung von trocken gestoßenen Betonfugen. Bachelorarbeit, TU München, 2016
- [12] D'Auria, I.: Formfindung mit isogeometrischen Elementen. Masterarbeit, TU München, 2013
- [13] Bauer, A. M.; Breitenberger, M.; Philipp, B.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Embedded structural entities in NURBS-based isogeometric analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 325 (2017), S. 198–218 – DOI: 10.1016/j.cma.2017.07.010
- [14] Bendsøe, M.; Sigmund, O.: *Topology Optimization; Theory, Methods, and Applications*. New York: Springer, 2003
- [15] Lehmborg, S.; Ledderose, L.; Wirth, F.; Budelmann H.; Kloft, H.: Von der Bauteilfügung zu leichten Tragwerken: Trocken gefügte Flächenelemente aus UHPFRC. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 12, S. 806–815 – DOI: 10.1002/best.201600053
- [16] Breitenberger, M.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Isogeometric Layout Optimization of Shell Structures using Trimmed NURBS Surfaces. In: *Proc. of World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization WCSMO-10*, 19.–24.05.2013 in Orlando (USA), 2013, 10 S. (publ. digitally)
- [17] Kiendl, J.: Isogeometric analysis and shape optimal design of shell structures. Diss., TU München, 2011
- [18] Breitenberger, M.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Entwurf und Berechnung von gekrümmten Betonfertigbauteilen mit CAD-basierten Verfahren. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), S. 783–791 – DOI: 10.1002/best.201390089
- [19] Bletzinger, K.-U.: Formoptimierung von Flächentragwerken. Diss., Universität Stuttgart, 1990
- [20] Bletzinger, K.-U.; Ramm, E.: A General Finite Element Approach to the Form Finding of Tensile Structures. *Int. Journal of Space Structures* 14 (1999) 2, S. 131–145 – DOI: 10.1260/0266351991494759
- [21] Daoud, F.: Formoptimierung von Freiformschalen. Diss., TU München, 2005
- [22] Camprubí Estebo, N.: Design and Analysis in Shape Optimization of Shells. Diss., TU München, 2005
- [23] Bletzinger, K.-U.: Form Finding and Morphogenesis. In: Mughan, I.; Abel, J. F. (Hrsg.): *Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures. In Celebration of the 50th Anniversary Jubilee of the IASS (1959–2009)*, Madrid: IASS, 2011, S. 536–547
- [24] Bletzinger, K.-U.; Ramm, E.: Structural Optimization and Form Finding of Light Weight Structures. *Computers & Structures* 79 (2001) 22–25, S. 2053–2062 – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(01\)00052-9](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(01)00052-9)
- [25] Bletzinger, K.-U.; Wüchner, R.; Daoud, F.; Camprubi, N.: Computational Methods for Formfinding and Optimization of Shells and Membranes. *Computer Methods in Applied Mechanics and*

- Engineering 194 (2005) 30–33, S. 3438–3452 – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2004.12.026>
- [26] Ramm, E.: Shape Finding of Concrete Shell Roofs. *Journal of the IASS* 45 (2004) 1, S. 29–39
- [27] Ramm, E.: Shape Finding Methods of Shells. *Bulletin of the International Association for Shell Structures* 33 (1992) 109, S. 89–99
- [28] Ramm, E.; Bletzinger, K.-U.; Reitinger, R.: Shape Optimization of Shell Structures. *Bulletin of the International Association for Shell Structures* 34 (1993), S. 103–121
- [29] Apostolatos, A.: *Domain Decomposition Methods in Isogeometric Analysis*. Masterarbeit, TU München, 2012
- [30] Gödde, L.; Strack, M.; Mark, P.: Bauteile aus Stahl-faserbeton und stahlfaserverstärktem Stahlbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 105 (2010) 2, S. 78–91
- [31] Zieglertrum, J.: *Tragwerksbeurteilung und Bemessung von Schalen aus Stahlfaserbeton am Beispiel der Raststätte Deitingen Süd*. Bachelorarbeit, TU München, 2013
- [32] <https://www.kiwi3d.com/> (geprüft am 16.04.2020)
- [33] <https://www.rhino3d.com/> (geprüft am 16.04.2020)
- [34] <https://www.grasshopper3d.com/> (geprüft am 16.04.2020)

Bildnachweise | Picture credits

- Bild | Picture 1 (links | left): Richard Huber – eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18915295>
- Bild | Picture 1 (rechts | right): User:Mattes – eigenes Werk, gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11864257>
- Bild | Picture 2: Tigerhawkvok – eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4033692>
- Bilder | Pictures 3, 5–10, 20–26: Michael Breitenberger (7–10: [1], 21–23: [16], 3, 24–26 [18])
- Bild | Picture 4: Хрюша – eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7646127>
- Bild | Picture 11, 14 (links | left): Sven Lehmsberg
- Bilder | Pictures 12, 13, 14 (rechts | right), 15: Maximilian Hechtl [11]
- Bilder | Pictures 16–19, 27: Anna Bauer (16, 17: [13])

Die Bilder wurden teilweise im Vergleich zu den Originalquellen modifiziert. | The pictures were partly modified in comparison to the original versions.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Nichtlineare Optimierung geometrisch definierter Fugen von räumlich gekrümmten Betonfertigteilen für unterschiedliche Lastfallkombinationen unter Beachtung von Material und Tragwerksaspekten mit isogeometrischen Verfahren

Nonlinear optimization of geometrical defined joints for spatial curved precast concrete components considering different load cases and the influence of material and structural behavior aspects using isogeometric techniques

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger Lehrstuhlinhaber Chairholder
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	BL 306/23-1/2 (Projektnummer Project number: 198016927)
Adresse Address:	TU München, Lehrstuhl für Statik, Arcisstr. 21, 80333 München
Kontakt Contact:	+49 89 289 22422 info.statik@tum.de https://www.bgu.tum.de/st/startseite/
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Förderphase I Funding period I: 03/2012–02/2015 Förderphase II Funding period II: 02.03.2015–28.02.2018 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 31.07.2018
Team Team:	Michael Breitenberger (03/2015–05/2017) Anna Bauer (10/2015–11/2015) Thomas Oberbichler (07/2017–07/2018)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Breitenberger, M.: A Nested Jacobian approach for the Nonlinear Isogeometric Analysis and Optimization of Trimmed Shell Structures. In: Proc. of the 84th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics GAMM, 18.–22.03.2013 in Novi Sad (Serbien) (eingeladener Vortrag samt abstract zu Young Research Session)
- Breitenberger, M.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Isogeometric Layout Optimization of Shell Structures using Trimmed NURBS Surfaces. In: Proc. of World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization WCSMO-10, 19.–24.05.2013 in Orlando (USA), 2013, 10 S. (publ. digitally)
- Breitenberger, M.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Entwurf und Berechnung von gekrümmten Betonfertigbauteilen mit CAD-basierten Verfahren für ein filigranes Bauen mit Beton in der Zukunft. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 783–791 – DOI: 10.1002/best.201300047
- Breitenberger, M.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Entwurf, Berechnung und Optimierung von gekrümmten Betonfertigbauteilen mit der Isogeometrischen B-Rep Analyse. In: Bletzinger, K.-U.; Fisch, R.; Gebeken, N. (Hrsg.): Tagungsband Baustatik – Baupraxis 12, 24./25.02.2014 an der TU München, München, 2014, S. 267–274
- Breitenberger, M.; Bletzinger, K.-U.: Entwerfen, Berechnen und Optimieren von Betonschalen mit der isogeometrischen B-Rep-Analyse. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 236–241 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171534>
- Breitenberger, M.; Apostolatos, A.; Philipp, B.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Analysis in computer aided design: Nonlinear isogeometric B-Rep analysis of shell structures. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 284 (2015), S. 401–457 – DOI 10.1016/j.cma.2014.09.033
- Breitenberger, M.; Philipp, B.; Bletzinger, K.-U.: CAD-integrated design and analysis of shell and membrane structures. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-501810, publ. auf USB stick, 9 S.
- Philipp, B.; Breitenberger, M.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Form-Finding of Architectural Membranes in a CAD-Environment Using the AICAD-Concept. In: Thomsen, M.; Tamke, M.; Gengnagel, C.; Faircloth, B.; Scheurer,

- F. (Hrsg.): Modelling Behaviour – Proc. of Design Modelling Symp. 2015, 30.09.–02.10.2015 in Kopenhagen (Dänemark), Springer Int. Publ., 2015, S. 65–74 – DOI: 10.1007/978-3-319-24208-8_6
- Apostolatos, A.; Breitenberger, M.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Domain Decomposition Methods and Kirchhoff-Love Shell Multipatch Coupling in Isogeometric Analysis. In: Jüttler, B.; Simeon, B. (Hrsg.): Isogeometric Analysis and Applications 2014 – Lecture Notes in Computational Science and Engineering 107, S. 73–101 – DOI: 10.1007/978-3-319-23315-4_4
 - Philipp, B.; Breitenberger, M.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Membrane structures with the Isogeometric B-Rep Analysis (IBRA). In: Oñate, E.; Bletzinger, K.-U.; Kröplin, B. (Hrsg.): Proc. of VII Int. Conf. on Textile Composites and Inflatable Structures – Structural Membranes 2015, 19.–21.10.2015 in Barcelona (Spanien), 2015, S. 269–280 (publ. digitally) – URL: <http://hdl.handle.net/2117/109358>
 - Bauer, A. M.; Breitenberger, M.; Philipp, B.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Nonlinear isogeometric spatial Bernoulli Beam. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 303 (2016), S. 101–127 – DOI: 10.1016/j.cma.2017.07.010
 - Philipp, B.; Breitenberger, M.; D'Auria, I.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Integrated design and analysis of structural membranes using the Isogeometric B-Rep Analysis. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 303 (2016), S. 312–340 – DOI: 10.1016/j.cma.2016.02.003
 - Goldbach, A.-K.; Breitenberger, M.; Bletzinger, K.-U.: Computational Cutting Pattern Generation Using Isogeometric B-Rep Analysis. Procedia Engineering 155 (2016), S. 249–255 – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.026
 - Philipp, B.; Bletzinger, K.-U.: Advances in the form-finding of structural membranes. Procedia Engineering 155 (2016), S. 332–341 – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.036
 - Breitenberger, M.: Cad-integrated design and analysis of shell structures. Diss., TU München, 2016 – <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1311417/1311417.pdf>
 - Breitenberger, M.; Philipp, B.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.; Hartmann, S.; Haufe, A.: Increasing Efficiency of the Design Process with an Isogeometric Analysis Plugin for Siemens NX by Analyzing the CAD Model Directly. In: Proc. of 10th European LS-DYNA Conf. 2015, 15.–17.06.2017 in Würzburg, 2017, 4 S. (publ. digitally)
 - Bauer, A. M.; Längst, P.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Isogeometric Analysis for Modeling and Simulation of Building Processes. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9880, Book of Abstracts: S. 212, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.
 - Längst, P.; Bauer, A. M.; Michalski, A.; Lienhard, J.: The Potentials of Isogeometric Analysis Methods in Integrated Design Processes. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9936, Book of Abstracts: S. 213, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.
 - Goldbach, A.-K.; Bletzinger, K.-U.: Isogeometric B-Rep Analysis for finding stress-optimized cutting patterns. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9190, Book of Abstracts: S. 156, Langfassung auf USB-Stick, 8 S.
 - Bauer, A. M.; Breitenberger, M.; Philipp, B.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Embedded structural entities in NURBS-based isogeometric analysis. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 325 (2017), S. 198–218 – DOI: 10.1016/j.cma.2015.12.027
 - Bauer, A. M.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Isogeometric analysis for staged construction within lightweight design. In: Oñate, E.; Bletzinger, K.-U.; Kröplin, B. (Hrsg.): Proc. of VIII Int. Conf. on Textile Composites and Inflatable Structures – Structural Membranes 2017, 09.–11.10.2017 in München, 2017, S. 311–322 (publ. digitally) – URL: <http://hdl.handle.net/2117/185200>.
 - Teschemacher, T.; Bauer, A. M.; Oberbichler, T.; Breitenberger, M.; Rossi, R.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Realization of CAD-integrated Shell Simulation based on Isogeometric B-Rep Analysis. Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences 5 (2018) 19, 54 S. – DOI: 10.1186/s40323-018-0109-4

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Breitenberger, M.: CAD-integrated design and analysis of shell structures. 2016

Studienarbeiten | Student's research projects

- D'Auria, I.: Formfindung mit isogeometrischen Elementen. Masterarbeit, 2013
- Ziegltrum, J.: Tragwerksbeurteilung und Bemessung von Schalen aus Stahlfaserbeton am Beispiel der Raststätte Deitingen Süd. Bachelorarbeit, 2013

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Erforschung der mathematisch-methodischen Grundlagen zur Nutzung der Isogeometrischen Analyse in der Leichtbau-Planung | Investigation of the mathematical-methodical basis for the use of isogeometric analysis in lightweight design

Projektleiter Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger
Förderer Funding:	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)
Förderzeitraum Funding period:	04/2016–12/2018
Partner Partner:	str.ucture GmbH, Stuttgart

- Der digitale Baukasten – Simulationsbasierte Modelle und Methoden für den Entwurf modularer Tragsysteme aus Beton | The Digital Building Kit – Simulation-based models and methods for the design of modular concrete structures

Projektleiter Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 2187
Förderzeitraum Funding period:	02/2020–01/2023

Entwicklung neuartiger Verbindungen für komplexe Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC | Development of novel jointing systems for complex beam surface and spatial elements made of UHPFRC

- ▶ Lukas Ledderose¹, Sven Lehmborg², Franz Wirth¹, Harald Kloft¹, Harald Budelmann²
- ▶ ¹ Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig
- ▶ ² Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig

1 Erste Förderperiode

1.1 Einleitung

Das Institut für Tragwerksentwurf (ITE) und das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig bearbeiteten in der ersten Förderperiode des SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ gemeinsam das Teilprojekt „Entwicklung neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkselemente aus UHPC“. Schwerpunkt waren umfangreiche Untersuchungen zu geometrisch komplexen und hochpräzise hergestellte trocken gefügten Stoßverbindungen für dünnwandige UHPC-Bauteile zur Übertragung von Druck-, Biege- und Scherkräften. Zur Verbesserung der Zugtragfähigkeit und des Nachbruchverhaltens wurde im Forschungsprojekt stahlfaserverstärkter ultrahochfester Beton (UHPFRC) verwendet. Die einzelnen Arbeitspakete waren entsprechend der Expertisen der beiden Institute aufgeteilt. Während sich das ITE insbesondere mit der Entwicklung der Bauteil- und Fugegeometrien sowie dem Schalungsbaus befasste, lagen Planung und Umsetzung der experimentellen und numerischen Material- und Bauteiluntersuchungen in der Verantwortung des iBMB.

Die neuartigen Fügungen wurden mithilfe nichtlinearer numerischer Analysen und durch

1 First funding period

1.1 Introduction

The Institute of Structural Design (ITE) and the Institute of Building Materials, Concrete Structures and Fire Safety (iBMB) of the Technical University of Braunschweig worked together in the first funding period of the SPP 1542 “Concrete Light” on the subproject “Development of novel jointing systems for complex beam surface and spatial elements made of UHPFRC”. The focus was on extensive investigations of geometrically complex and high-precision dry-jointed connections for thin-walled UHPC components for the transmission of compressive, bending and shear forces. Steel fibre reinforced ultra-high performance concrete (UHPFRC) was used in the research project to improve the tensile strength and post fracture behaviour. The individual work packages were divided according to the expertise of the two institutes. While the ITE was particularly concerned with the development of the component and joint geometries as well as the formwork construction, the iBMB was responsible for the planning and implementation of the experimental and numerical material and element analyses.

The novel joints were developed by means of non-linear numerical analyses and experi-

experimentelle Untersuchungen entwickelt. Dabei konnten auch Erfahrungen bei der Herstellung von dünnwandigen Bauteilen aus UHPFRC sowie der numerischen Optimierung von Bauteilen gewonnen werden. Insbesondere das Tragverhalten kraftflussoptimierter biegesteifer Knotenelemente aus UHPFRC wurde detailliert untersucht. Die gestellten Ziele wurden mit dem Ende der ersten Förderperiode erreicht. Die Ergebnisse wurden u. a. in [1]–[3] publiziert. Außerdem wurden die jeweiligen Ergebnisse bei den regelmäßigen Arbeitstreffen im SPP vorgestellt und diskutiert. In Ergänzung zu den Publikationen werden die Forschungsergebnisse der ersten Antragsphase im Folgenden zusammenfassend dargestellt. Eine ausführliche Darstellung ist in [4] enthalten.

1.2 Materialeigenschaften des UHPFRC und der Einfluss auf den Designprozess (iBMB)

Die in der ersten Förderperiode verwendete UHPFRC-Rezeptur FK1-2,5, s. Tabelle 1, wurde aus der Referenzmischung M2Q der Universität Kassel [5] für die Anwendung bei dünnwandigen Bauteilgeometrien am iBMB weiterentwickelt.

Entwicklungskriterien waren die zu gewährleistenden, selbstnivellierenden und selbstentlüftenden Eigenschaften der Betonmatrix bei gleichzeitig hohen Druck- und Zugfestigkeiten. Der Einsatz von Mikrostahtfasern, die ein gutes Nachbruchverhalten des spröden UHPC sicherstellen, machte es möglich, auf konventionelle

mental investigations. Thereby, experiences in the production of thin-walled elements made of UHPFRC as well as in the numerical optimization could be gained also. In particular, the load-bearing behaviour of force-flow-optimized bending-resistant node elements made of UHPFRC was investigated in detail. The set goals were achieved at the end of the first funding period. The results were published in [1]–[3]. Furthermore, the relevant results were presented and discussed at the regular SPP’s working meetings. In addition to the publications, the research results of the first funding period are summarized in the following. A detailed report is included in [4].

1.2 Material properties of the UHPFRC and their influence on the design process (iBMB)

The UHPFRC mix design FK1-2,5 used in the first funding period, see Table 1, was refined from the reference compound M2Q of the University of Kassel [5] for the application on thin-walled component geometries at the iBMB.

The criteria for the development were the required self-levelling and self-deaerating properties of the concrete matrix in combination with high compressive and tensile strengths. The use of micro steel fibres, which ensure good post-cracking behaviour of the brittle UHPC, made it possible to dispense with conventional reinforcement. This also allowed the use of prestressing systems without additional built-in

Ausgangsstoffe Components	Anteil Portion in [kg/m³]
Zement Cement CEM I 52,5 R HS-NA	595
Mikrosilica Microsilica	69
Quarzmehl I Quartz powder I	314
Quarzmehl II Quartz powder II	119
Quarzsand Quartz sand	1029
Mikro-Stahldrahtfasern Micro steel wire fibres STRATEC Weidacon (2,5 Vol.-%; d / l = 0,15 / 11 mm)	192
Fließmittel Superplasticizer	40
Wasser Water	156

Tabelle 1: Ausgangsstoffe für den UHPFRC FK1-2,5 für Bauteilversuche | **Table 1:** Mix design for the UHPFRC FK1-2,5 for component tests

Kennwerte Material properties	Mittelwerte Mean values
Zylinderdruckfestigkeit Cylinder compressive strength ¹	151 MPa
Einachsige Zugfestigkeit Uniaxial tensile strength ¹	10 MPa
Biegezugfestigkeit Bending tensile strength ²	25 MPa
Elastizitätsmodul Modulus of elasticity ³	46,7 GPa
Querdehnzahl Poisson's ratio	0,18

¹ Zylinder | Cylinder d / h = 80 / 160 mm, ² Prisma | Prism b / h / l = 40 / 40 / 160 mm, ³ Zylinder | Cylinder d / h = 150 / 300 mm

Tabelle 2: Materialkennwerte des UHPFRC FK1-2,5 | **Table 2:** Material properties of UHPFRC FK1-2,5

Bewehrung zu verzichten. Auch der Einsatz von Vorspannsystemen ohne zusätzliche Stahleinbauteile konnte damit realisiert werden. Zur Designoptimierung der Bauteilgeometrien wurden mittels numerischer Analyse Mittelwerte aus Materialprüfungen verwendet, die in Tabelle 2 dargestellt sind. Die Kennwerte wurden anhand von Prüfungen nach Norm [6]–[8] ermittelt.

1.3 Passgenaue druckbeanspruchte Verbindungen für trocken gestoßene, dünnwandige Rohrprofile aus UHPFRC (ITE)

In [1] wurden die Vorteile der Verwendung leichter, dünnwandiger Rohrquerschnitte bereits beschrieben. Insbesondere können hier die hohe Tragfähigkeit bei geringem Materialeinsatz und die günstigen Eigenschaften bezüglich Torsions- und Knickwiderstand genannt werden. Die Untersuchungen wurden an UHPFRC-Referenzrohren mit einem Außendurchmesser von 100 mm und einer Wandstärke von 15 mm durchgeführt. Trotz der geringen Querschnittsabmessungen wies der Rohrquerschnitt eine rechnerische Normalkrafttraglast von 604 kN auf. Entscheidend für die Herstellung von Stabtragwerken aus solchen Rohrquerschnitten ist jedoch die Ausbildung der Stöße und der Knotenfüugungen, um eine einfache Montage auf der Baustelle zu erreichen.

Im ersten Arbeitspaket wurden passgenaue, trocken gefügte Stoßverbindungen für die UHPFRC-Rohre entwickelt. Ein wesentliches Ziel dabei war es, eine hohe mechanische Effizienz durch Erhöhung der Präzision und geometrischen

steel components. For design optimization of the component geometries, mean values from numerical analyses based on material tests were used, see table 2. The characteristic values were determined on the basis of tests according to standards [6]–[8].

1.3 Precisely fitting, compression-stressed joints for dry-jointed, thin-walled tube profiles made of UHPFRC (ITE)

In [1], the advantages of using light, thin-walled tube cross-sections have already been described. In particular, the high load-bearing capacity with low material consumption and the good properties regarding torsional and buckling resistance can be mentioned here. The investigations were carried out on UHPFRC reference tubes with an outer diameter of 100 mm and a wall thickness of 15 mm. Despite the small cross-sectional dimensions, the tube cross-section showed a calculated axial load-bearing capacity of 604 kN. However, the decisive factor for the erection of truss structures made of bars with tubular cross-sections is the design of the joints and nodal connections in order to achieve simple assembly on the construction site.

In the first work package, accurately fitting, dry-jointed butt connections for the UHPFRC tubes were developed. A major goal was to achieve high mechanical efficiency by increasing the precision and geometric complexity in the joining area. For this purpose, different joining strategies, which are particularly known from steel and wood construction, were first analyzed. It was also considered that the tubes

Komplexität im Fügebereich zu erreichen. Hierzu wurden zunächst unterschiedliche Fügestrategien, die insbesondere aus dem Stahl- und Holzbau bekannt sind, analysiert. Dabei wurde berücksichtigt, dass die Rohre im Fügebereich aufgedickt ausgebildet werden können. Die anschließende Auswertung der entwickelten Fügeformen orientierte sich an drei Hauptkriterien:

- Kraftübertragung: Druck, Zug (im Montagezustand), Querkraft/Moment, Torsion,
- Herstellbarkeit: Gießen, Fräsen, Sägen, Schleifen, Wasserstrahlschneiden,
- Fügerichtung und Montage: axial, quer, schräg, radial.

Bild 1 zeigt eine Auswahl der möglichen Stoßverbindungen, die als 3D-Modelle entworfen wurden.

Eine wichtige Zielstellung bei der Entwicklung passgenauer Trockenstöße war die Vermeidung von Verfüll- oder Verpressfugen und von Stahleinbauteilen. Zudem sollten die Rohre mittels innen verlaufender Spannelemente axial vorgespannt werden können. Für die Herstellung solcher trockenen Fügungen stehen heute zwei Verfahren zur Verfügung. Zuerst sei das Kontaktverfahren (*Match Casting*) [9] zu nennen, bei dem ein Anschlussbauteil gegen ein bereits vorhandenes Bauteil betoniert wird. Ein Nachteil hierbei ist

can be thickened in the joining area. The subsequent evaluation of the developed jointing designs was based on three main criteria:

- Force transmission: compression, tension (in assembly state), shear force/moment, torsion;
- Production: casting, milling, sawing, grinding, water jet cutting;
- Joining direction and assembly: axial, transverse, angled, radial.

Fig. 1 shows a selection of possible joints designed as 3D models.

An important objective in the development of the precisely fitting dry joints was the avoidance of backfilling or grouting as well as steel components. In addition, it also had to be possible to pretension the tubes axially by using internally running tensioning elements. Today, two methods are used to produce such dry joints. The first is the contact method (*match casting*) [9], in which a connecting element is concreted against an existing element. A disadvantage is the high manufacturing effort. Furthermore, it is not possible to prefabricate the components to be joined independently and to assemble them at a different location. A second possibility is the CNC-controlled regrinding of oversized concrete parts, as it was applied for the Wildbrücke [10] or for a modular UHPC truss construction developed by Henze [11]. The method of regrinding

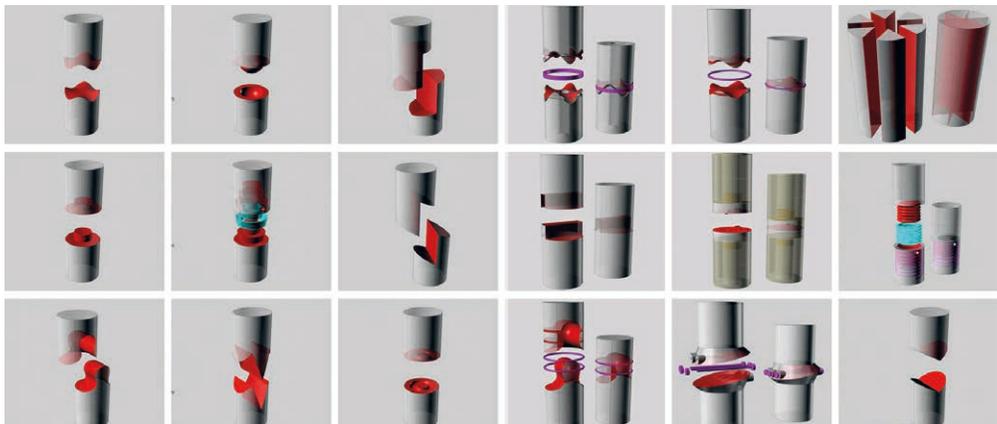


Bild 1: Typologische Entwicklung trocken gefügter Stoßverbindungen von rohrförmigen Stäben | Fig. 1: Typological development of dry joints for tubular elements

der hohe Fertigungsaufwand. Zudem ist es nicht möglich, die zu fügenden Bauteile unabhängig vorzufertigen und an einem anderen Ort zu montieren. Eine zweite Möglichkeit ist das CNC-gesteuerte Nachschleifen von mit Übergröße hergestellten Betonteilen, wie es bei der Wildbrücke [10] oder bei einer von Henze entwickelten modularen UHPC-Fachwerkkonstruktion [11] angewandt wurde. Die Methode des Nachschleifens kommt prinzipiell für die Fügung der UHPFRC-Rohre in Betracht, beinhaltet aber aufgrund der nötigen Diamant-Schleif- und Fräswerkzeuge geometrische Einschränkungen hinsichtlich der Kontaktflächen. Zudem fordert das Nachschleifen wegen der hohen Festigkeit von UHPC einen erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwand.

Aufgrund der zuvor genannten Nachteile wurde für die passgenaue trockene Stoßfügung der UHPFRC-Rohre ein neues Herstellungsverfahren entwickelt, nämlich der auf der CNC-Technik basierende *Ultra-Präzisions-Schalungsbau*. Da der Formenbau mittels CNC-Technik hochpräzise ist und UHPC aufgrund seiner Feinkörnigkeit komplexe Geometrien exakt abformen kann, wurden für die zu entwickelnden Fügeprinzipien folgende Ziele definiert:

1. Fügungen als Trockenstöße sollen mithilfe hochpräziser Schalungen so exakt gefertigt werden, dass auf Einbauteile und eine Nachbearbeitung des Betons verzichtet werden kann.
2. Biegebeanspruchte Knoten sollen über präzise hergestellte Trockenstöße direkt an die Stäbe angeschlossen werden können.

can be considered in principle for the joining of UHPFRC tubes, but it has geometric limitations regarding the contact surfaces due to the required diamond grinding and milling tools. In addition, due to the high strength of UHPC, regrinding requires considerable time and effort.

Due to the above mentioned disadvantages, a new manufacturing process was developed for the precise dry jointing of UHPFRC tubes, namely *ultra-precision formwork construction* based on CNC technology. As the formwork construction by means of CNC technology is highly precise and UHPC is able to adopt complex geometries exactly due to its fine grain size, the following objectives were defined for the joining principles to be developed:

1. Dry joints are to be produced with the help of high-precision formwork so precisely that there is no need for built-in parts and no need to post-process the concrete.
2. Nodes that are exposed to bending stresses should be connected directly to the tubes with precisely manufactured dry joints.

With regard to the above mentioned criteria, selected dry joints were investigated numerically and experimentally in detail [2], see Fig. 2.

For the initial verification of the connections designed on the computer, they were 3D printed in plaster. In further analytical investigations and subsequent tests of tubes, the cross-sectional areas of the examined joint geometries were



Bild 2: Realisierung von trocken gefügten Stoßverbindungen für rohrförmige Stäbe; links: 3D-Modell, Mitte: Überprüfen der digitalen Daten durch 3D-Gipsdrucke, rechts: UHPFRC-Probekörper | **Fig. 2:** Manufacturing of dry joints for tubular elements; left: 3D model; middle: verification of digital data by 3D plaster prints; right: produced UHPFRC specimen

Mit Blick auf die o. g. Kriterien wurden in der weiteren Bearbeitung ausgewählte trocken gefügte Stoßverbindungen numerisch und versuchs-technisch detailliert untersucht [2], Bild 2.

Zur ersten Überprüfung der am Rechner entworfenen Verbindungen wurden diese im 3D-Druckverfahren in Gips hergestellt. In den weiteren analytischen Untersuchungen und späteren Bauteilversuchen wurden die Querschnittsflächen der untersuchten Stoßgeometrien im jeweiligen Stoßbereich innenseitig verstärkt, um die lokalen Spannungen zu reduzieren. Die Geometrien der Stoßflächen wurden iterativ durch lineare FEM-Berechnungen verbessert, um eine dem umgestoßenen Rohr nahekommende Traglast zu erreichen. In den anschließenden Bauteilversuchen zeigte sich, dass der Kraftüberleitungsbereich vom Rohr auf den Vollquerschnitt im Stoßbereich maßgebend wird, weshalb im folgenden Schritt das Versagen in diesem Bereich detailliert untersucht wurde. Als rotationssymmetrische Schnittgeometrien für diesen Bereich wurden Zylinder-, Halbkreis-, Katenoiden- und Ellipsengeometrien miteinander verglichen (Bild 3).

Während die FEM-Berechnungen jeweils auf deutlich frühzeitiges Versagen im Kraftüberleitungsbereich hinwiesen, erreichten die Probekörper in den Druckversuchen höhere Traglasten mit einem Versagen am Kraftüberleitungsbereich zum ungestörten Rohrquerschnitt. Auch bei nicht linear-elastischer Berechnung war dies tendenziell noch der Fall. Die Abweichungen sind vermutlich auf die Mitwirkung der Fasern im UHPFRC zurückzuführen

reinforced on the inside in the respective joint area in order to reduce local stresses. The geometries of the joint surfaces were iteratively improved by linear FEM calculations to achieve a load-bearing capacities close to that of jointless tubes. The subsequent element tests showed that the force transfer area from the tubular to the solid cross-section becomes decisive in the joint area, which is why the failure in this area was investigated in detail in the following step. As rotationally symmetrical section geometries for this area, cylindrical, semi-circular, catenoid and elliptical geometries were compared (Fig. 3).

While the FEM calculations in each case pointed to clearly early failure in the force transfer area, the test specimens in the compression tests achieved higher loads with a failure in the force transfer area next to the homogenous tube cross-section. Even with non-linear-elastic calculations, this was still the case. The deviations are probably due to the involvement of the fibres in the UHPFRC, which apparently could not be properly reflected in the material models used. In the numerical model, the maximum load of the components was already reached when the first micro cracks appeared, whereas in the test, a considerably more ductile behaviour due to the formation of microcracks could be observed.

Based on these observations, the material model used was further refined during the first funding period. Furthermore, the results of the investigations have shown that the method of local material deposition presented by Mattheck [12] can also be helpful for the ge-

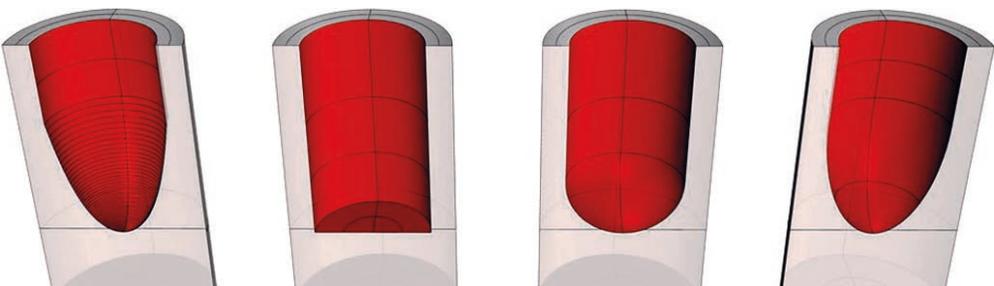


Bild 3: Geometrien der Kraftüberleitungsbereiche | Fig. 3: Geometries of the load transfer areas

ren, die in den verwendeten Materialmodellen offenbar nicht angemessen abgebildet werden konnte. Im numerischen Modell wurde die maximale Traglast der Bauteile bereits beim Auftreten erster Mikrorisse erreicht, während im Versuch ein erheblich duktileres Verhalten bei der Entstehung von Mikrorissen beobachtet werden konnte.

Auf Grundlage dieser Beobachtungen wurde das verwendete Materialmodell im Verlauf der ersten Förderperiode weiter angepasst. Die Untersuchungsergebnisse haben ferner gezeigt, dass die von Mattheck [12] vorgestellte Methode der lokalen Anlagerung von Material zur Verringerung von Spannungen in baumartigen Bauteilen auch für die geometrische Auslegung von UHPFRC-Bauteilen hilfreich sein kann.

Die untersuchten trocken gefügten Stoßverbindungen aus UHPFRC mit innenseitiger Querschnittsaufdickung sind auch bei kleinen Imperfektionen der Oberfläche in der Lage, bis zu 85 % der maximalen Traglast des ungestörten UHPFRC-Rohres zu übertragen. Bild 4 zeigt im Vergleich der FEM-Simulationen, dass sich durch eine symmetrische Aufdickung nach innen und außen die Spannungsverteilung gleichmäßig verteilen lässt.

ometric design of UHPFRC elements to reduce stresses in tree-like structures.

The investigated dry-jointed UHPFRC butt joints with thickened internal cross-section are able to transfer up to 85% of the maximum load even with small imperfections of the surface. Fig. 4 shows in the comparison of the FEM simulations that the stress distribution can be allocated evenly by a symmetrical thickening of the cross-section inwards and outwards.

The findings from the development of the tubular joints were transferred to the development of bending-resistant node elements.

1.4 Bending-resistant node elements made of UHPFRC tubes for deflection of forces in frame structures (ITE/iBMB)

The development of the geometry of these node elements was inspired by Maillart's reinforced concrete frame construction of the train station in Chiasso [13], which was already described by Bletzinger [14] as a lightweight construction in which "force and form are in an ideal relationship". The load assumptions were derived from the load capacities of the thin-walled UHPFRC reference tubes to be connected. As in the develop-

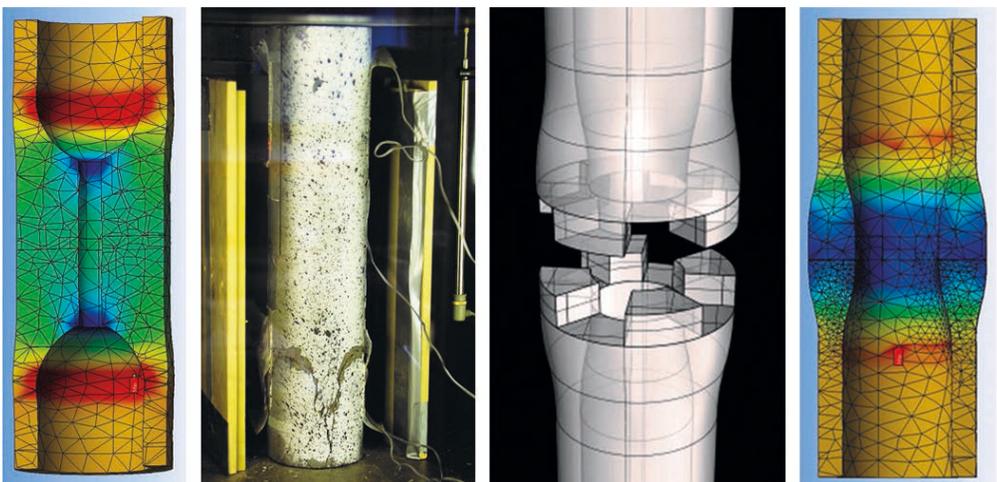


Bild 4: Untersuchung von Stoßverbindungen mit unterschiedlichem Kräfteinleitungsbereich: innenseitige Aufdickung (links); symmetrische Aufdickung (rechts) | **Fig. 4:** Investigation of dry joints with different load introduction areas: inner thickening (left); symmetric thickening (right)

Die Erkenntnisse aus der Entwicklung der Rohr-
stöße wurden in die Entwicklung biegesteifer
Knotenelemente überführt.

**1.4 Biegesteife Knotenelemente aus UHPFRC-
Rohren zur Umlenkung von Kräften in Stab-
tragwerken (ITE/iBMB)**

Die Entwicklung der Geometrie dieser Knoten-
elemente wurde durch die von Maillart entwi-
ckelte Stahlbetonstabwerkkonstruktion des
Bahnhofs in Chiasso [13] inspiriert, welche
bereits von Bletzinger [14] als eine Leichtbau-
konstruktion beschrieben wurde, bei der „Kraft
und Form in einer idealen Beziehung stehen“. Die
Lastannahmen wurden aus den Tragfähigkeiten
der anzuschließenden dünnwandigen UHPFRC-
Referenzrohre abgeleitet. Wie bei der Entwick-
lung von passgenauen, trocken gefügten Stoß-
verbindungen wurden auch hier UHPFRC-Rohre
mit einem Durchmesser von 100 mm und einer
Wandstärke von 15 mm eingesetzt. Der Rohr-
querschnitt wies bei linear-elastischer Berech-
nung die in Bild 5 (links) dargestellte Momen-
ten-Drucknormalkraft-Tragfähigkeit auf. Die
Versuchsreihen am iBMB an diesem leichten
Rohrquerschnitt mit einem Eigengewicht von
nur 10 kg/m zeigen, dass die Materialdruckfest-
igkeit von 151 MPa und somit auch eine Nor-
malkrafttragfähigkeit von über 600 kN erreicht
werden können. Daraus abgeleitet erschien die
folgende Beanspruchungskombination auch
für die Knoten realisierbar: $M = 3,5$ kNm bei
 $N = -250$ kN (Druckkraft). Diese Beanspru-

ment of precisely fitting dry-jointed butt joints,
UHPFRC tubes with a diameter of 100 mm and
a wall thickness of 15 mm were used. The mo-
ment-normal force load-bearing capacity the
tube cross-section based on linear-elastic calcula-
tion is shown in Fig. 5 (left). The test series on
the iBMB on this lightweight tube cross-section
with a dead weight of only 10 kg/m showed that
the material compressive strength of 151 MPa
and thus also a normal force bearing capacity
of more than 600 kN could be achieved. Derived
from this, the following stress combination
seemed to be realizable for the nodes as well:
 $M = 3.5$ kNm at $N = -250$ kN (compressive force).
This stress combination served as a basis for
the design of the component geometry as well
as for the dimensioning and geometric optimi-
zation of the node element at the ITE.

In order to make optimum use of the material
properties of the UHPFRC in the developed def-
lection-resistant node element, it was always
subjected to compressive stress by means of a
systematic prestressing in the connected tubes.
The prestressing was carried out using strands
guided in the tubes, which were anchored in the
respective end nodes. In the first testing step,
the connection type of a socket joint between
tube and node was investigated (Fig. 5, middle).
Assuming a tensile strength of 10 MPa for the
UHPFRC, a socket wall thickness of 10 mm was
required for the transmission of moments and
normal forces from the beam. This led to unsuit-
able results due to the heavy weight and the high

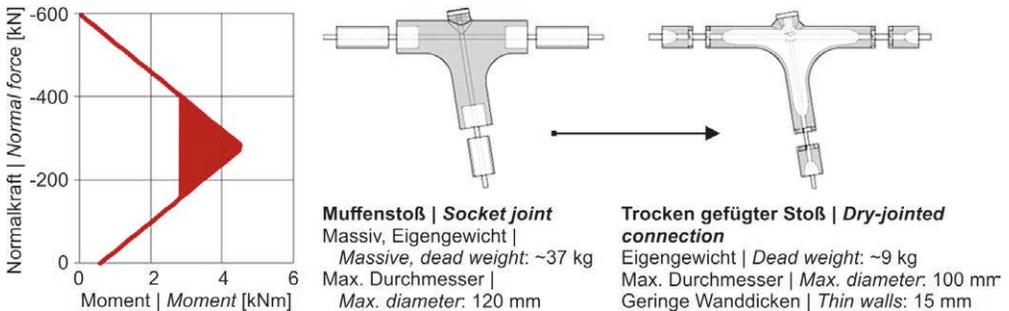


Bild 5: Linear-elastische Momenten-Normalkraft-Interaktion des Rohrquerschnittes (links) und Entwicklung eines organischen Knotens mit Vorspannung und Muffenstoß (Mitte) bzw. gewichtsoptimiert mit präzise trocken gefügtem Stoß (rechts) | **Fig. 5:** Linear-elastic moment-normal force interaction of the pipe cross-section (left) and organic node development: with preload and socket joint (centre) as well as weight-optimized with precisely dry-jointed connection (right)

chungskombination diene im Weiteren als Grundlage für den Entwurf der Bauteilgeometrie sowie für die Bemessung und geometrischen Optimierung des Knotenelements am ITE.

Um die Materialeigenschaften des UHPFRC in dem entwickelten biegesteifen Knotenelement optimal ausnutzen zu können, wurde dieser mittels einer planmäßigen Vorspannung in den angeschlossenen Rohren stets auf Druck beansprucht. Die Vorspannung erfolgte über in den Rohren geführte Spannlitzen, welche in den jeweiligen Endknoten verankert wurden. Im ersten Versuchsschritt wurde der Anschlusstyp einer Muffenverbindung zwischen Rohr und Knoten untersucht (Bild 5, Mitte). Bei Annahme einer Zugfestigkeit des UHPFRCs von 10 MPa ergab sich eine erforderliche Muffenwanddicke von 10 mm für die Übertragung der Momente und Normalkräfte aus dem Stab. Dies führte aufgrund des hohen Gewichts und der hohen Anforderung an die Passgenauigkeit von Muffenverbindungen hinsichtlich der Rohrtragfähigkeit zu unzureichenden Ergebnissen.

Im Weiteren wurde am ITE die Idee verfolgt, den Stoß aus dem unmittelbaren Knotenbereich heraus in die Stabstrecke zu verlagern, wodurch Knoten und Stoß separat gestaltet werden könnten. Das führte zu einer deutlich leichteren und schlankeren Knotengeometrie (Bild 5, rechts). Die Wanddicke im Knoten konnte so auf 15 mm begrenzt werden. Dieser Knoten wurde anschließend numerisch genauer untersucht, wobei sich zeigte, dass zum Erreichen der gewünschten Biegetragfähigkeit die Form des Knotens geometrisch noch optimiert werden musste. Zusätzlich wurde die Kerbanfälligkeit unter Biegebeanspruchung bereits durch Hermerschmidt/Budelmann [15] am iBMB festgestellt. In weiteren Optimierungsschritten wurden daher die Ausrundungsradien der Schenkel vergrößert. Die dadurch ebenfalls gewonnene, verbesserte Steifigkeit des Knotens erhöhte zusätzlich die Momententragfähigkeit. Ebenfalls wurden am Auflager für die Spannlitze (Bild 5, rechts) durch eine Querschnittsvergrößerung im Winkel von 45° die hohen lokalen Drucknormalkräfte weitergeleitet, um eine zu große

demands on the accuracy of fit of socket joints with regard to the tube load-bearing capacity.

Subsequently, the idea was pursued at the ITE to shift the joint from the immediate joint area into the beam section, which would enable the separate design of nodes and joints. This led to a significantly lighter and slimmer joint geometry (Fig. 5, right). The wall thickness in the node could thus be limited to 15 mm. This node was then examined numerically in more detail, which showed that the shape of the node still had to be optimized geometrically to achieve the desired bending load-bearing capacity. In addition, the notch susceptibility under bending stress was already determined by Hermerschmidt/Budelmann [15] at the iBMB. In further optimization steps, the rounding radii of the legs were therefore increased. The resulting improved stiffness of the node additionally increased the moment capacity. Also, at the support for the prestressing strands (Fig. 5, right), the high local compressive forces were transferred by enlarging the cross-section at an angle of 45° in order to prevent an excessive compression of the cross-section there. This improved node allowed the absorption of a higher bending moment combined with a lower weight. For the production of the test body at the ITE, the outer formwork of the node was made of wax and the inner hollow body of polystyrene using the method of *ultra-precision formwork construction* and concreted with the UHPFRC formula FK1-2,5 developed at the iBMB.

After the production of the optimized node element at the ITE, its load-bearing capacity was tested in a combined compression-bending test at the iBMB, see [4], [16]. The normal force was introduced using threaded rods before the test and kept basically constant during the test by a set of disc springs. The force of the press was applied to the upper support. The lower right support in the compression testing machine was designed to be horizontally displaceable using plastic slide bearings (Fig. 6, left) in order to allow the legs to move. By means of the measured movements and the recalculation of the spring stiffnesses, the absorbed rod moments in the range of 0.2 to

Stauchung des Querschnitts an dieser Stelle zu verhindern. Der weiterentwickelte Knoten ermöglichte die Aufnahme eines größeren Biegemomentes bei geringerem Gewicht. Zur Herstellung des Versuchskörpers am ITE wurde die Außenschalung der Knotenform aus Wachs und der innere Hohlkörper aus Polystyrol mit der Methode des *Ultra-Präzisions-Schalungsbaus* erstellt und mit der am iBMB entwickelten UHPFRC-Rezeptur FK1-2,5 ausbetoniert.

Im Anschluss an die Herstellung des optimierten Knotenelementes am ITE wurde dieses in einem kombinierten Druck-/Biegeversuch am iBMB auf seine Tragfähigkeit hin überprüft, s. [4], [16]. Dabei wurde die Normalkraft vor dem Versuch über Gewindestangen definiert eingeleitet und über Tellerfederpakete während des Versuchs weitgehend konstant gehalten. Die Pressenkraft wurde am oberen Auflager eingeleitet. Das untere rechte Auflager in der Druckprüfmaschine wurde mittels Kunststoffgleitlagern horizontal verschieblich ausgeführt (Bild 6, links), um eine Bewegung der Schenkel zu ermöglichen. Über die gemessenen Bewegungen konnten über die Nachrechnung der Federsteifigkeiten die aufgenommenen Stabendmomente im Bereich von 0,2 bis 1,1 kNm bei beginnender Rissbildung berechnet werden. Die Drucknormalkraft in den Stäben betrug zwischen 60 und 180 kN, was einer Querschnittsausnutzung von 8 bis 26 % der Druckfestigkeit entspricht.

Das Versagen fand bei einer Lasthöhe von 38 kN statt. Die experimentellen Ergebnisse des Knotenversuchs haben gezeigt, dass die mittels FEM-Berechnung ermittelten Traglasten, wie be-

1.1 kNm with beginning crack formation could be calculated. The normal compressive force in the legs was between 60 and 180 kN, which corresponds to a use of the bearing cross-section of 8 to 26% of their compression strength.

The failure occurred at a load of 38 kN. The experimental results of the node test showed that the loads determined by FEM calculation were exceeded, as was already the case with the butt joints. The evaluation of the strain gauges and the optical deformation measurement showed a local exceeding of the tensile strength of the UHPFRC, which however had no influence on the load-bearing capacity due to the very fine crack distribution. The failure was ultimately caused by a bending crack in combination with a shear force failure below the rounding of the node (Fig. 6). In the tests performed at the iBMB it could be shown that the bending load-bearing capacity of the developed node is higher than that of the connected tube cross-sections. The high load-bearing capacity was achieved by the node's outstanding ductile behaviour. Due to the high fibre content, no abrupt drop of the load in the critical state of the load-bearing capacity took place.

To verify the results obtained in this first experiment, further node elements of the same design were produced at the ITE and tested at the iBMB during the last phase of the first funding period. The measured values were compared to the FEM calculations and served to adapt and optimize the UHPFRC material model. The investigation of the node showed that the numerical optimization of the cross-section geometry was effective.

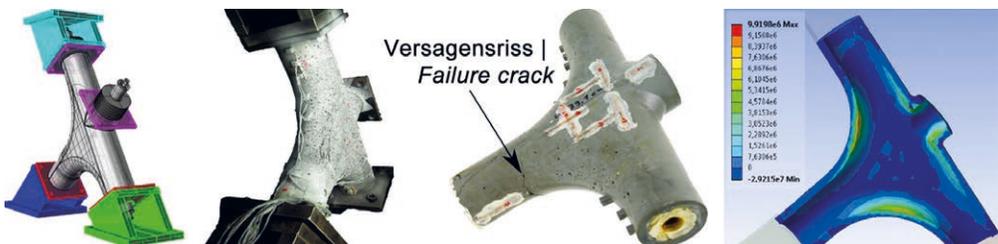


Bild 6: Knotentest in Druckprüfmaschine; v. l. n. r.: Schema Versuchsaufbau, Prüfaufbau mit DMS und Punktmuster für optische Messung, Knoten nach dem Versuch mit Versagensriss am Ausrundungsbeginn, numerische Simulation (hier: Hauptzugspannungen beim letzten Lastschritt) | **Fig. 6:** Node test in a compression testing machine; f.l.t.r.: schematic test setup; sample with strain gauges and dot patterns for optical measurement; node after test with failure crack at the beginning of the rounding; FE simulation (here: main tensile stresses at last load step)

reits bei den Stoßverbindungen, überschritten wurden. Die Auswertung der Dehnmessstreifen und der optischen Verformungsmessung zeigten eine lokale Überschreitung der Zugfestigkeit des UHPFRC, die jedoch aufgrund der sehr feinen Rissverteilung keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit hatte. Das Versagen wurde letztlich durch einen Biegeriss in Kombination mit einem Querkraftversagen unterhalb der Ausrundung des Knotens ausgelöst (Bild 6). In den am iBMB durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Biegetragfähigkeit des entwickelten Knotens höher als die der angeschlossenen Rohrquerschnitte ist. Die hohe Traglast erreichte der Knoten dabei durch sein ausgeprägt duktilen Verhalten. Aufgrund des hohen Fasergehaltes fand kein schlagartiges Abfallen der Last im Grenzzustand der Tragfähigkeit statt.

Zur Verifizierung der in diesem ersten Versuch ermittelten Ergebnisse wurden in der letzten Phase der ersten Förderperiode weitere Knotenelemente der gleichen Bauart am ITE hergestellt und am iBMB geprüft. Die Messwerte wurden den FEM-Berechnungen gegenübergestellt und dienten zur Anpassung und Optimierung des UHPFRC-Materialmodells. Die Knotenuntersuchung ergab, dass die numerische Optimierung der Querschnittsgeometrie zielführend war. Daher wurde auf weitere experimentelle Betrachtungen unterschiedlicher Eck- und Endknoten verzichtet, da diese letztendlich Modifikationen des untersuchten Knotens darstellten. In den weiteren Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass eine weiterführende kraftflussorientierte Topologieoptimierung zur besseren Performance des beschriebenen Knotenelementes zielführender war als die Entwicklung neuer Knotentypen.

1.5 Linienförmige, trocken gefügte Stoßverbindungen zur passgenauen Fügung von segmentierten UHPFRC-Schalenbauteilen

1.5.1 Formfindung und Dimensionierung der Fugegeometrie (ITE)

Schalen aus Fertigteilen sind nicht neu, bereits 1942 wurde mit der Dywidag-Kreiszylinderschale [17] in Deutschland damit begonnen. Aus

Therefore, further experimental considerations of different corner and end nodes were omitted, since these only represented modifications of the examined node. Further investigations have shown that a further force flow oriented topology optimization for a better performance of the described node element was more useful than the development of new node types.

1.5 Linear dry-jointed butt joints for precise joining of segmented UHPFRC shell elements

1.5.1 Form finding and dimensioning of the joint geometry (ITE)

Shells made of prefabricated segments are not a novelty; the Dywidag circular cylinder shell [17] was already being used in Germany in 1942. For mostly economic reasons, however, its distribution remained limited and mainly restricted to the Soviet Union and Eastern Europe. One example is the segmented armocement shell developed in the USSR [17]. In Germany, the prefabrication of shells was only considered reasonable if the shell could be assembled from as few elements as possible [18]. One example is the glass-fibre reinforced shell developed by Jörg Schlaich in 1976 in Stuttgart, which was built from prefabricated segments produced on site [19]. Cement-based filling mortars were used to join the segments of such prefabricated segmented shells, [20].

The investigations carried out in this project on tubular components and their joints showed that it is possible to join elements made of UHPFRC dry by means of geometrically precise and mechanically efficient joints. These findings were also used for the second part of the work program, namely the joining of planar elements. The aim here was also to create the requirements for the construction of two-dimensional structures and shells made of segmented precast elements and to join the elements dry without the use of filling mortar or additional steel components.

In the first step, analogous to the procedure for the tubes, geometric joining principles were de-

meist wirtschaftlichen Gesichtspunkten blieb die Verbreitung aber gering und hauptsächlich auf die Sowjetunion und Osteuropa beschränkt. Ein Beispiel ist die in der UdSSR entwickelte segmentierte Armozementschale [17]. In Deutschland wurde die Vorfertigung von Schalen nur dann als sinnvoll erachtet, wenn die Schale aus möglichst wenigen Elementen zusammengesetzt werden konnte [18]. Ein Beispiel ist die 1976 von Jörg Schlaich entwickelte glasfaserverstärkte Schale in Stuttgart, welche aus vor Ort hergestellten Fertigteilsegmenten errichtet wurde [19]. Es kamen für solche Segmentschalen aus Fertigteilen zementbasierte Verfüllmörtel zur Fügung der Segmente zum Einsatz, [20].

Die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen an stabförmigen Bauteilen und ihren Verbindungen zeigten, dass es möglich ist, Bauteile aus UHPFRC mittels geometrisch präziser und mechanisch leistungsfähiger Stöße trocken zu fügen. Diese Erkenntnisse wurden auch für den zweiten Teil des Arbeitsprogramms, nämlich die Fügung flächiger Elemente, genutzt. Ziel war es auch hier, die Voraussetzungen zum Bau von flächigen Bauten und Schalen aus segmentierten Fertigteilen zu schaffen und die Segmente ohne Verfüllmörtel oder zusätzliche Stahlteile trocken zu stoßen.

Im ersten Schritt wurden, analog zum Vorgehen bei den Stäben, geometrische Fügeprinzipien

entwickelt, welche sich in der jeweiligen Form und Kraftverteilung unterscheiden. Wie in Fig. 7 dargestellt, lassen sich eine Vielzahl von dreidimensionalen Fügegeometrien durch Kombination von vertikalen und horizontalen Schnitten im Fügebereich erzeugen. In der darauffolgenden Phase wurden die Fügearten hinsichtlich ihrer Eignung für unterschiedliche Fügerichtungen und ihrer grundsätzlichen Fähigkeit, Kräfte für normale sowie begrenzte Biege- und Querkraft zu übertragen, bewertet.

Eignende Fügearten wurden als 3D-Druckmodelle aus Gips hergestellt und auf ihre Funktionalität getestet. Eine Auswahl von Zahnverbindungen ist in Fig. 7 (rechts) dargestellt. Solche quer zur Schalenfläche her einbaufähigen Verbindungen ermöglichen die Übertragung von Druck- und auch Zugkräften durch Verriegelung. Das Beispiel in der Mitte von Fig. 7 (rechts) zeigt, wie eine Verdickung ebenfalls zur Erzeugung eines Hebelarms für eine gewisse Momentenlastkapazität im Fügebereich genutzt werden kann. Die untere rechte Abbildung zeigt, wie das Einbauen solcher Verbindungen vor Ort durch separate, präzise gefertigte UHPFRC-Einlagen erleichtert werden kann.

1.5.2 Experimentelle Untersuchungen zum Lasttragverhalten von trockenverleimten Zahnverbindungen (iBMB)

Um das Lasttragverhalten von trockenverleimten Zahnverbindungen von Schalensegmenten mit einer Plattenstärke von nur 15 mm zu untersuchen, wurden sieben verschiedene Testspecimen hergestellt. Das Verhältnis von Zahnhöhe zu Zahn-

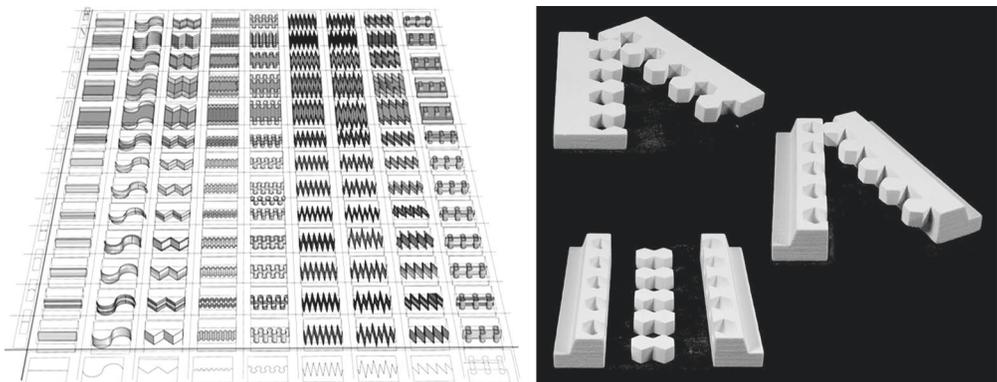


Bild 7: Herleitung geometrischer Fügungsmöglichkeiten (links) und ausgewählte Verzahnungsgeometrie als 3D-Druck (rechts, von oben nach unten: flache Verbindung, aufgeweitete Verbindung mit Zug- und Druckzone, fügungsoptimierte Verbindung mit zusätzlichen UHPFRC-Passstücken) | **Fig. 7:** Derivation of the geometric joining possibilities (left) and selected gearing geometries as 3D prints (right, from up to down: flat connection, expanded connection with tension and compression zone, joint-optimized connection with additional UHPFRC inlays)

entwickelt, welche sich durch den jeweiligen Form- und Kraftschluss unterscheiden. Wie in Bild 7 dargestellt, kann durch das Zusammenführen von vertikalen und horizontalen Schnittführungen im Stoßbereich eine Vielzahl an dreidimensionalen Fügegeometrien hergeleitet werden. Im folgenden Schritt wurden die Verbindungstypen auf ihre Fügbarkeit in unterschiedlichen Fügungsrichtungen und die grundsätzliche Fähigkeit zur Kraftübertragung für Normalkraft, sowie begrenzt Biegung und Querkraft, beurteilt.

Geeignet erscheinende Fügertypen wurden als physische Modelle im 3D-Druckverfahren in Gips hergestellt und auf ihre Funktionalität hin überprüft. Eine Auswahl schwalbenschwanzartiger Verbindungen zeigt Bild 7 (rechts). Solche quer zur Schalenebene fügbaren Verbindungen erlauben die Übertragung von Druck- und auch Zugkräften durch eine Verzahnung der Elemente. Das mittlere Beispiel in Bild 7 (rechts) verdeutlicht, wie mit einer Aufdickung auch der Hebelarm für eine gewisse Momententragfähigkeit im Stoßbereich erreicht werden kann. Im rechten unteren Bild wird gezeigt, wie die Fügbarkeit auf der Baustelle durch separate passgenaue UHPFRC-Passstücke erleichtert werden kann.

1.5.2 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten trocken gestoßener Zahnverbindungen (iBMB)

Zur Überprüfung der Tragfähigkeit trockener Verzahnungen von Schalensegmenten von nur

width and the angle of the teeth were varied in each case. Fig. 8 (left) shows the test specimen with a tooth width of 4 cm and a tooth depth of 2 cm. The UHPFRC test specimens produced were manufactured with a tolerance of ± 0.05 mm and a conical angle of 2° perpendicular to the surface, so that the teeth fitted into each other almost slidingly. By applying pressure from the outside, the teeth could be pressed together to create a form-fit connection (2nd image in Fig. 8). In order to investigate the influence of the compression on the teeth (micro-crack formation) and to check the production-related fibre orientation in the teeth, parts of the samples were visualized in the computer tomograph (CT) of the iBMB. The results are displayed in detail on the right side of Fig. 8. The evaluation has shown that a homogeneous fibre penetration of the tooth area is achieved. The joining of the teeth under pressure is successful in the central area of the sample without damage, but crack formation cannot be excluded in the edge zone of short tooth sections. When designing the toothing, it must therefore be ensured that it always ends on a full tooth in the edge region.

In the further progress, different plane, jointed plate cut-outs were tested at the iBMB for their load-bearing capacity under axial pressure as well as in four-point bending tensile tests and in shear tests [21]. It could be determined that good load-bearing capacities can be achieved in pure compression tests with all tooth bar connections. In the flexural tensile tests, how-

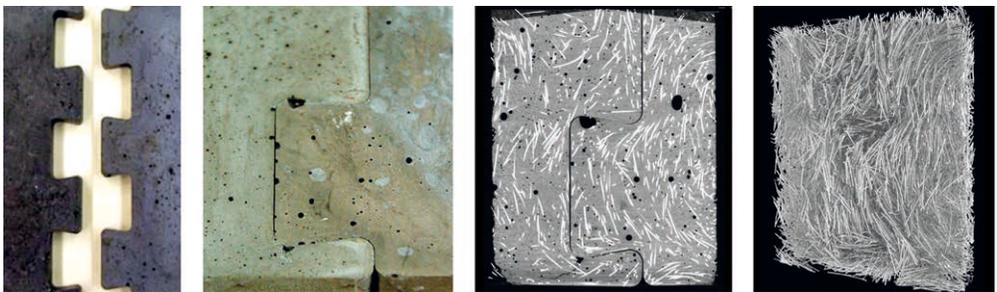


Bild 8: Flächige UHPFRC-Verbindung; v. l. n. r.: Proben mit Zähnen, Detail Verzahnung nach Fügen durch Zusammenpressen mit 5 kN, Prüfung auf Fehlstellen im CT mit erkennbarer Rissbildung im unteren linken Viertelzahn, visualisierte 3D-Faserverteilung des UHPFRC im Zahnbereich | **Fig. 8:** Flat UHPFRC connection; f.l.t.r.: test specimen with teeth, detail of toothing after joining by pressing together with 5 kN, check for defects via CT with visible crack formation in the lower left quarter of the tooth, visualized 3D fibre distribution of the UHPFRC in the tooth region

15 mm Plattendicke wurden insgesamt sieben verschiedene Typen von Versuchskörpern hergestellt, wobei das Verhältnis von Zapfenhöhe zu Zapfenbreite sowie der Winkel der Zapfen jeweils variiert wurden. Bild 8 (links) zeigt den Versuchskörper mit einer Zapfenbreite von 4 cm und einer Zapfentiefe von 2 cm. Die so hergestellten UHPFRC-Versuchskörper wurden mit einer Toleranz von $\pm 0,05$ mm und einem senkrecht zur Fläche konischen Winkel von 2° gefertigt, sodass die Verzahnungen nahezu gleitend ineinanderpassten. Durch von außen aufgebrachtem Druck konnte die Verzahnung zusammengepresst werden, um eine formschlüssige Verbindung zu schaffen (2. Teilbild von links in Bild 8). Um den Einfluss des Zusammenpressens auf die Verzahnungen (Mikrorissbildung) zu untersuchen und die herstellungsbedingte Faserorientierung in den Zähnen zu überprüfen, wurden Teile der Versuchskörper im Computertomografen (CT) des iBMB visualisiert. Die Ergebnisse der CT-Untersuchung sind auszugsweise rechts in Bild 8 dargestellt. Die Auswertung hat ergeben, dass eine homogene Faserdurchsetzung des Zahnbereichs gelingt. Das Fügen der Verzahnung unter Druck gelingt im Zentralbereich der Probe schadensfrei, im Randbereich kurzer Zahnausschnitte kann eine Rissbildung aber nicht ausgeschlossen werden. Bei der Ausbildung der Verzahnung sollte deshalb darauf geachtet werden, dass diese im Randbereich immer auf einem Vollzahn endet.

Im weiteren Verlauf der ersten Förderperiode wurden am iBMB unterschiedliche ebene, gefügte Plattenausschnitte unter axialem Druck sowie im Vierpunkt-Biegezugversuch und in Scherversuchen auf ihre Tragfähigkeit geprüft [21]. Es konnte festgestellt werden, dass im reinen Druckversuch mit allen Zahnleistenverbindungen gute Tragfähigkeiten erreicht werden können. Bei den Biegezugversuchen zeigte sich jedoch, dass ein Neigungswinkel der Zähne quer zur Platte zwischen 10° und 20° für die Übertragung der Zugkräfte am besten geeignet ist. Durch die zusätzliche Aufdoppelung des Querschnittes war es sogar möglich, die Tragfähigkeit der nicht gestoßenen Referenzplatte zu erreichen. Dabei konnten neben monolithi-

ever, it was found that an angle of inclination of the teeth transverse to the plate between 10° and 20° is best qualified for the transmission of tensile forces. By additionally doubling the cross-section, it was even possible to achieve the load-bearing capacity of the non-jointed reference plate. In addition to monolithic teeth, UHPFRC inlays could also be integrated. The shear force bearing capacity of the inlays also reaches that of the monolithic tooth connection. Therefore, the inlays are well suited for joining geometrically complex elements.

The most load-bearing combinations of tooth length to tooth width and tooth angle determined in test series served as a basis for the further development of this connection type. By comparing the load-bearing capacity with the internal forces determined on the undisturbed model structure, it has been pre-dimensioned and optimized. The determination of internal forces was carried out with the help of the methods developed in SPP 1542 by Bletzinger at Technical University of Munich (e.g. [22] and p. 18 et seq. in this book), which are implemented in the program Carat++. With these methods, it is also possible to optimize the sectioning of shell elements.

2 Second funding period

2.1 Introduction

In the second funding period, the two institutes collaborated on the subproject *“From Structural Joining to Lightweight Structures: Hybrid, dry-fit beam, surface and spatial structures made of UHPFRC”*. The main focus of the investigations was to transfer the novel joints for UHPFRC elements developed in the first project phase into high-performance lightweight beam, plate and spacial load-bearing elements. The declared aim was to increase the load-bearing capacity of elements and structures by a smart coupling of individual modularly designed beam and planar elements to hybrid, interacting load-bearing elements and systems. By combining dry-jointed beams with shear-resistant, flat or curved

schen Zähnen auch Passstücke aus UHPFRC verwendet werden. Die Querkrafttragfähigkeit der Passstücke erreicht dabei ebenfalls die der monolithischen Zahnleistenverbindung. Daher eignen sich die Passstücke besonders gut für geometrisch komplexe Fügebauteile.

Die in Versuchsreihen ermittelten tragfähigsten Kombinationen von Zahnlänge zu Zahnbreite sowie Zahnwinkel dienten als Grundlage für die Weiterentwicklung dieses Verbindungstyps. Durch Vergleich der Tragfähigkeit mit den am ungestörten Modelltragwerk ermittelten Schnittgrößen erfolgt seine Vordimensionierung und Optimierung. Die Ermittlung der Schnittgrößen erfolgte mit Hilfe der im SPP 1542 von Bletzinger an der TU München entwickelten Methoden (z. B. [22] und S. 18 ff. in diesem Buch), welche im Programm Carat++ implementiert sind. Mit diesen Methoden ist es zudem möglich, die Schnittführungen von Schalelementen zu optimieren.

2 Zweite Förderperiode

2.1 Einleitung

In der zweiten Förderperiode wurde von den beiden Instituten das Teilprojekt „Von der Bauteilfügung zu leichten Tragwerken: Hybride, trocken gefügte Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC“ bearbeitet. Schwerpunkt der Untersuchungen war es, die in der ersten Projektphase entwickelten neuartigen Verbindungen für UHPFRC-Bauteile in leistungsfähige leichte Stab-, Flächen- und Raumtragelemente zu überführen. Erklärtes Ziel war die Steigerung der Traglasten von Bauteilen und Tragwerken durch intelligente Kopplung einzelner modular aufgebauter Stab- und Flächenelemente zu hybriden, zusammenwirkenden Tragelementen und -systemen. Durch Kombination von trocken gestoßenen Stäben mit schubfest verbundenen, ebenen oder gekrümmten Flächenelementen sollte so die Realisierbarkeit einer Vielzahl baupraktisch relevanter Tragwerkstypen von überwiegend biegebeanspruchten Tragwerken hin zu formoptimierten Schalen nachgewiesen

planar elements, the feasibility of a variety of structural types relevant to building practice was to be demonstrated, ranging from predominantly bending-stressed structures to form optimized shells. The basic principles of the first funding period were retained:

- Use of UHPFRC to improve tensile strength and post-breaking behaviour,
- Precisely fitting dry butt joints and
- Efficient material utilization through systematic pretensioning.

Since not all conceivable combinations of beams and planes could be investigated in their geometric diversity in this research project, three cases relevant to building practice were selected from the possible load-bearing element combinations:

- Joining of beam and planar elements to form an uniaxial prestressed T-beam element [23],
- Joining of beam and a planar element to an orthogonal, biaxial prestressed planar structure (section of a coffered ceiling) [24] and
- Joining of beam and planar elements to curved spatial structures [25].

2.2 Modular, dry-jointed T-beam element

2.2.1 Idea und material (ITE/iBMB)

By combining planar surface and linear beam elements, a uniaxial tensioned T-beam structure was developed at ITE (Fig. 9) which represents a section of a uniaxial tensioned load-bearing system. The six plate elements were joined to the beam by toothed bar connections. The beams and plates were connected to each other with the UHPFRC inlays already developed.

For the production of modular, thin-walled, joined UHPFRC components, a commercially available, easily processible ready-mixed concrete product with self-levelling properties was used in the 2nd funding period due to the required concrete quantities and better availability (Table 3). The mean material properties of the UHPFRC ND-2,5 determined at the iBMB are

werden. Die Grundlagen der ersten Förderperiode wurden dabei beibehalten:

- Verwendung von UHPFRC zur Verbesserung der Zugtragfähigkeit und des Nachbruchverhaltens,
- Passgenaue Trockenstoßverbindungen sowie
- Effiziente Materialausnutzung durch planmäßige Vorspannung.

Da in diesem Forschungsprojekt nicht alle denkbaren Kombinationsmöglichkeiten von Stäben und Flächen in ihrer geometrischen Vielfalt untersucht werden konnten, wurden für die Arbeiten exemplarisch drei für die Baupraxis relevante Fälle aus den möglichen Tragelementkombinationen ausgewählt:

- Fügung von Stab- und Flächenelementen zu einem einachsigen vorgespannten Plattenbalkenelement [23],
- Fügung von Stab- und Flächenelementen zu einem orthogonalen, zweiachsigen vorgespannten Flächentragwerk (Ausschnitt eines Gitterrostes) [24] und
- Fügung von Stab- und Flächenelementen zu gekrümmten Raumtragwerken [25].

2.2 Modulares, trocken gefügtes Plattenbalkenelement

2.2.1 Idee und Material (ITE/iBMB)

Durch Zusammenführung von ebenen Flächen- und linienförmigen Balkenelementen wurde am ITE ein zusammenwirkendes Bauteil in Form eines einachsigen gespannten Plattenbalkens entwickelt (Bild 9), der einen Ausschnitt aus einem einachsigen spannenden Tragsystem darstellt. Die sechs Plattenelemente wurden mittels Zahnleistenverbindungen mit dem Balken zusammengefügt. Untereinander wurden Balken und Platten mit den bereits untersuchten UHPFRC-Passstücken verbunden.

Für die Herstellung modularer, dünnwandiger, gefügter UHPFRC-Bauteile wurde in der zweiten Förderperiode aufgrund der benötigten Betonmengen und besseren Verfügbarkeit auf

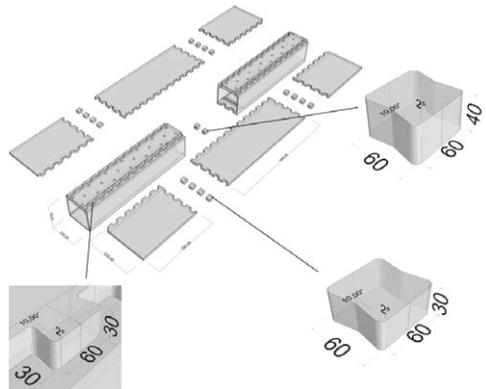


Bild 9: Fügeprinzipien für den UHPFRC-Plattenbalken mit UHPFRC-Passstücken und Zahnleistenverbindungen | **Fig. 9:** Joining system for UHPFRC T-beam with UHPFRC inlays and tooth joints

shown in Table 4. For dimensioning and calculation of the individual elements, the mean values from the standard tests were used.

2.2.2 Production of modular T-beams (ITE/iBMB)

As the modular design of the dry-jointed T-beam required exact element dimensions, with even slight deviations of the individual elements disabling the assembly of the entire structure, great importance had to be attached to dimensional accuracy in the design of the formwork and its production. To meet this requirement, some preliminary tests with CNC-milled polyurethane panels made of obomodulan® of different densities were carried out and evaluated at ITE.

The different formworks as well as the geometries of the concrete components were scanned with optical measuring technology in cooperation with the company GOM and compared with the digital models. The evaluation of these preliminary tests showed that obomodulan® with a density of 700 kg/m³ is perfectly suited for the production of the formwork for the individual slab beam components. Further reasons for this are the mechanical properties of obomodulan®, which allow to provide joining techniques for the individual formwork components such as Rampa® sleeves, internal threads and fitting grooves. In addition, the material has a fine,

Ausgangsstoffe Components	Anteil Portion in [kg/m ³]
NANODUR® Compound 5941 Grau Grey	1.100
Halterner Quarzsand H33 Halterner quartz sand H33	1.012
Mikro-Stahldrahtfasern Micro Steel Wire Fibres STRATEC Weidacon (2,5 Vol.-%; d / l = 0,18 / 11 mm)	192
Fließmittel Superplasticizer GRACE ADVA® Flow 375	21
Schwindreduzierer Shrinkage reducer GRACE Eclipse® Floor	7
Wasser Water	159

Tabelle 3: Ausgangsstoffe für den UHPFRC ND-2,5 für Bauteilversuche | **Table 3:** Mix design for the UHPFRC ND-2,5 for component tests

Kennwerte Material properties	Mittelwerte Mean values
Zylinderdruckfestigkeit Cylinder compressive strength ¹	138 MPa
Einachsige Zugfestigkeit Uniaxial tensile strength ¹	9 MPa
Biegezugfestigkeit Bending tensile strength ²	17 MPa
Elastizitätsmodul Modulus of elasticity ³	49,2 GPa

¹ Zylinder | Cylinder d / h = 80 / 160 mm, ² Prisma | Prism b / h / l = 40 / 40 / 160 mm, ³ Zylinder | Cylinder d / h = 150 / 300 mm

Tabelle 4: Materialkennwerte des UHPFRC ND-2,5 | **Table 4:** Material properties of UHPFRC ND-2,5

ein kommerzielles Produkt als Fertigmischung zurückgegriffen, welches selbstnivellierende Eigenschaften besitzt und sich einfach verarbeiten lässt (Tabelle 3). Die am iBMB ermittelten mittleren Materialkennwerte des UHPFRC ND-2,5 sind in Tab. 4 dargestellt. Für die Dimensionierung und Bemessung der einzelnen Bauteile wurden die Mittelwerte aus den Standardversuchen verwendet.

2.2.2 Herstellung modularer Plattenbalken (ITE/iBMB)

Da die modulare Bauweise des trocken gefügten Plattenbalkens exakte Elementabmessungen erforderte, wobei schon geringe Abweichungen der einzelnen Bauteile das Fügen zu einer Gesamtstruktur unmöglich machen, musste bei dem Konzept der Schalung und deren Herstellung großer Wert auf die Maßgenauigkeit gelegt werden. Um dem gerecht zu werden, wurden am ITE einige Vorversuche mit CNC-gefrästen Polyurethanplatten aus obomodulan® verschiedener Dichten durchgeführt und ausgewertet.

Die verschiedenen Schalungen sowie die Geometrien der Betonbauteile wurden in Koopera-

closed-pore structure, can be used multiple times, and is easily machinable. Therefore, the entire formwork for the T-beam was manufactured from obomodulan® panels using a 3-axis CNC milling machine.

As the T-beam was designed in a modular way, only one-half of the beam formwork had to be produced for the entire length of the T-beam. This meant that two casting cycles were required to produce a complete beam. After manufacturing the individual formwork parts and joining them to the complete beam formwork, the two halves of the beam were concreted at the iBMB. The concreting concept of the beams was that the concreting should be done standing, because all toothed strips had to be formwork facing sides and the thickness of the beams should also remain within a permissible tolerance. For the production of the six single plates, three different double-faced formworks were milled from obomodulan® plates.

For the beams, all sides should be formwork-facing sides in order to meet the high accuracy requirements, although this made concreting considerably more complex. Except

tion des ITE mit der Firma GOM mit optischer Messtechnik erfasst und mit den digitalen Modellen verglichen. Die Auswertung dieser Vorversuche hat ergeben, dass sich obomodulan® mit einer Dichte von 700 kg/m^3 hervorragend für die Erstellung der Schalung für die einzelnen Plattenbalkenkomponenten eignet. Weitere Gründe hierfür sind die mechanischen Eigenschaften des obomodulan®, welche es ermöglichen, Verbindungstechniken für die einzelnen Schalungsteile wie Rampa®-Muffen, Innengewinde und Passnuten vorzusehen. Zusätzlich besitzt das Material eine feine, geschlossensporige Struktur, es kann mehrmalig verwendet werden und ist gut zerspanbar. Daher wurde die gesamte Schalung des Plattenbalkens aus obomodulan®-Platten mithilfe einer 3-Achs-CNC-Fräsmaschine hergestellt.

Da der herzustellende Plattenbalken modular aufgebaut war, wurde lediglich eine Hälfte der Balkenschalung für die gesamte Länge des Plattenbalkens gefertigt. Es waren somit zwei Betonagen notwendig, um einen kompletten Balken herzustellen. Nach Herstellung der einzelnen Schalungsteile und deren Fügung zu einer Balkenschalung wurden die beiden Balkenhälften am iBMB betoniert. Das Betonaagekonzept der Platten sah vor, dass stehend betoniert werden sollte, da alle Zahnleisten Schalseiten sein mussten und die Dicke der Platte ebenfalls in einer zulässigen Toleranz bleiben sollte. Für die Herstellung der sechs Einzelplatten wurden demnach drei verschiedene, jeweils zweihäuptige Schalungen aus obomodulan®-Platten gefräst.

Beim Balken sollten möglichst alle Seiten Schalseiten sein, um den hohen Genauigkeitsansprüchen gerecht zu werden, was die Betonaage jedoch erheblich erschwerte. Bis auf eine kleine Einfüllöffnung am späteren Auflager des Plattenbalkens waren alle innen- und außenliegenden Betonseiten Schalseiten. In Bild 10 ist die fertige und zum Teil bereits ausgeschaltete Hälfte des Balkens dargestellt. Trotz des Versuches der Entlüftung über ein Schrägstellen der Schalung hat die aufsteigende Luft in den oberen ca. 5 mm des Querschnittes zu deutlichen Verdichtungsporen geführt (Bild 11). Die



Bild 10: Gegossener Balken in der Schalung | Fig. 10: Cast beam in formwork

for a small filling opening at the later support of the T-beam, all inner and outer concrete sides were formwork-facing sides. Fig. 10 shows the finished and partly already stripped half of the beam. Despite the attempt to vent the air by inclining the formwork, the rising air in the upper approx. 5 mm of the cross-section led to significant compaction pores (Fig. 11). The upper side of the cast later became the bottom side of the beam. During the joining of the T-beam section at the iBMB, the individual parts could be moved, put together, and joined by hand. The inlays were driven into the underside of the plate beam using a plastic hammer with no damage to the structure (Fig. 11).

2.2.3 Experimental investigations on the load-bearing behaviour of dry-jointed T-beams (iBMB)

In total, tests were carried out on three dry-jointed T-beams (in the following: PB). Each hollow box-shaped PB was 3.0 m long and 1.3 m wide, had a height of 35 cm and a width of 33 cm. The wall thickness for PB1 and PB2 was



Bild 11: Fügung mit UHPFRC-Passstücken auf der Unterseite des Plattenbalkens in der Zugzone | Fig. 11: Joining with UHPFRC inlays under the T-beam in the tension zone

Betonieroberseite bildete später die Balkenuntersicht. Während des Zusammenfügens des Plattenbalkenquerschnitts am iBMB konnten die Einzelteile per Hand bewegt, zusammengesteckt und gefügt werden. Die Passstücke wurden auf der Unterseite des Plattenbalkens mit einem Kunststoffhammer ohne Schädigung der Struktur eingeschlagen (Bild 11).

2.2.3 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten an trocken gestoßenen Plattenbalken (iBMB)

Insgesamt wurden Versuche an drei trocken gestoßenen Plattenbalken (PB) durchgeführt. Jeder PB war 3,0 m lang und insgesamt 1,3 m breit. Jedes hohlkastenförmige Balkenelement hatte eine Höhe von 35 cm und eine Breite von 33 cm. Die Wandstärke bei PB1 und PB2 betrug 1,5 cm und wurde bei PB3 auf 2,5 cm erhöht. Die an den oberen Längskanten des Balkens aufgesetzten Platten hatten eine Dicke von 3,0 cm und eine Breite von 53,5 cm bei einer Länge von 144 bzw. 78 cm (Bild 9). Die horizontale Vorspannung im Balken wurde mit einem eigens konfektionierten Carbonstab mit einer Zugfestigkeit von 1,8 MN realisiert, der am Spannanker (Bild 12) mit 24 M16-Schrauben per Drehmomentschlüssel definiert vorgespannt wurde. Die Vorspannung verlief in der halben Höhe des Balkenelements und folglich außerhalb der Schwerachse des kompletten Plattenbalkens, wodurch ein der äußeren Belastung und dem Eigengewicht entgegenwirkendes Moment entstand. Die vertikale Lasteinleitung erfolgte im 4-Punkt-Biegeversuch in den Drittelpunkten über Lasttraversen gleichzeitig auf Balken- und Plattenelemente (Bild 12). Die Probekörper waren gelenkig

1.5 cm and was increased to 2.5 cm for PB3. The panels placed on the upper longitudinal edges of the beam had a thickness of 3.0 cm and a width of 53.5 cm with a length of 144 and 78 cm respectively (compare Fig. 9). The horizontal prestressing in the beam was realized with a specifically produced carbon rod with a tensile strength of 1.8 MN, which was pretensioned at the tension anchor (Fig. 12) with 24 pcs. M16-bolts by using a torque wrench. The pretensioning took place at half the height of the beam element and thereby outside the centre of gravity of the complete T-beam, resulting in a moment that counteracted the external load and the dead weight. In the 4-point bending test, the vertical load was applied simultaneously to the beam and plate elements at the one-third points by traverses (Fig. 12). The test specimens were articulated and preloaded with 27% or, in the case of PB3, 22% of the cylinder compressive strength in relation to the beam cross-sectional area in order to achieve a high bending load capacity.

The dimensioning of the elements was carried out with the aim of generating the failure beyond the joining areas. PB1 showed a shear force failure (Fig. 13) in the web. Due to a non-optimal fibre distribution, only a single large shear crack under approx. 23° was formed. The picture also shows an opening bending crack in the lower right corner, indicating an imminent failure of the tensile zone. In order to avoid another shear force failure due to the thin wall thickness, PB2 was strengthened by a carbon fibre fabric in the shear force area (Fig. 12), and in PB3 the wall thickness was increased in the webs and in the tensile zone. As a result, the load on PB2 and PB3 raised by 9% and a failure of the UHPFRC inlays in the tensile zone was achieved. In addition, PB3 showed a compression failure of the web and a significantly stiffer overall load-bearing behaviour due to the larger cross-section (Fig. 14).

The planning of the tests involved the checks for normal force, bending and shear force of all cross-sectional sub-areas with the same external load. The geometry of the test specimens had been designed accordingly. Therefore, after the exclusion of the shear force failure in the



Bild 12: Versuchsaufbau; dargestellt ist der mit CF-Gelege verstärkte Plattenbalken PB2 | **Fig. 12:** Test setup; here: T-beam PB2 strengthened with CF-sheets

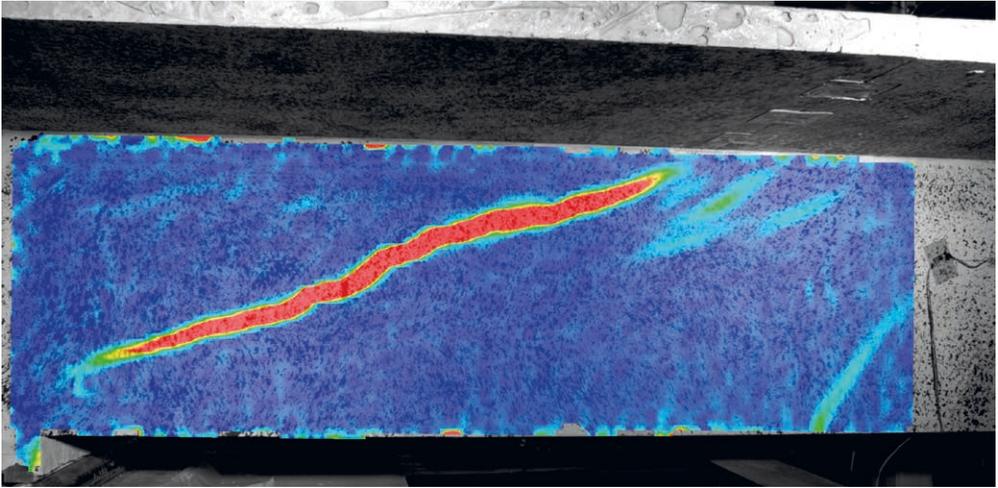


Bild 13: Mittels Photogrammetrie sichtbar gemachte Verformungen des Steges von PB1, blau: Bereich ohne Zugverformung, rot: Zugdehnungen | **Fig. 13:** Photogrammetric measured deformations on the web of PB1, blue: area without tensile deformations, red: tensile strains

gelagert und mit 27 % bzw. bei PB3 mit 22 % der Zylinderdruckfestigkeit bezogen auf die Balkenquerschnittsfläche vorgespannt, um eine hohe Biegetragfähigkeit zu erreichen.

Die Dimensionierung der Bauteile erfolgte mit dem Ziel, das Versagen außerhalb der Fügstellen zu erzeugen. PB1 zeigte ein Querkraftversagen (Bild 13) im Steg. Aufgrund einer nicht optimalen Faserverteilung bildete sich dabei nur ein einzelner großer Schubriss unter ca. 23° aus. Im Bild ist ebenfalls ein sich öffnender Biegeriss rechts unten zu erkennen, der ein baldiges Versagen der Zugzone andeutet. Um aufgrund der dünnen Wandstärke ein erneutes Querkraftversagen zu vermeiden, wurde PB2 mit einem Kohlefasergelege im Querkraftbereich verstärkt (Bild 12) und bei PB3 die Dicke der Wandung in den Stegen und in der Zugzone erhöht. Dies führte dazu, dass bei PB2 und PB3 die Last um 9 % gesteigert werden konnte und ein Versagen der UHPFRC-Passstücke in der Zugzone erzeugt wurde. Zusätzlich kam es bei PB3 zu einem Druckversagen des Stegs und aufgrund des größeren Querschnittes zu einem deutlich steiferen Gesamttragverhalten (Bild 14).

Bei der Versuchsplanung waren die Nachweise für Normalkraft, Biegung und Querkraft aller

web (Fig. 13), the load capacity for PB2 and PB3 could be increased only slightly. For PB2 and PB3, the UHPFRC inlays failed in the tension zone with an opening of the joint in the middle of the beam. Both the beginning of the opening of the joint and the opening of the shear force crack in PB1 were characterized by a strong increase of the deflections (Fig. 14). Since the inlays of PB3 were taken over from PB2, the maximum tensile force in the now enlarged tensile zone could not be completely transmitted through the joint and PB3 failed without a bending crack in the beam. It would therefore have been possible to further increase the load capacity by thickening the joint area once again.

The results of the plate beam tests have shown that it is possible to produce high-performance

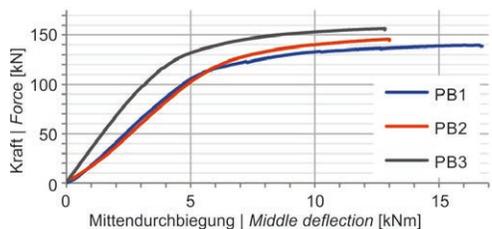


Bild 14: Kraft-Durchbiegungsdiagramm für 4-Punkt-Biegeversuche an UHPFRC-Plattenbalken | **Fig. 14:** Force deflection curve for 4-point bending tests on UHPFRC T-beams

Querschnittsteilbereiche mit derselben äußeren Belastung durchgeführt und die Probekörper geometrisch entsprechend ausgelegt worden. Es konnte daher nach dem Ausschließen des Querkraftversagens im Steg (Bild 13) die Traglast bei PB2 und PB3 nur noch geringfügig gesteigert werden. Bei PB2 und PB3 kam es zu einem Versagen der UHPFRC-Passstücke in der Zugzone und der Öffnung der Stoßfuge in Balkenmitte. Sowohl der Beginn des Öffnens der Stoßfuge sowie das Aufgehen des Querkrafttrisses bei PB1 sind durch eine starke Zunahme der Durchbiegungen gekennzeichnet (Bild 14). Da bei PB3 die Passstücke von PB2 übernommen wurden, konnte die maximale Zugkraft in der nun vergrößerten Zugzone nicht vollständig über die Fügung übertragen werden und PB3 versagte ohne einen Biege- riss im Balken. Es wäre somit möglich gewesen, durch eine nochmalige Aufdickung des Stoßbe- reichs die Traglast weiter zu steigern.

Die Ergebnisse der PB-Tests haben gezeigt, dass die Herstellung von leistungsfähigen Bauteilen aus modularen Bauelementen mit einer gerin- gen Wanddicke von 15 mm möglich ist. Der Faserverteilung kommt dabei eine große Bedeu- tung zu. Der Anschluss der Platten an den Balken durch neuartige Zahnleistenverbindungen hat sich als eine sehr effektive Bauweise erwiesen. Die UHPFRC-Passstücke und Zahnleistenverbin- dungen wurden durch den Fügeprozess nur sehr gering beansprucht und konnten nach dem Ver- such wieder problemlos demontiert werden. Für die Prüfung von PB2 wurden beispielsweise die Plattenelemente von PB1 wiederverwendet. Mit UHPFRC-Passstücken und einer lokalen Aufdik- kung war es möglich, die gesamte Kraft des un- gestörten Querschnittes zu übertragen. Daher empfiehlt sich eine solche Aufdickung besonders an hoch querkraft- und biegebelasteten sowie geometrisch komplexen Fügstellen.

2.3 Modularer, trocken gefügter Gitterrost

2.3.1 Formfindung und Dimensionierung des Gitterrostes (ITE/iBMB)

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Überfüh- rung der Erkenntnisse aus der Planung, Herstel-

components from modular elements with a low wall thickness of 15 mm. Fibre distribution is of great importance in this process. The connec- tion of the plates to the beam by means of novel toothed bar joints has proven to be a very effec- tive construction method. The UHPFRC fitting pieces and toothed bar joints were subjected to very little stress during the joining process and could be disassembled without any problems after the test. For the testing of PB2, for ex- ample, the plate elements of PB1 were reused. With UHPFRC inlays and a local thickening it was possible to transmit the entire force of the undisturbed cross-section. Such a thickening is therefore particularly recommended for joints subject to high lateral force and bending loads as well as geometrically complex joints.

2.3 Modular, dry-jointed coffered ceiling

2.3.1 Design process and dimensioning of the coffered ceiling (ITE/iBMB)

The aim of this work package was to transfer the findings from the design, production and testing of the T-beam by orthogonal transfor- mation into a biaxial prestressed coffered ceil- ing with UHPFRC plate elements also joined in a shear-resistant manner [23]. The integrat- ed beams were joined orthogonally, with the joints being made at the crossing points of the beams. The shear-resistant integration of plate elements into the plane biaxial tensioned sup- porting structure gave the hybrid structure in- creased stiffness and allowed material-efficient construction. The biaxial prestressing allowed thin UHPFRC plates to be used as infill panels. The load assumptions defined by the iBMB as a basis for the development of the joints and elements were again selected for a reference structure in multi-storey buildings. The panel element dimensions were based on the max- imum transport sizes for road transport. The section of the structure shown in red in Fig. 15 was examined, whereby the element length was limited to approx. 1.5 m for handling considera- tions. The schematic sketch shows the structure of the framework with the segmentation lines serving as a starting point for the investigation.

lung und Prüfung des Plattenbalkens durch orthogonale Transformation in einen zweiachsig vorgespannten Gitterrost mit ebenfalls schubfest gefügten Plattenelementen aus UHPFRC [23]. Die integrierten Balken wurden orthogonal gefügt, wobei die Fügungen in den Kreuzungspunkten der Balken erfolgten. Durch die schubsteife Integration von Plattenelementen in das ebene zweiachsig gespannte Tragwerk erhielt das so entstehende Hybridtragwerk eine höhere Steifigkeit und konnte materialeffizient hergestellt werden. Durch die zweiachsige Vorspannung war es möglich, dünne UHPFRC-Platten als Ausfachungen der Flächen zu verwenden. Die vom iBMB definierten Lastannahmen als Grundlage für die Entwicklung der Fügungen und Bauteile wurden wiederum für ein Referenztragwerk im Geschosshochbau gewählt. Die Plattenelementabmessungen orientierten sich an den maximalen Transportgrößen für den Straßentransport. Es wurde der in Bild 15 rot gekennzeichnete Tragwerksausschnitt untersucht, wobei aus Handhabungsgründen die Elementlänge auf ca. 1,5 m begrenzt wurde. Die Prinzipskizze zeigt den grundlegenden Aufbau des stabwerkintegrierten Flächentragwerks mit den Fügekanten als Ausgangspunkt für die Untersuchung.

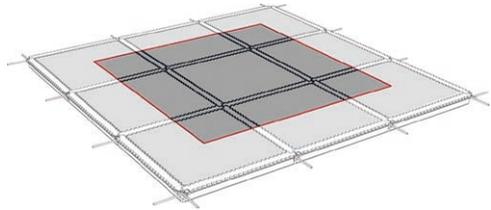


Bild 15: Prinzipskizze des zweiachsigen orthogonalen Tragsystems als ebenes Flächentragwerk im Gesamtsystem; die rote Markierung zeigt den gewählten Tragwerksausschnitt | **Fig. 15:** Principle sketch of the two-axis orthogonal load-bearing system as a planar surface supporting structure in the overall system; the red marking shows the selected supporting structure section

For the determination of the shape of the coffered ceiling, different parameters were identified at ITE and recombined to a matrix of possible solutions (Fig. 16, left). These were in particular the definition of the position and the shaping of the inner corners of the crossing beams, the possible arrangement of additional nodes (marked in violet) and the degree of modularization of the overall construction into its individual elements. Finally, the lowest total number of types required and the number of components were decisive for the choice of the system (Fig. 16, right). The basic cross-sections of the selected system were based on the previously designed and tested T-beams.

Für die Formfindung des Gitterrosts wurden am ITE verschiedene Parameter identifiziert und zu einer Matrix möglicher Lösungen kom-

The selected coffered ceiling consists of four modular carrier segments (cross-modules) and nine plate components, which are joined

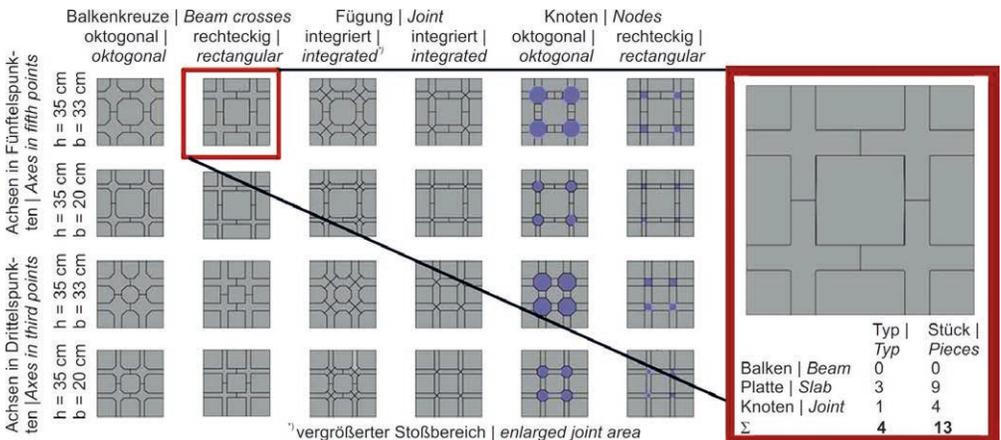


Bild 16: Matrix der möglichen und des gewählten Systems des Gitterrosts | **Fig. 16:** Matrix of possible and the chosen system of coffered ceiling

biniert (Bild 16, links). Dies waren insbesondere die Definition der Lage und die Ausformung der Innenecken der sich kreuzenden Balken, die mögliche Anordnung zusätzlicher Knoten (violett markiert) und der Grad der Modularisierung der Gesamtkonstruktion in ihre einzelnen Segmente. Die geringste Gesamtzahl der benötigten Typen und die Anzahl der Komponenten waren schließlich ausschlaggebend für die Wahl des Systems (Bild 16, rechts). Die grundlegenden Querschnitte des gewählten Systems orientierten sich an dem zuvor entworfenen und geprüften Plattenbalken.

Der gewählte Gitterrost besteht aus vier modularen Trägersegmenten (Kreuzmodulen) und neun Plattenkomponenten, die über Zahnleistenverbindungen miteinander verbunden sind. Er stellt einen Querschnitt eines biaxial gespannten Tragsystems dar. Die Gesamtabmessung des Profils beträgt 300×300 cm. Die Hohlbalken haben eine Größe von 35×25 cm und Wandstärken von 2,5 cm (Seitenwände) bzw. 5 cm (Deckplatte). Alle Platten haben eine Dicke von 3 cm. Bild 17 (oben) zeigt den montierten Gitterrost aus UHPFRC-Bauteilen, bei dem die Platten und die Kreuzmodule trocken gefügt und vorgespannt wurden.

2.3.2 Schalungsbau- und Fertigungskonzept (ITE)

Die komplexe Produktion der einzelnen Betonfertigteile wurde durch den *digital workflow* ermöglicht. Dieser wurde im Rahmen des Projektes entwickelt und besteht im Wesentlichen aus der digitalen Planung mit 3D-CAD-Modellen, deren FEM-Berechnung, der entsprechenden Überarbeitung der digitalen Modelle und der nachfolgenden Generierung und Modifikation von Datensätzen für die CNC-gesteuerte Fertigung. Die Umsetzung der neuartigen Bauweise erfordert eine äußerst präzise Herstellung der einzelnen Komponenten. Die geforderte Maßhaltigkeit der Bauteile wurde durch den konsequenten Einsatz dieser präzisen CNC-gesteuerten Fertigungsprozesse mit Fertigungstoleranzen im Zehntelmillimeterbereich erreicht, die den Anforderungen des Maschinenbaus entsprechen.

by toothed bar connections. It represents a cross-section of a biaxial tensioned bearing structure. The overall dimensions of the profile are 300×300 cm. The hollow beams have a size of 35×25 cm and wall thicknesses of 2.5 cm (side walls) and 5 cm (top plate). All plates have a thickness of 3 cm. Fig. 17 (above) shows the assembled coffer ceiling made of UHPFRC elements, in which the plates and the cross-modules were dry-jointed and prestressed.

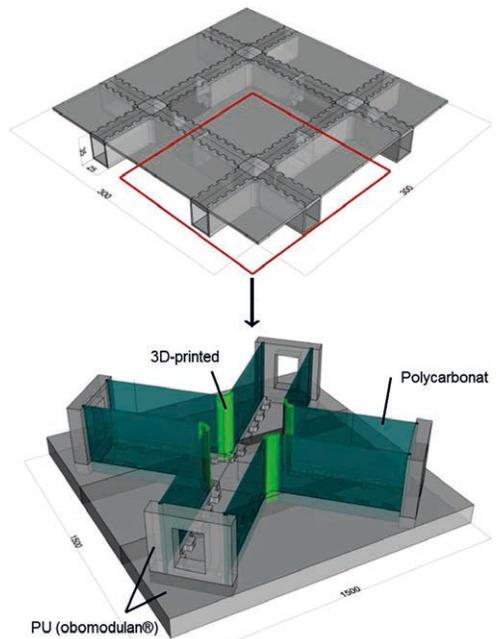


Bild 17: Ausschnitt (oben) und Schalungskonzept des Kreuzmoduls (unten) | Fig. 17: Section (top) and concept of the cross-module (bottom)

2.3.2 Formwork construction and manufacturing concept (ITE)

The complex production of the individual precast concrete elements was made possible by the *digital workflow*. This was developed within the framework of the research project and essentially consists of digital planning with 3D CAD models, their FEM calculation, the corresponding revision of the digital models and the subsequent generation and modification of data sets for CNC-controlled production. The

Zur Herstellung der Komponenten wurden vergleichend zwei subtraktive Fertigungsverfahren eingesetzt. Zum einen wurden die Schalungssegmente der Träger aus PU-Plattenmaterial gefertigt, das in 3-Achs-Bearbeitungszentren gefräst wurde. Zum anderen wurden die Geometrien der Platten mit dem 5-Achs-Wasserstrahlschneidverfahren aus zuvor gegossenen Rohlingen geschnitten. Darüber hinaus wurden die Schalungssegmente für die gerundeten Innenkanten der vier Kreuzmodule mit der FDM-Technologie (*Fused Deposition Modeling*) im 3D-Druck hergestellt.

2.3.3 Schalungskonstruktion für die Kreuzmodule (ITE/iBMB)

Die Herstellung der Schalung für die Kreuzmodule des Gitterrostes basierte auf den Erfahrungen des zuvor hergestellten Plattenbalkens. Bewährte Methoden und Technologien wurden beibehalten, z. B. die CNC-gefräste Grundplatte mit den Zahnleistenverbindungen und das Konzept des mit Schaumstoff beschichteten, modular aufgebauten Kerns, um diesen nach dem Betonieren und Schwinden des UHPFRC leicht entfernen zu können. Die vier Kreuzmodule wurden am iBMB nacheinander in derselben Schalung gegossen (Bild 17, unten), welche am ITE entwickelt und hergestellt worden war. Sie bestand aus vier verschiedenen Komponentengruppen:

- Die 150 × 150 × 10 cm große Grundplatte bestand aus drei kleineren PU-Platten à 50 × 50 × 10 cm, die verklebt und überfräst wurden. Alle Konturen, wie z. B. die Zahnkonturen und die Schlitz für die Seitenwände, wurden CNC-gefräst. Das gewählte Material war obomodulan® mit einer Dichte von 700 kg/m³. Unter der Grundplatte war eine Unterkonstruktion aus Aluminiumprofilen montiert. Sie verfügte über vier Räder für die notwendige Mobilität der Schalung sowie vier Hebeböcken, die zum Ausgleich und zur Fixierung der Schalung beim Betonieren benötigt wurden (Bild 19, a).
- Für die Wandsegmente der Schalung wurden drei verschiedene Materialien und Produktionsverfahren eingesetzt. Die vier Stirnplatten wurden aus dem gleichen Material wie die Grund-

implementation of the novel design requires an extremely precise production of the individual components. The required dimensional accuracy of the components was achieved by the consistent use of these precise CNC-controlled production processes with machining tolerances in the range of tenths of a millimetre, which meet the requirements of mechanical engineering.

For the production of the components, two subtractive manufacturing processes were used for comparison. On the one hand, the formwork segments of the beams were manufactured from PU plate material, which was milled in 3-axis machining centres. On the other hand, the geometries of the panels were cut from previously cast blanks using the 5-axis water jet cutting process. In addition, the formwork segments for the rounded inner edges of the four cross-modules were 3D printed using *Fused Deposition Modelling* (FDM) technology.

2.3.3 Formwork construction for the cross-modules (ITE/iBMB)

The production of the formwork for the cross-modules of the coffered ceiling was based on the experience of the previously produced T-beam. Many proven methods and technologies were retained, in particular the CNC-milled base plate with the toothed bar joints and the concept of a modular core coated with foam to allow easy removal after concreting and shrinkage of the UHPFRC. The four cross-modules were cast consecutively at the iBMB in one formwork (Fig. 17, bottom), which had been developed and manufactured at ITE. It consisted of four different component groups:

- The 150 × 150 × 10 cm large base plate consisted of three smaller PU plates of 150 × 50 × 10 cm each, which were glued and milled over. All contours, such as the tooth contours and the slots for the sidewalls, were CNC-milled. The chosen material was obomodulan® with a density of 700 kg/m³. Under the base plate, a substructure of aluminium profiles was mounted. It had four wheels for the necessary mobility of the formwork as well as four lifting jacks, which

platte CNC-gefräst. Sie verfügten über Schlitzte, die die Seitenplatten in Position hielten. Diese Seitenplatten bestanden aus transparentem Polycarbonat und wurden mit einer Plattensäge geschnitten. Ihre Maßgenauigkeit konnte geringer sein als die der CNC-gefertigten Komponenten, da sie während des Montageprozesses in den Nuten der Grundplatte eingestellt werden konnten.

- Die Schalungssegmente für die gerundeten Innenkanten wurden mit einer Wandstärke von 1,6 mm und einer Fülldichte von nur 20 % gedruckt. In dieses weitmaschige Raster wurden je zwei stabilisierende Stahlstäbe eingeklebt.
- Die vierte Komponentengruppe wurde benötigt, um die gesamte Schalungskonstruktion zu versteifen und exakt auszurichten. Um die Seitenwände in der richtigen Position zu halten, wurden horizontale Kniehebelklemmen verwendet. Sie waren schnell und einfach zu bedienen. Um die gewünschten rechten Winkel zwischen der Grundplatte und den Endplatten einzustellen, konnten diagonale Streben zwischen den oberen Ecken der Endplatten und der Grundplatte angezogen werden.

Die wesentlichen Verbesserungen gegenüber der Schalung der Plattenbalken sind in Bild 18 (a-d) dargestellt:

- Horizontale Kniehebelspanner (b) anstelle von Verschraubungen (a),
- Transparente Seitenwände aus Polycarbonat (b) anstelle von PU-Platten (a),
- Oberseite ohne obere Abdeckung (b),

were needed to balance and fix the formwork during concreting (Fig. 19, a).

- Three different materials and production processes were used for the formwork wall components. The four front plates were CNC-milled from the same material as the base plate. They had slots that held the side plates in position. These side panels were made of transparent polycarbonate and were cut with a panel saw. Their dimensional accuracy could be less than that of the CNC-machined components because they could be adjusted in the slots of the base plate during the assembly process.
- The formwork components for the rounded inner edges were 3D printed with a wall thickness of 1.6 mm and a filling density of only 20%. Two stabilizing steel rods were glued into each of these wide-meshed grids.
- The fourth group of components was needed to stiffen and precisely align the entire formwork construction. Horizontal toggle clamps were used to hold the sidewalls in the correct position. They were quick and easy to operate. To set the desired right angles between the base plate and the end plates, diagonal braces could be tightened between the top corners of the end plates and the base plate.

The main improvements compared to the formwork for the T-beams are shown in Fig. 18 (a-d):

- Horizontal toggle clamps (b) instead of screw connections (a);
- Transparent polycarbonate side panels (b) instead of PU panels (a);



Bild 18: Wesentliche Verbesserungen an den Verbindungen zwischen den Komponenten der Schalung (a, b) und dem Kern (c, d) | **Fig. 18:** Main improvements concerning the connections between the components of the formwork (a, b) and the core (c, d)

- 3D-Druckteile (schwarz) für die Innenecken (b),
- Kern aus Massivholz und einer Beschichtung aus Styropor® (d) anstelle eines Kerns aus geschraubten PU-Platten und einer Beschichtung aus Styrodur® (c),
- „Schmelzen“ des Styropors® mit Aceton (d) anstatt Schneiden des Styrodurs® mit einer Drahtsäge, um den Kern zu entfernen (c).

- Top side without top cover (b);
- 3D printed parts (black) for the inner edges (b);
- Core of solid wood and a coating of Styropor® (d) instead of a core of screwed PU panels and a coating of Styrodur® (c);
- “Melting” the Styropor® with acetone (d) instead of cutting the Styrodur® with a wire saw to remove the core (c).

2.3.4 Fertigungskonzept der Kreuzmodule (ITE)

2.3.4 Manufacturing concept of the cross-modules (ITE)

Bild 19 (a–d) veranschaulicht den Herstellungsprozess eines der vier Kreuzmodule. Wie in (a) dargestellt, wurde der Holzkern auf der CNC-gefrästen Grundplatte aus PU-Plattenmaterial positioniert. Der Kern bestand aus zwei Balkenstummeln, die von einer Gewindestange zu einem kontinuierlichen Balken verpresst wurden. Diese Konstruktion bot die Möglichkeit, den Kern innerhalb des gegossenen Kreuzmoduls zu demontieren und die Segmente separat herauszuziehen (a). Nach dem exakten Ausrichten der Stirnseiten der Träger in den Endplatten wurde der Holzkern allumseitig mit einer

Fig. 19 (a)–(d) illustrates the manufacturing process of one of the four cross-modules. As shown in (a), the wooden core was positioned on the CNC-milled base plate made of PU sheet material. The core consisted of two beam stubs, which were pressed together by a threaded rod to form a continuous beam. This construction offered the possibility to disassemble the core inside the cast cross-module and to extract the segments separately (a). After the end plates of the beams had been precisely aligned, the wooden core was wrapped on all sides with a 40 mm thick layer of Styropor® (b). After insert-

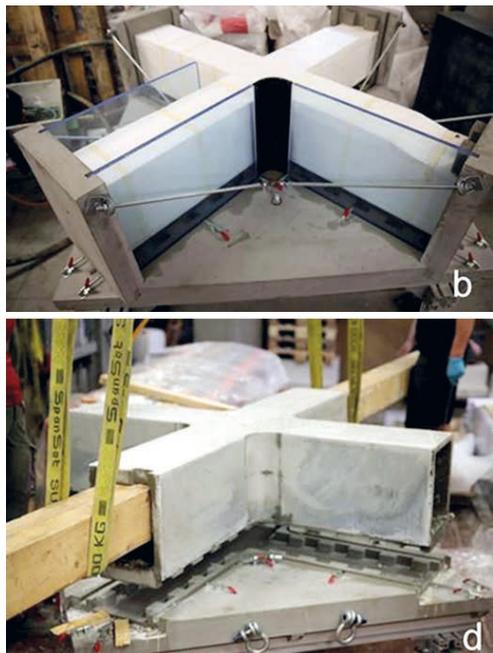
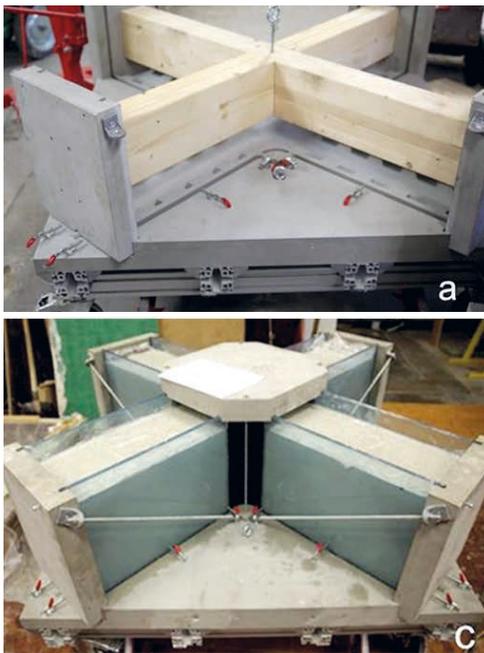


Bild 19: Herstellung eines Kreuzmoduls | Fig. 19: Manufacturing of a cross-module

40 mm dicken Schicht Styropor® eingehüllt (b). Nach dem Einsetzen und Spannen der Wände aus Polycarbonat und den 3D-gedruckten Innenecken wurde die gesamte Schalung durch diagonale Streben stabilisiert und mit einer oberen Nutplatte (c) zusammengepresst. Da die Schalung ohne obere Abdeckung konzipiert wurde, musste sie während der Betonage horizontal ausgerichtet und fixiert werden, um eine konstante Dicke der Deckschicht (die später die Unterseite des Kreuzmoduls bildet) zu erreichen. Innerhalb von 48 Stunden war der Beton soweit ausgehärtet, um die Seitenwände und den Kern durch Schmelzen der Styropor®-Schicht mit Aceton entfernen, den Holzkern ausziehen und anschließend das Kreuzmodul aus der Grundplatte heben zu können (d).

2.3.5 Fertigungskonzept der Platten (ITE)

Im Gegensatz zu den bisherigen Produktionstechniken für Platten mit Zahnleistenverbindungen wurde ein neues Verfahren gesucht, um den gesamten Produktionsprozess zu rationalisieren. Die direkte Herstellung der Geometrie aus gefrästen obomodular®-Platten war zwar ein sehr erfolgreicher Ansatz, um präzise Betonbauteile zu produzieren. Jedoch erforderte insbesondere die große zentrale Platte (130 × 130 cm) in Überdenken des Produktionsprozesses. Es werden im Folgenden die wesentlichen Gründe erläutert, warum das Schalungskonzept der kleineren Platten des zuvor gegossenen Plattenbalkens nicht auf die Produktion der zentralen Platte des Gitterrostes übertragen werden konnte: Bei einer stehenden, zweihäufigen Schalung, wie sie im Falle des Plattenbalkens verwendet wurde, würde die aufsteigende Luft zu deutlicher Porenbildung im oberen Bereich des Plattenquerschnitts führen, und die gesamte obere Zahnleiste wäre unbrauchbar. Auch das Betonieren der Schalung, wenn sie horizontal ohne obere Abdeckung ausgerichtet ist, würde zu unzureichenden Ergebnissen führen. Wie mehrere Versuche im Rahmen des Forschungsvorhabens gezeigt haben, führt das Schwinden in der horizontal ausgerichteten Schalung zu einer Verformung der Bauteile sowie zu einem Absinken der Stahlfasern in der UHPC-Matrix bis zum Boden der Schalung.

ing and tensioning the polycarbonate walls and the 3D-printed inner edges, the entire formwork was stabilized by diagonal struts and pressed together with an upper grooved panel (c). Since the formwork was designed without a top cover, it had to be aligned and fixed horizontally during concreting to guarantee a constant thickness of the top layer (which later forms the bottom of the cross-module). Within 48 hours, the concrete had hardened enough to remove the side walls and core by melting the Styropor® coating with acetone, pulling out the wooden core and then lifting the cross-module out of the base plate (d).

2.3.5 Manufacturing concept of the plates (ITE)

In contrast to the previous production techniques for plates with toothed bar connections, a new method was sought to streamline the entire production process. The direct production of the geometry from milled obomodular® panels was a very successful approach to produce precise concrete components. However, especially the large central slab (130 × 130 cm) required a rethinking of the production process. In the following, the main reasons are explained why the formwork concept of the smaller plates of the previously cast T-beam could not be transferred to the production of the central plate of the coffered ceiling: With an upstanding, double-sided formwork, as used in the case of the T-beam, the rising air would lead to the accumulation of significant pores in the upper part of the cross-section, and the entire upper toothed bar would be damaged. Also, concreting the formwork when aligned horizontally without top cover, would lead to insufficient results. As several tests carried out within the research project have shown, shrinkage in the horizontally aligned formwork leads to deformation of the elements and to a sinking of the steel fibres in the UHPC matrix down to the bottom of the formwork.

Therefore, two alternative subtractive production methods were investigated: 5-axis CNC milling and 5-axis water jet cutting of raw UHPFRC plates. To investigate the suitability of CNC milling of UHPFRC, different diamond tools and

Daher wurden alternativ zwei subtraktive Produktionsmethoden untersucht: das 5-Achs-CNC-Fräsen und das 5-Achs-Wasserstrahlschneiden von Rohplatten aus UHPFRC. Zur Untersuchung der Eignung des CNC-FräSENS von UHPFRC wurden verschiedene Diamantwerkzeuge und Schneidparameter getestet (Bild 20, links). Während das Fräsen der Zahngeometrien zu einem übermäßigen Verschleiß der Fräswerkzeuge geführt hatte, konnten durch das Schneiden von Rohplatten mit einer 5-Achs-Wasserstrahlschneidanlage (Bild 20, rechts) gute Ergebnisse erzielt werden. Im Gegensatz zum CNC-Fräsen mit seiner einfachen Umwandlung des digitalen Modells in die realen Geometrien ist das Verfahren des Wasserstrahlschneidens wegen der notwendigen Annäherung an die optimalen Schneidparameter komplexer. Insbesondere die konische Form des Schneidstrahls, die je nach Plattenmaterial und Schnitttiefe variiert, war zu berücksichtigen. Das Produktionsverfahren des Wasserstrahlschneidens diente nach Untersuchung der Schneidparameter zur Realisierung aller benötigten Platten für den Gitterrost.

2.3.6 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten am trocken gestoßenen Gitterrost (iBMB)

Nach der erfolgreichen Herstellung der vier Module wurden diese direkt auf dem Prüffeld am iBMB zum finalen Gitterrost mit einer Grundfläche von 3×3 m montiert und vorgespannt. Bild 21 illustriert den Testaufbau: Die gesamte Konstruktion wurde durch vier Spannglieder

cutting parameters were tested (Fig. 20, left). While the milling of the tooth geometries had led to excessive wear of the milling tools, good results could be achieved by cutting raw plates with a 5-axis waterjet cutting system (Fig. 20, right). In contrast to CNC milling with its simple conversion of the digital model into the real geometries, the waterjet cutting process is more complex due to the necessary approximation to the optimal cutting parameters. In particular, the conical shape of the waterjet, which varies depending on the plate material and cutting depth, had to be taken into account. After investigating the cutting parameters, the production process of waterjet cutting was used to realize all required plates for the coffered ceiling.

2.3.6 Experimental investigations on the load-bearing behaviour of the dry-jointed coffered ceiling (iBMB)

After the successful production of the four modules, they were mounted and prestressed directly on the test field at the iBMB to form the final coffered ceiling with a footprint of 3×3 m. Fig. 21 illustrates the test setup: The entire construction was prestressed by four tendons. The vertical load was applied by two pressure cylinders. The load was applied to the one-third points of the middle plate via a steel beam. Subsequently, the load was distributed transversely to two thirds of the plate by a transverse beam. Eight tilting bearings at the ends of each cross-module transferred the compressive force into the supports. The test focused on the performance of the toothed bar connections and their ability to transmit shear and bending



Bild 20: CNC-Fräsen (links) und Wasserstrahlschneiden von UHPFRC-Platten mit 30 mm Dicke (rechts) | **Fig. 20:** CNC milling (left) and waterjet cutting of UHPFRC-plates of 30 mm thickness (right)



Bild 21: Prüfung des Gitterrostes; links: während des Aufbaus und rechts fertiger Prüfaufbau | **Fig. 21:** Test of the coffered ceiling; during construction (left) and finished test set-up (right)

vorgespannt. Die vertikale Belastung erfolgte über zwei Druckzylinder. Über einen Stahlträger wurde die Last auf die Drittelpunkte der mittleren Platte aufgebracht. Nachfolgend wurde die Last durch eine Quertraverse auf zwei Drittel der Platte quer verteilt. Acht Kipplager an den Enden jedes Kreuzmoduls leiteten die Druckkraft in die Auflager ab. Im Fokus der Prüfung standen die Leistungsfähigkeit der Zahnleistenverbindungen und deren Fähigkeit zur Übertragung von Scher- und Biegemomenten sowie die Tragfähigkeit der gesamten Konstruktion.

Die Vorspannung des Gitterrostes wurde in Anlehnung an die Plattenbalkenversuche mit 17 % der maximalen Druckfestigkeit in der halben Höhe des Hohlkastenquerschnittes aufgebracht und erzeugte somit ein der äußeren Belastung und dem Eigengewicht entgegenwirkendes Moment. Der Gitterrost erreichte gegenüber dem einachsigen Plattenbalken ein steiferes Tragverhalten und eine mehr als doppelt so hohe Versagenslast (Bild 22). Das Versagen des Gitterrostes wurde durch das Aufreißen der Platte unter der Lasteinleitung sowie das Lösen einzelner Zahnleistenverbindungen ausgelöst, siehe Bild 23. Es versagten teilweise, wie zuvor beim Plattenbalken auch, die UHPFRC-Passstücke in der Zugzone beim Öffnen der Stoßfugen.

Die erfolgreiche Prüfung eines modularen, trocken gefügten Gitterrostes zeigt die hohen Tragreserven einer mehraxialen Konstruktion gegenüber dem einachsigen gespannten Plattenbalken. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass modulare Bauteile mit einer Wandstärke von größtenteils 25 mm hergestellt und trocken

moments as well as the load-bearing capacity of the entire structure.

The prestressing of the coffered ceiling was applied at 17% of the maximum compressive strength at half the height of the box section in accordance with the T-beam tests, thus generating a moment counteracting the external load and the dead weight. Compared to the uniaxial T-beam, the coffered ceiling achieved a stiffer load-bearing behaviour and a failure load more than twice as high (Fig. 22). The failure of the coffered ceiling was caused by the rupture of the plate under the load introduction and the loosening of individual dry joints, see Fig. 23. As before with the T-beam, the UHPFRC inlays in the tension zone partially failed when opening the butt joints.

The successful testing of a modular, dry-jointed coffered ceiling shows the high load-bearing capacity of a multi-axial construction compared to the uniaxial tensioned T-beam. It could also be

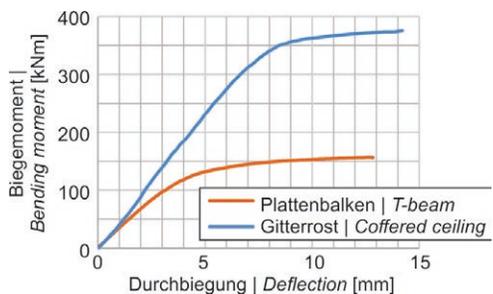


Bild 22: Kraft-Durchbiegungsdiagramm für Biegeversuche an UHPFRC-Gitterrost im Vergleich mit dem Plattenbalkentest | **Fig. 22:** Force-deflection curves for bending test on UHPFRC coffered ceiling in comparison to the T-beam test



Bild 23: Rissbild in der zentralen Platte (links) und Lösen der Zahnleistenverbindung (rechts) | **Fig. 23:** Crack pattern in the central plate (left) and loosening of the dry joints (right)

zu einem mehrachsig wirkenden Tragsystem gefügt werden können. Die Verbindung einzelner UHPFRC-Module erfolgte dabei durch neuartige Zahnleistenverbindungen. Die UHPFRC-Passstücke und Zahnleistenverbindungen wurden durch den Fügeprozess nur sehr gering beansprucht und konnten nach dem Versuch wieder problemlos demontiert werden.

2.4 Übertragung der Fügeprinzipien auf Schalensegmente

2.4.1 Forschungsansatz (ITE)

Nach der Entwicklung, Herstellung und Prüfung der Stab- und Flächenelemente des einachsig vorgespannten Plattenbalkenelements und des orthogonalen, zweiachsig vorgespannten Flächentragwerks (Ausschnitt eines Gitterrostes) wurden in einem abschließenden Schritt die Fügegeometrien für gekrümmte Raumtragwerke überführt [25]. Als praxisnahes Anwendungsbeispiel wurde hierfür ein Schalentragwerk aus trocken gefügten UHPFRC-Fertigteilen zur Überdachung einer Halle entwickelt. Ziel für die Formfindung der Schale mit der Software RhinoVAULT war es, ein möglichst effizientes Tragwerk zu entwickeln, das in Bezug auf den Herstellungs- und Montageaufwand herkömmlichen Systemen entsprach, dabei aber weniger Material benötigt. Die Optimierung der Schalendicke wurde unter Berücksichtigung verschiedener Lastfallkombinationen aus maximalen Haupt- und Schubspannungen mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS durchgeführt.

shown that modular elements with a wall thickness of mostly 25 mm can be manufactured and dry-jointed to form a multi-axial load-bearing system. The connection of individual UHPFRC modules was achieved by means of novel toothed bar connections. The UHPFRC inlays and toothed bar connections were exposed to very little stress during the joining process and could be easily disassembled after the test.

2.4 Transferring the joining principles to shell segments

2.4.1 Research approach (ITE)

After the development, production and testing of the uniaxial, prestressed T-beam and the orthogonal, biaxial prestressed planar structure (section of a coffered ceiling), the joining geometries for curved spatial structures were transferred in a final step [25]. As a practical application example, a shell structure made of prefabricated dry-jointed UHPFRC elements was developed for the roofing of a hall. The goal for the form finding of the shell using the software RhinoVAULT was to develop a highly efficient structure, which was comparable to conventional systems in terms of manufacturing and assembly effort, but required less material. The optimization of the shell thickness was carried out with the finite element program ANSYS considering different load case combinations of maximum principal and shear stresses.

Since the shell was to be composed of several prefabricated UHPFRC elements and should be transportable by trucks, a reasonable positioning of the joints and a maximum dimension of the shell elements of max. 2.5×13 m had to be provided. Furthermore, the shell was to be assembled without falsework in order to keep the assembly effort at the construction site as low as possible. In order to be able to assemble the elements without the use of supports, the shell had to be self-supporting and stable at every step of the assembly. To ensure this, the assembly procedure was developed in accordance with annular layered domes and Catalan vaults [26]. Fig. 24 shows a 3D printed plaster

Da die Schale aus mehreren UHPFRC-Fertigteilen zusammengesetzt und mit LKW transportierbar sein sollte, musste eine sinnvolle Anordnung der Fugestellen und eine maximale Abmessung der Schalensegmente von max. $2,5 \times 13$ m vorgesehen werden. Weiterhin sollte die Schale ohne Lehrgerüst montiert werden, um den Montageaufwand auf der Baustelle so gering wie möglich zu halten. Damit die Fertigteile stützenfrei zusammengefügt werden können, musste die Schale sich in jedem Schritt der Montage selbst tragen und stabil stehen. Um dies zu gewährleisten, wurde der Montageablauf in Anlehnung an Ringschichtkuppeln und katalanische Gewölbe [26] entwickelt. Bild 24 zeigt ein 3D-gedrucktes Gipsmodell des Schalentragerwerks mit dem Fugenbild der Segmentierung.



Bild 24: 3D-gedrucktes Gipsmodell des Schalentragerwerks | Fig. 24: 3D-printed plaster model of the shell structure

model of the shell structure with the segmentation joint pattern.

2.4.2 Fügegeometrien der Schalensegmente (ITE)

Eine besondere Herausforderung an die Fügung stellte die zweifache Krümmung der Schale dar. Eine einfache Übertragung der zuvor verwendeten Schwalbenschwanzverbindungen auf die Schale war hier nicht möglich. Diese ließe sich nicht fügen, da aufgrund der Krümmung der Schale die Flanken der Schwalbenschwänze nicht mehr den gleichen Winkel zur Fügerichtung haben wie zuvor und sich auch der Winkel zwischen den Flanken und der Fügerichtung von einem Schwalbenschwanz zum nächsten ändert, wie es Bild 25 illustriert. Eine Möglichkeit, diesem Problem zu begegnen, wäre die Flankenneigung nicht entsprechend der Krümmung der Schale zu verändern, sondern sie mit dem gleichen Winkel zur Fügerichtung beizubehalten. Dies führt aber besonders bei jenen Elementen, deren Rand um einen großen Winkel gekrümmt ist, zu einer ungewünschten Querschnittserhöhung, da die Flankenhöhe stark zunimmt.

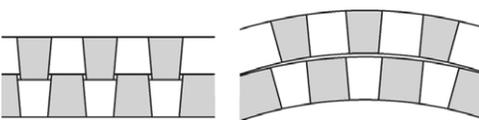


Bild 25: Vertikalschnitt durch gerade (links) und gekrümmte Segmente (rechts) | Fig. 25: Vertical section through straight (left) and curved segments (right)

2.4.2 Joining geometries of the shell segments (ITE)

The double curvature of the shell posed a particular challenge to the segmentation. A simple transfer of the previously used tooth joints to the shell was not possible here. This could not possibly be joined, since due to the curvature of the shell the flanks of the teeth no longer have the same angle to the joining direction and also the angle between the flanks and the joining direction changes from one tooth to the next, as illustrated in Fig. 25. One way to overcome this problem would be not to change the flank tilt according to the curvature of the shell, but to keep it at the same angle to the joining direction. However, this leads to an undesired increase in cross-section, especially for those elements where the edge is curved by a large angle, because here the height of the flanks increases strongly.

These joining problems only occur if the segments are joined perpendicular to the shell plane or parallel to the intersection of the two segments. However, a joining perpendicular to the sectional plane is possible. For the transmission of the shear forces perpendicular to the shell plane, additional shoulders have been added to the sides of the teeth. In order to ensure that the segments could be pressed into each other force-locked, all surfaces of the joint that

Diese Fügeprobleme treten jedoch nur dann auf, wenn die Bauteile senkrecht zur Schalenebene bzw. parallel zur Schnittfläche der beiden Bauteile gefügt werden. Eine Fügung senkrecht zur Schnittfläche ist hingegen möglich. Für die Übertragung der Querkräfte senkrecht zur Schalenebene wurden zusätzliche Ausbuchtungen seitlich an den Fügezapfen angeordnet. Um zu gewährleisten, dass die Segmente kraftschlüssig ineinander gepresst werden konnten, wurden sämtliche Flächen der Fügung, die parallel zur Fügerichtung verlaufen, um einen Winkel von 2° geneigt. Diese Fügegeometrie, wie sie Bild 26 zeigt, wurde in verschiedenen Ausführungen an realen Modellen auf ihre Fügbarkeit hin getestet und optimiert. Auch wenn die entwickelten und hergestellten Fügegeometrien für gekrümmte Raumtragwerke nicht auf ihre mechanische Leistungsfähigkeit hin überprüft wurden, so kann dennoch aufgrund ihrer Ähnlichkeit mit den zuvor getesteten ebenen Plattenverbindungen in Bezug auf Geometrie und anzunehmendem Lastfluss in verbautem Zustand davon ausgegangen werden, dass deren rationale Herstellbarkeit und Verwendbarkeit gegeben ist.

2.5 Überlegungen zum rechnerischen Nachweis dünnwandiger Bauteile aus UHPFRC (iBMB)

Für die Nachweise von dünnwandigen Bauteilen müssen Maßstabeffekte hinsichtlich der an Standardprüfkörpern gewonnenen Festigkeitswerte berücksichtigt werden [21]. Zur Ableitung von Materialparametern, um Traglasten analytisch oder numerisch zu bestimmen, hat sich der Ansatz des Versagenskriteriums nach Mohr/Coulomb, Gl. (1), als zielführend herausgestellt [16]. Durch das Modell kann bestimmt werden, ob sich ein Versagen durch Scherbruch oder ein Überschreiten der Druckfestigkeit einstellt. Die Berechnung der Scherspannung τ_u der Bruchehüllenden erfolgt mit Gl. (1). Darin geben μ den Reibbeiwert, σ_n die Normalspannung senkrecht zur Fügestelle und c die innere Reibung des Materials an.

$$\tau_u = \mu \cdot \sigma_n + c \tag{1}$$

are parallel to the joining direction were inclined by an angle of 2°. This joint geometry, as shown in Fig. 26, was tested and optimized in various designs on physical models with regard to its connectivity. Even though the developed and manufactured joining geometries for curved spatial structures have not been tested for their mechanical performance, it can be assumed that their rational producibility and usability is given due to their similarity to the previously tested flat panel joints with regard to geometry and assumed stress distribution in the installed state.

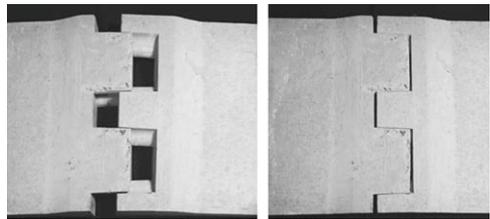


Bild 26: Zahnverbindung von Schalensegmenten vor (links) und nach dem Fügen (rechts) | Fig. 26: Tooth joint of shell segments before (left) and after joining (right)

2.5 Considerations for the mathematical verification of thin-walled elements made from UHPFRC (iBMB)

For the verification of thin-walled components, scale effects must be considered with regard to the strength values obtained on standard test specimens [21]. For the derivation of material parameters to determine loads analytically or numerically, the approach of the failure criterion according to Mohr/Coulomb, Eq. (1), has proven to be appropriate [16]. The model can be used to determine whether failure occurs due to shear fracture or whether the compressive strength is exceeded. The shear stress τ_u of the failure envelope is calculated using Eq. (1), in which μ indicates the coefficient of friction, σ_n the normal stress perpendicular to the joint and c the internal friction of the material.

$$\tau_u = \mu \cdot \sigma_n + c \tag{1}$$

Pure shear strength can be determined in shear tests on prisms (4 × 4 × 16 cm) and beams (15 × 15 × 50 cm) according to Bažant/Pfeiffer

In Scherversuchen an Prismen ($4 \times 4 \times 16$ cm) und Balken ($15 \times 15 \times 50$ cm) nach Bažant/Pfeiffer [27], [21] und in Plattendruckversuchen mit Fügewinkeln von 90° kann die reine Scherfestigkeit bestimmt werden, s. Bild 27, rechts.

Wie im Bild 27 gezeigt wird, kann die sich einstellende Festigkeit für Neigungswinkel der Fügefläche zwischen 15° und 45° höher erwartet werden, da im realen Bauteil durch die seitliche Querdehnungsbehinderung ein Aufspalten des Querschnittes verhindert wird. Um dies zu berücksichtigen, werden die auf dem Mohrschen Spannungskreis aufgetragenen gemessenen Scherfestigkeiten nachträglich in Richtung der Bruchgeraden korrigiert (s. Pfeile in Bild 28). Die Platten mit einem Fügewinkel von 60° zeigen einen reinen Scherbruch in der Fügestelle (Bild 27, Mitte), somit kann hier die maximale Scherfestigkeit der Plattenfügung erreicht werden.

Mit der so gewonnenen Beschreibung der Materialfestigkeit können die Bauteile dimensioniert werden. Allerdings ist darin noch nicht die effektive Faserwirksamkeit $k_{f,eff}$ enthalten. Eine exakte Beschreibung der Festigkeit muss unter Berücksichtigung der lokalen Faserorientierung und -menge sowie des Fasergehalts im versagensrelevanten Querschnitt geführt werden, da der Einfluss der Fasern vor allem für dünne Bauteile bei Biegung und Querkraft nicht vernachlässigt werden kann [28]. Zur Bestimmung der Orientierungsfaktoren gibt es bereits fortgeschrittene Berechnungsmethoden, wie z. B. in [29] dargelegt. Der in diesem Projekt mit Hilfe des Mikro-Computertomographen (Mikro-CT) ausgewertete Faserorientierungsbeiwert η_i (Gl. (2)) einer Einzelfaser wird vereinfacht nach Frettlöhr [30] ermittelt und hat sich als ausreichend genau herausgestellt. Die Anzahl der Fasern n_f in einem Schnittbild sowie der Faserneigungswinkel φ_i bzw. die Breite der beiden Ellipsenhauptachsen $d_{f,i}$ und $d_{f1,i}$ einer Faser werden dafür ausgewertet (Bild 29) und über den Versagensbereich gemittelt.

$$\eta_i = \frac{1}{n_f} \cdot \sum_i^{n_f} \cos \varphi_i = \frac{1}{n_f} \cdot \sum_i^{n_f} \frac{d_{f,i}}{d_{f1,i}} \quad (2)$$

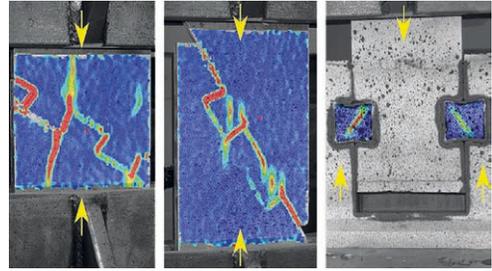


Bild 27: Rissbildung nach Erreichen der Traglast bei Scherversuchen mit Zahnleistenverbindungen unter 30° (links), 60° (Mitte) und mit UHPFRC-Passstücken unter 90° (rechts); gelbe Pfeile zeigen die Belastungsrichtung | **Fig. 27:** Cracking after reaching the ultimate load in shear tests on tooth joints under 30° (left), 60° (middle) and with UHPFRC inlays under 90° (right); yellow arrows show loading direction

[27], [21] and in plate compression tests with joining angles of 90° , see Fig. 27, right.

As shown in Fig. 27, the strength that can be expected for angles of inclination of the contact surface between 15° and 45° can be expected to be higher, since in the real element the lateral transverse strain restraint prevents splitting of the cross-section. To take this into account, the measured shear strengths plotted on the Mohr-Coulomb circle are subsequently corrected in the direction of the fracture line (see arrows in Fig. 28). The plates with a joining angle of 60° show a pure shear fracture in the joint (Fig. 27, middle), thus the maximum shear strength of the plate joint can be achieved here.

With the description of the material strength resulting from that, the elements can be dimensioned. However, the actual fibre effectiveness $k_{f,eff}$ is not yet included. An exact description of the strength must be carried out under consideration of the local fibre orientation and quantity as well as the fibre content in the failure-relevant cross-section, since the influence of the fibres cannot be neglected, especially for thin elements under bending and shear forces [28]. There are already advanced calculation methods for determining the orientation factors, as e.g. described in [29]. The fibre orientation coefficient η_i (Eq. (2)) of a single fibre, which was evaluated in this project with the help of a micro computer tomograph (micro CT), was determined in a simplified way according to Frettlöhr

Versagenskriterium nach Mohr/Coulomb | *Mohr/Coulomb failure criterion*

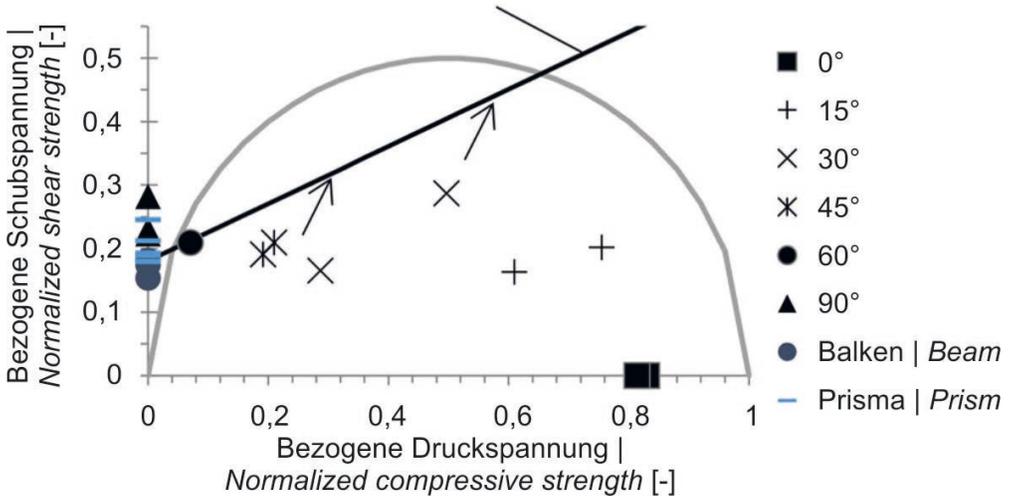


Bild 28: Querkraftversuche dargestellt im Mohrschen Spannungskreis mit Bruchhüllender (bezogen auf die Zylinderdruckfestigkeit) | Fig. 28: Shear tests in Mohr-Coulomb circle with failure envelope (normalized to cylindrical compressive strength)

Der somit ermittelte Faserorientierungsbeiwert wird verwendet, um die effektive Faserwirksamkeit $k_{f,eff}$ zu beschreiben, welche anschließend im Nachweisformat für Biegung und Querkraft eingesetzt wird. Links in Bild 29 ist zu sehen, dass die lokale Faserverteilung und -orientierung sehr stark schwankt, was dazu führt, dass die entstehenden Rissbreiten und die Anzahl der Risse in den durchgeführten Biegezug- und Querkraftversuchen die Tragfähigkeit stark beeinflussen [23].

3 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ wurden in einer Kooperation des Instituts für Tragwerksentwurf (ITE) und des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) an der Technischen Universität Braunschweig neuartige Trockenstoßverbindungen aus UHPFRC entwickelt. Hierfür wurden geometrische Fügeprinzipien für Stab- und Flächenelemente auf ihre Herstellbarkeit, Fügbarkeit und Leistungsfähigkeit hin untersucht. Basierend auf den entwickelten Fügeprinzipien wurden anschließend einachsige und zweiachsige gespannte Tragsysteme

[30] and has proven to be sufficiently accurate. The number of fibres n_f in a sectional image as well as the fibre orientation angle φ_i , respectively the width of the two ellipse main axes $d_{f,i}$ and $d_{f,i,1}$ of a fibre were evaluated for this purpose (Fig. 29) and averaged over the area of the failure.

$$n_f = \frac{1}{n_f} \cdot \sum_i^{n_f} \cos \varphi_i = \frac{1}{n_f} \cdot \sum_i^{n_f} \frac{d_{f,i}}{d_{f,i,1}} \quad (2)$$

The fibre orientation coefficient thus determined was used to describe the effective fibre efficiency $k_{f,eff}$, which was then used in the verification model for bending and shear force. On the left side of Fig. 29, it can be seen that the local fibre distribution and orientation fluctuates very strongly, which means that the crack widths and the number of cracks in the bending tensile and shear load tests performed strongly influence the load-bearing capacity [23].

3 Conclusion and outlook

Within the framework of the DFG Priority Programme SPP 1542 “Concrete Light”, novel dry joints made of UHPFRC were developed in a cooperation of the Institute for Structural De-

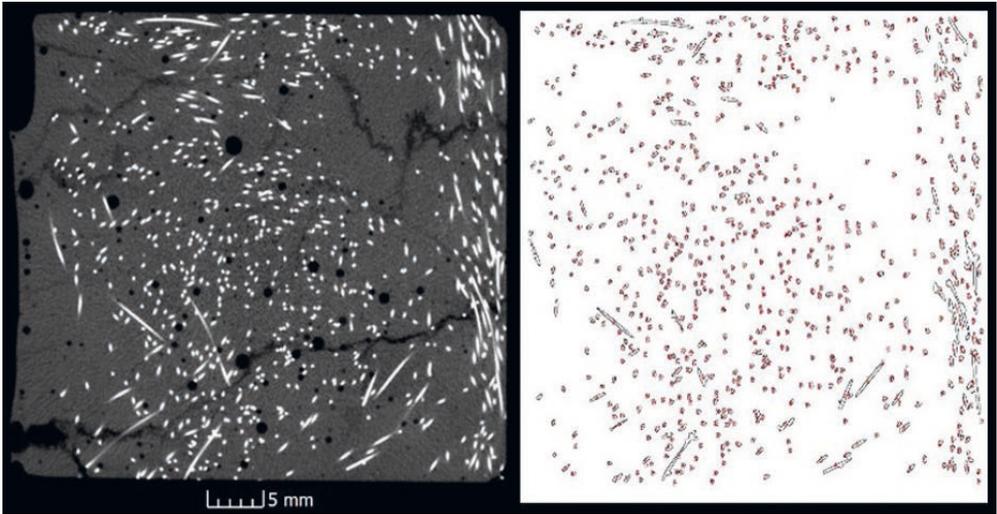


Bild 29: Schnittbild durch ein querkraftgeprüftes UHPFRC-Prisma ($4 \times 4 \times 16$ cm) am Versagensriss mittels Mikro-CT (links) und Analyse der Faserorientierung im Schnitt (rechts) | **Fig. 29:** Section through shear tested UHPFRC prism ($4 \times 4 \times 16$ cm) at failure crack with micro CT (left) and analysis of fibre orientation in section (right)

me realisiert und im Großversuch geprüft. Mögliche Ansätze für einen rechnerischen Nachweis von gefügten, dünnwandigen Bauteilen aus UHPFRC wurden erarbeitet.

Die durchgeführten Untersuchungen und Versuche zeigen, dass es möglich ist, Bauteile aus UHPFRC unter Nutzung der Möglichkeiten der digitalen Planung sowie CNC-gesteuerter Fertigungstechnik für den Formenbau für den innovativen Leichtbau herzustellen. Mittels kraftflussoptimierter Stab- und Flächenelemente können leichte Module wie Platten und Hohlprofile aus UHPFRC zu effizienten Tragwerken verbunden werden. Denkbar ist ein modulares Konstruktionsprinzip in Fertigteilbauweise, welches vielseitige Vorteile gegenüber konventionellen Konstruktionen aus Normalbeton bietet. So verringern struktureffiziente Tragwerke nicht nur das Eigengewicht, sondern gewährleisten auch eine optimale Materialausnutzung in ressourcenschonenden Gesamtsystemen. Der in diesem Buch auf S. 676 ff. vorgestellte und in Zusammenarbeit aller an dieses Schwerpunktprogramm beteiligten Institute der TU Braunschweig entwickelte und gebaute Demonstrator *uni-con²* veranschaulicht diese neu errungenen Möglichkeiten für den konstruktiven Hochbau.

sign (ITE) and the Institute of Building Materials, Concrete Structures and Fire Safety (iBMB) at the Technical University of Braunschweig. For this purpose, geometric joining principles for beams and planar elements were investigated with regard to producibility, joinability and performance. Based on the developed joining principles, uniaxial and biaxial load-bearing structures were then realized and tested in full-scale experiments. Possible approaches for a mathematical verification of joined thin-walled elements made of UHPFRC were developed.

The investigations and tests carried out showed that it is possible to produce elements from UHPFRC using the potential of digital planning as well as CNC-controlled production technology for the realization of formwork for innovative lightweight constructions. By means of force-flow-optimized beam and planar elements, lightweight modules such as plates and hollow sections made of UHPFRC can be connected to create efficient load-bearing structures. A modular design principle in precast construction is possible, which offers many advantages over conventional constructions made of normal concrete. Thus, structurally efficient load-bearing structures not only reduce

Die Umsetzung der neuartigen Bauweise, nämlich Betonfertigbauteile aus trocken gefügten Segmenten zusammensetzen, fordert auf unterschiedlichen Ebenen ein Umdenken in der konventionellen Baupraxis. Die neuen Ansätze betreffen sowohl den digitalen Bereich der Fertigungskette, wie etwa die Parametrisierung der Fügegeometrien, die automatisierte Generierung von Datensätzen für die CNC-Bearbeitung und die Bemessung als auch die fertigungstechnische Seite. Im Vergleich zu herkömmlichen Konstruktionsverfahren wird nicht die Form, sondern der Prozess definiert, das Designergebnis ist somit formoffen. In diesem *Formgenerierungsprozess* werden die einzelnen Bauteile zu seriellen Unikaten, bei deren Herstellung nicht die Form wiederholt wird, sondern der Design- und Fertigungsprozess. Durch die Zusammenführung der entwickelten neuartigen Verbindungen für geometrische komplexe Stab- und Flächentragwerke aus UHPFRC mit den Möglichkeiten des *digital workflow* wird es in Zukunft möglich werden, ganze Tragwerke einschließlich Ihrer Bauteile nach dem Prinzip *form follows force* zu optimieren. So wird es möglich, vom klassischen Betonbau der Vergangenheit zur Filigranität und Leichtigkeit des Betonbaus der Zukunft zu gelangen.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198251365 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

the dead weight, but also ensure optimal material utilization in resource-saving load-bearing systems. The *uni-con*² demonstrator presented in this book on page 676 et seq. and developed and built in cooperation with all institutes of the TU Braunschweig participating in this Priority Programme illustrates these newly achieved possibilities for structural building construction.

The implementation of the novel construction method, namely to assemble prefabricated concrete structures from dry-jointed elements, requires a new thinking of conventional construction practice on various levels. The new approaches affect both the digital part of the production chain, such as the parameterization of the joining geometries, the automated generation of data sets for CNC processing and design, and the production engineering side. In comparison to conventional design methods, it is not the shape but the process that is defined, and the design result is thus open to shape. In this *shape generation process*, the individual elements become series of unique parts. In their production, it is not the shape that is repetitive, but the design and manufacturing process. The combination of the developed novel connections for geometrically complex beam and shell structures made of UHPFRC with the possibilities of *digital workflow* will make it possible in the future to optimize entire structures including their components according to the principle *form follows force*. Thus, it will be possible to move from the classical concrete construction of the past to the filigree and lightness of the concrete construction of the future.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding project no. 198251365 within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Mainka, J.; Lehmborg, S.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Non-Standard Fügeprinzipien für leichte Bauteile aus UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), S. 763–773
- [2] Lehmborg, S.; Budelmann, H.: Entwicklung von dünnwandigen Stabwerksknoten aus ultrahochfestem faserverstärkten Beton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium in Bochum, 07./08.11.2013, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 47–52
- [3] Mainka, J.; Neudecker, S.; Müller, C.; Ledderose, L.; Hermerschmidt, W.: Development of new jointing systems for lightweight UHPC structures. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th Int. PhD Symp. in Civil Engineering, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 22.–25.07.2012 in Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012, S. 341–348
- [4] Lehmborg, S.; Mainka, J.; Ledderose, L.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Neuartige Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkelemente aus UHPFRC. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 122–139 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171431>
- [5] Fehling, M.; Schmidt, T.; Teichmann, K.; Bunje, K.; Bornemann, R.; Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht zum Projekt DFG FE 497/1-1, erschienen in: Schmidt, M.; Fehling, E. (Hrsg.): Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 1, Kassel: kassel university press, 2005
- [6] DIN EN 12390-3:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009.
- [7] DIN EN 12390-6:2010-09: Prüfung von Festbeton – Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-6:2009.
- [8] DIN EN 12390-5:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-5:2009.
- [9] Oettel, V.; Empelmann, M.: Feinprofilierter UHPFRC-Trockenfugen für Segmentbauteile. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 7, S. 487–495
- [10] Zimmermann, W.; Sparowitz, L.: Vorgespannte Fertigteile aus Ultrahochfestem Faserbeton. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012) 3, S. 192–200
- [11] Henze, S.: Entwicklung und Beschreibung des Tragverhaltens einer modularen Fachwerkkonstruktion aus Hochleistungsbeton. Diss., Universität Leipzig, 2009
- [12] Mattheck, C.: Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister. Freiburg: Rombach, 2006
- [13] Billington, D. P.: Robert Maillart und die Kunst des Stahlbetonbaus. Zürich: Artemis, 1990
- [14] Bletzinger, K.-U.: Zur statischen Optimierung von Tragwerksformen. In: Natürliche Konstruktionen, Mitteilungen des SFB 230, Heft 1 (1988), Institut für leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, 145–152
- [15] Hermerschmidt, W.; Budelmann, H.: Kerbempfindlichkeit von ultrahochfestem Beton. iBMB Kurzberichte aus der Forschung, TU Braunschweig, 2012 – <http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/docpool/reports/KaF-2012-12.pdf>
- [16] Lehmborg, S.: Herstellung und Eigenschaften von dünnwandigen, trocken gefügten Bauteilen aus ultrahochfestem faserverstärkten Feinkornbeton. Diss., TU Braunschweig, 2018
- [17] Rudolf, M.: Die Kunst der leichten Schalen – zum Werk von Felix Candela. Köln: Arcus, 1992
- [18] Polonyi, S.: Schalen in Beton und Kunststoff: Entwurf – Bemessung – Ausführung. Berlin: Bauverlag, 1970
- [19] Schlaich, J.; Sobek, W.: Suitable shell shapes. Concrete International 8 (1986)1, S. 41–45
- [20] Sobek, W.: On Design and Construction of Concrete Shells. Cement 43 (1991)11, S. 23–27
- [21] Lehmborg, S.; Ledderose, L.; Wirth, F.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Von der Bauteilfügung zu leichten Flächentragwerken: Trocken gefügte Flächenelemente aus UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 806–815
- [22] Breitenberger, M.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U.: Entwurf und Berechnung von gekrümmten Betonfertigteilebauteilen CAD-basierter Verfahren. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 783–791
- [23] Lehmborg, S.; Ledderose, L.; Wirth, F.; Budelmann, H.; Kloft, H.: From Jointing Systems to Light-Weight Structures: Hybrid, dry-fit beam, surface and spatial structures made of UHPFRC. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Annual Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), Beitrag Nr. IASS2015-417738, publiziert auf USB-Stick: 8 S.
- [24] Ledderose, L.; Lehmborg, S.; Wirth, F.; Budelmann, H.; Kloft, H.: From digital design to precise production: Dry-jointed coffered ceiling made of UHPFRC-components. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture, engineering, science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Book of Abstracts: S. 124, Langfassung auf USB-Stick: Beitrag Nr. 9194, 8 S.
- [25] Stratemeier, B.: Entwurf, Bemessung, Optimierung und Bau eines trocken gestoßen Schalentragwerks aus UHPFRC. Masterarbeit, TU Braunschweig, 2016
- [26] Block, P.; Rippmann, M.: Das katalanische Gewölbe. Ein Konstruktionsprinzip mit Geschichte und Zukunft. Detail 5 (2013), S. 528–536
- [27] Bažant, Z. P.; Pfeiffer, P. A.: Shear fracture tests of concrete. Materials and Structures 19 (1986), S. 111–121

[28] Bonzel, J.; Schmidt, M.: Verteilung und Orientierung von Stahlfasern im Beton und ihr Einfluß auf die Eigenschaften von Stahlfaserbeton. *Betontechnische Berichte* (1984/85), S. 73–116

[29] Wille, K.; Tue, N. V.; Parra-Montesinos, G. J.: Fiber distribution and orientation in UHPFRC beams and their effect on backward analysis. *Materials and Structures* 47 (2014), S. 1825–1838

[30] Frettlöhr, B.: Bemessung von Bauteilen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton (UHFFB). Diss., Universität Stuttgart, 2011

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1 [1], 2, 3/4 [1], 5 (rechts), 7, 9 [7]; 9/10 [21], 15–20 [24]: Lukas Ledderose
 - Bilder | Pictures 5 (links), 6 [1], 11–14 [21], 21–23, 27–29 [21]: Sven Lehmborg
 - Bilder | Pictures 6 [1], 8: Jeldrik Mainka
 - Bilder | Pictures 24–26 [25]: Bernhard Stratemeier
- Bereits publizierte Bilder wurden teilweise für den Bericht modifiziert. | Previously published images were partly modified for the report.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Entwicklung neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkselemente aus UHPC (Phase I)

Von der Bauteilfügung zu leichten Tragwerken: Hybride, trocken gefügte Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC (Phase II)

Development of novel connections for geometrically complex surface and framework elements from UHPC (1st phase)

From joints to lightweight structures: Hybrid, dry-jointed bar, plane and three-dimensional structures made of UHPFRC (2nd phase)

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann Institutsleiter Head of the institute
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	BU 730/18-1/2 (Projektnummer Project number: 198251365)
Adresse Address:	TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Beethovenstr. 52, 38106 Braunschweig
Kontakt Contact:	+49 531 391 5405 h.budelmann@ibmb.tu-bs.de www.ibmb.tu-braunschweig.de/index.php/fachgebiet-fgbs.html
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft Institutsleiter Head of the institute
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	KL 2119/1-1/2 (Projektnummer Project number: 198251365)
Adresse Address:	TU Braunschweig, Institut für Tragwerksentwurf (ITE), Pockelsstraße 4, 38106 Braunschweig
Kontakt Contact:	+49 531 391 3571 h.kloft@tu-braunschweig.de www.ite.tu-bs.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Förderphase I Funding period I: 10/2011–10/2014 Förderphase II Funding period II: 12/2014–11/2017
Team Team:	Lukas Ledderose (ITE, 10/2011–11/2017) Jeldrik Mainka (ITE, 10/2011–10/2014) Franz Wirth (ITE, 12/2014–11/2017) Stefan Neudecker (ITE, 10/2011–10/2014) Sven Lehmborg (iBMB, 05/2011–11/2017) Wibke Hermerschmidt (iBMB, 10/2011–05/2012) Reinhard Nothnagel (iBMB, 10/2011–12/2011)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Mainka, J.; Neudecker, S.; Müller, C.; Ledderose, L.; Hermerschmidt, W.: Development of new jointing systems for lightweight UHPC structures. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 in Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012, S. 341–348
- Mainska, J.; Lehmborg, S.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Non-Standard Fügeprinzipien für leichte Bauteile aus UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 763–773
- Lehmborg, S.; Budelmann, H.: Entwicklung von dünnwandigen Stabwerksknoten aus ultrahochfestem faserverstärkten Beton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium in Bochum, 07./08.11.2013, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 47–52
- Lehmborg, S.; Ledderose, L.; Mainska, J.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Non-Standard Joints for lightweight modular spatial and shell structures made from UHPFRC. In: Brasil, R. und Pauletti, R. (Hrsg.): Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints – Proc. of the IASS-SLTE 2014 Symp., 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 2014, 9 S.
- Lehmborg, S.; Mainska, J.; Ledderose, L.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Neuartige Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkelemente aus UHPFRC. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 122–139 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171431>
- Lehmborg, S.; Ledderose, L.; Wirth, F.; Budelmann, H.; Kloft, H.: From Jointing Systems to Light-Weight Structures: Hybrid, dry-fit beam, surface and spatial structures made of UHPFRC. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Annual Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), Beitrag Nr. IASS2015-417738, publiziert auf USB-Stick: 8 S.
- Lehmborg, S.; Ledderose, L.; Wirth, F.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Von der Bauteilföugung zu leichten Tragwerken: Trocken geföugte Flächenelemente aus UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 806–815
- Budelmann, H.; Lehmborg, S.: Von der Küchenarbeitsplatte zum leichten Tragwerk – Was kann ultrahochfester faserverstärkter Feinkornbeton? In: Scheerer, S.; van Stipriaan, U. (Hrsg.): Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2016, S. 90–103 – https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/publikationen/jahrbuch_Monographien/MC60
- Lehmborg, S.; Budelmann, H.: Modulare, dünnwandige Plattenbalken aus UHPFRC mit Non-Standard Föugungen. Kurzberichte aus der Forschung, 2016, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig – <http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/docpool/reports/KaF-2016-11.pdf>
- Ledderose, L.; Lehmborg, S.; Wirth, F.; Budelmann, H.; Kloft, H.: From digital design to precise production: Dry-jointed coffered ceiling made of UHPFRC-components. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, Beitrag Nr. 9194, Book of Abstracts: S. 124, Langfassung digital: 8 S.

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Lehmborg, S.: Herstellung und Eigenschaften von dünnwandigen, trocken geföugten Bauteilen aus ultrahochfestem faserverstärkten Feinkornbeton. iBMB, 2018

Studienarbeiten | Student's research projects

- Flaum, A.: Ein Blick auf das Wirken des Schweizer Bauingenieur Maillart am Beispiel des Lagerhausvordaches in Chiasso. Studienarbeit, iBMB, 2012
- Al-Falah, S.: Mechanisches Verhalten von dünnwandigen Bauteilen aus ultrahochfestem faserverstärkten Beton. Bachelorarbeit, iBMB, 2013
- Günes, E.: Ermittlung der Bruchenergie bei ultrahochfestem Beton. Studienarbeit, iBMB, 2013
- Mützel, M.: Dünnwandige Querschnitte aus vorgespanntem faserbewehrten ultrahochfesten Beton. Studienarbeit, iBMB, 2013
- Le Vo Phuong, T.: Faserbetoneigenschaften im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit. Bachelorarbeit, iBMB, 2014
- Wagner, N.: Wirksamkeit von kurzen Mikrostaalfasern bei ultrahochfestem faserverstärkten Beton. Masterarbeit, iBMB, 2015
- Baumgarten, V.: Tragverhalten eines dünnwandigen biegesteifen Knotens aus UHPFRC. Studienarbeit, iBMB, 2016
- Peters, A.: Wirksamkeit von kurzen Mikrostaalfasern bei ultrahochfestem faserverstärkten Feinkornbeton. Masterarbeit, iBMB, 2016

- Stratemeier, B.: Entwurf, Bemessung, Optimierung und Bau eines trocken gestoßenen Schalentragerwerks aus UHPFRC. Masterarbeit, ITE, 2016

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisions-Schalungen aus 100 % recycelbaren Industrie-Wachsen zur Herstellung von geometrisch komplexen Beton-Bauteilen | Non-Waste-Wax-Formwork: Novel precise formwork-technology on basis of 100% recyclable industrial wax for the fabrication of geometrically complex concrete elements

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft und Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder (TU Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF))
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) SPP 1542, Phase II
Laufzeit Period:	01.12.2014–30.11.2016
Partner Partner:	B+S Engineering, Rheine

- Modulares und vollautomatisiertes Fertigungsverfahren für frei geformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von technischen Wachsen; Verfahrensentwicklung, Analyse und Versuche zur Fertigungsverfahren für frei geformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von technischen Wachsen | Modular and fully automated production process for free formed concrete formwork in building construction based on technical waxes; process development, analysis and tests of the production process for free formed concrete formwork in building construction based on technical wax

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Förderer Funding:	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)
Laufzeit Period:	01.04.2017–31.12.2018
Partner Partner:	B+S Engineering, Rheine

- Innovative Non-Waste-Wachsschalungen für die Herstellung von hochpräzisen Maschinengestellen aus UHPC | Innovative non-waste wax moulds for the production of high-precision UHPC machine racks

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
Laufzeit Period:	01.01.2018–31.12.2019
Partner Partners:	Sudholt-Wasemann GmbH, Herzebrock-Clarholz Dyckerhoff GmbH, Wilhelm Dyckerhoff Institut, Wiesbaden

- Grundlegende Untersuchungen zur robotergestützten magnetischen Verteilung und Ausrichtung von Mikro-stahlfasern in dünnwandigen UHPFRC-Bauteilen | Basic investigations on the robot-aided magnetic distribution and alignment of micro steel fibres in thin-walled UHPFRC components

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
Laufzeit Period:	01.01.2019–28.02.2021

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation des SPP-Jahrestreffens in Braunschweig im November 2012 | Organization of the SPP annual meeting in Braunschweig, November 2012
- Herstellung des Demonstrators uni-con² (in Kooperation mit dem Projektteam Empelmann), SPP-1542-interner Wettbewerb, 02/2017 | Production of the demonstrator uni-con² (in cooperation with the project team Empelmann), SPP 1542 internal competition, 02/2017

Entwurf und Herstellung von dünnwandigen Faltwerken aus zementbasierten Verbundwerkstoffen | Design and construction of folded plate structures made of novel cementitious composites

- ▶ Jan Dirk van der Woerd, Josef Hegger, Rostislav Chudoba
- ▶ Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen University

1 Motivation und Zielsetzung

Der in den Ingenieurwissenschaften zunehmend populäre Einsatz der Origami-Technik eröffnet neue Möglichkeiten zur Herstellung von effizienten Tragkonstruktionen [1]–[5]. In Verbindung mit leistungsfähigen, zementbasierten Verbundwerkstoffen bietet die Origami-Technik einen innovativen Ansatz für Entwurf und Realisierung von leichten tragenden Strukturen nach dem Prinzip *form follows force* – dem Grundgedanken des SPP 1542.

Aktuelle Entwicklungen, wie Textilbeton, ermöglichen die Ausführung von extrem dünnwandigen und schlanken Betonstrukturen [6], [7]. Außerdem besitzen die als Bewehrung verwendeten Materialien – i. d. R. alkali-resistentes (AR) Glas oder Carbon – neben hohen charakteristischen Festigkeiten die Eigenschaft, leicht biegsam zu sein. Diese Flexibilität erlaubt die Übertragung des Prinzips des Faltens auf dünne Betonplatten.

Um aus Beton ein faltbares Medium ähnlich Papier zu machen, wurden zwei Verfahren entwickelt:

- Einführen von Faltlinien mit Hilfe von Aussparungselementen,
- Falten des Betons im noch frischen Zustand.

1 Motivation and objectives

The increasingly popular use of origami technology in the engineering sciences opens up new possibilities for the manufacture of efficient load-bearing structures [1]–[5]. In combination with high-performance, cement-based composite materials, origami technology offers an innovative approach to the design and realisation of lightweight load-bearing structures based on the principle *form follows force* – the basic idea of SPP 1542.

Current developments, such as textile reinforced concrete, enable the execution of extremely thin-walled and slender concrete structures [6], [7]. In addition, the materials used as reinforcement – usually alkali-resistant (AR) glass or carbon – have the property of being easily bendable in addition to their high characteristic tensile strengths. This flexibility allows the principle of folding to be transferred to thin concrete plates.

Two processes were developed to turn concrete into a foldable medium similar to paper:

- introduction of crease lines with spacer elements and
- folding of concrete in the fresh state.

Das erste Verfahren wurde mit *fold-and-grout* [8] benannt und ist in Bild 1 dargestellt. Vor der Betonage werden an der Position der zukünftigen Faltkante ober- und unterhalb des Textils linienförmige Aussparungselemente angeordnet. Nach dem Erhärten des Betons und dem Entfernen der Aussparungselemente kann die Platte hier gefaltet werden. Zwischen den starren Betonfacetten wird durch die durchlaufende zentrische Bewehrung ein definiertes Gelenk erzeugt. Nach Erreichen des gewünschten Faltwinkels wird die Faltkante mit Mörtel verfügt und ist in ihrer Lage fixiert.

The first method was named *fold-and-grout* [8] and is shown in Figure 1. Before concreting, linear spacer elements are placed at the position of the future crease lines above and below the textile fabric. After hardening of the concrete the spacer elements were removed and the plate can be folded. A defined joint is created between the rigid concrete facets by the continuous centric reinforcement. After reaching the desired folding angle, the crease is grouted with mortar and fixed in its position.



Bild 1: *Fold-and-grout:* Falten von Beton mit definierter Faltkante und nachträglichem Vermörteln [1] | **Fig. 1:** *Fold-and-grout:* folding of a concrete plate with a pre-defined crease and subsequent grouting

Beim zweiten Verfahren, das als *fold-in-fresh* [8] bezeichnet wird, wird der Beton noch im frischen Zustand gefaltet. Das Vorgehen ist in Bild 2 zu sehen. Ein Liniengelenk ist in die Schalung eingebaut, womit der Faltmechanismus von der Betonplatte in die Schalung verschoben wurde. Im noch frischen Zustand wird die textilbewehrte Platte durch das Falten der Schalung aus der Ebene in die räumliche Form gebracht. Die Bewehrung hält dabei den Beton in seiner Position und verhindert das Abfließen von den geneigten Flächen. Nach dem Erhärten wird die Schalung entfernt und ist das Element fertig.

In the second method, named as *fold-in-fresh* [8], the concrete is folded while still fresh in unhardened state. The procedure can be seen in Fig. 2. A line joint is built into the formwork, and so the folding mechanism is shifted from the concrete plate into the formwork. While still fresh, the textile-reinforced plate is brought from the plane into the spatial configuration by folding the formwork. The reinforcement keeps the concrete in position and prevents it from flowing off the inclined surfaces. After hardening, the formwork is removed and the element is completed.

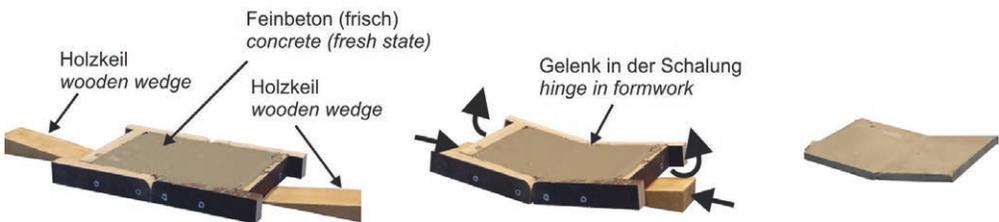


Bild 2: *Fold-in-fresh:* Falten von Beton im frischen Zustand | **Fig. 2:** *Fold-in-fresh:* folding of concrete in fresh state

Die beiden Ansätze bildeten die Grundlage für den Entwurf und Bau von dünnwandigen faltstrukturen. Sind diese Strukturen so gestaltet, dass gleichzeitig die Scheiben- und Platten-tragwirkung aktiviert wird, spricht man von faltwerken, die sich durch ein sehr günstiges tragverhalten kennzeichnen. Da der Begriff des faltens sich hier nicht nur auf die endgültige Form bezieht, sondern auch auf die herstellung, können diese strukturen im wahrsten sinne des wortes als faltwerke bezeichnet werden. Dies unterscheidet den hier im projekt verfolgten ansatz fundamental von anderen neueren ansätzen zur herstellung von faltwerken, bei welchen diese aus einzelnen flächigen elementen gefügt werden [5], [9]–[11], oder auch von klassischen stahlbetonfaltwerken, die auf festen schalungen, die eine gefaltete geometrie ergeben, gleich in ihrer endform gefertigt werden [12].

Grundlagen für den entwurf einer faltstruktur sind faltmuster, die sich aus einer vielzahl von faltkanten zusammensetzen. Durch die wahl des faltmusters und der faltwinkel bei der anschließenden faltung lässt sich ein breites spektrum an formen erzeugen. Eine reiche quelle für faltmuster bietet das origami. Durch die zusammenführung des durch origami aufgespannten entwurfsraums und des faltbaren betons entsteht ein neuer ansatz für die herstellung von leichten tragwerken. Das ziel war die erweiterung der formenvielfalt von leichten massivbaukonstruktionen unter vermeidung aufwendiger schalungen. Betonelemente werden in einer ebenen schalung erstellt und durch das falten in eine räumliche struktur überführt. In anlehnung an den japanischen begriff *Origami* wurde der im projekt konzipierten entwurfs- und herstellmethodik zum falten von beton – englisch: *concrete* – der name *Oricrete* gegeben [13]. Die entwicklung der methoden geschah sukzessive und ging einher mit dem bau von verschiedenen klein- und großformatigen prototypen.

These two approaches formed the basis for the design and construction of thin-walled folded structures. If these structures are designed in such a way that the slab and plate load-bearing effect is activated at the same time, one speaks of folded plate structures. They are characterised by a very favourable supporting behaviour. Since the term folding refers here not only to the final form, but also to the manufacturing process, these structures can also literally be called folded plate structures. This fundamentally distinguishes the approach pursued here in the project from other more recent approaches to the production of folded plate structures, in which these are assembled from individual flat elements [5], [9]–[11], or also from classical folded plate structures made of reinforced concrete structures. Classical folded plate structures are produced in their final form with folded formwork [12].

The design of a folded structure is based on crease patterns consisting of a large number of crease lines. A wide range of shapes can be created by selection of the crease pattern and the folding angles during the subsequent folding process. A rich source for crease pattern is origami. The combination of the design space determined by origami and the foldable concrete creates a new approach to the fabrication of lightweight structures. The aim was to expand the variety of shapes of lightweight structures while avoiding elaborate formwork. Concrete elements are created in a flat formwork and transferred into a spatial structure by folding. Based on the Japanese term *Origami*, the design and manufacturing methodology for folding concrete, which was conceived in the project, was given the name '*oricrete*' [13]. The development of the methods took place successively and was accompanied by the construction of various small and large scale prototypes.

2 Entwurfs- und Herstellmethodik: Oricrete

2.1 Faltmuster für die Erstellung von Faltwerken

Beim Falten von Strukturen oder Figuren aus einem Blatt Papier stellt man oft fest, dass es immer wieder Schritte gibt, bei der sich die Papierflächen in ihrer Ebene verformen oder gebogen werden müssen. Solche Schritte lassen sich mit steifen Materialien, die keine Verformung in der Ebene zulassen, nicht umsetzen. Es gibt allerdings auch Faltmuster, die sich problemlos mit starren Materialien falten lassen. Diese Faltmuster besitzen eine Eigenschaft, die als *rigid foldability* bezeichnet wird. Diese Muster sind besonders für technische Anwendungen interessant [1], [14]. Eine Übersicht von *rigid foldable* bzw. starr faltbaren Faltmustern findet sich in [15]. Beim Falten dieser Muster treten lediglich Rotationen entlang der Faltkanten auf und die Facetten bleiben eben. Für den Einsatz im Projekt wurden hauptsächlich das Yoshimura-Faltmuster (links im Bild 3) [16] sowie das Waterbomb-Faltmuster (Bild 3, rechts) [17] verwendet, die diese Eigenschaft haben.

2 Design and manufacturing methodology: Oricrete

2.1 Crease patterns for the production of folded plate structures

When folding structures or figures from a sheet of paper, one often notices that there are always steps in which the paper surfaces have to be deformed or bent in their plane. Such steps cannot be realized with stiff materials that do not allow any deformation in the plane. However, there are also crease patterns that can easily be folded with rigid materials. These folding patterns have a property known as rigid foldability. These patterns are particularly interesting for technical applications [1], [14]. An overview of rigid foldable crease patterns can be found in [15]. When folding these patterns, only rotations along the creases occur and the facets remain flat. The Yoshimura crease pattern (left in Fig. 3) [16] and the waterbomb crease pattern (Fig. 3, right) [17], which have this property, were mainly used in the project.

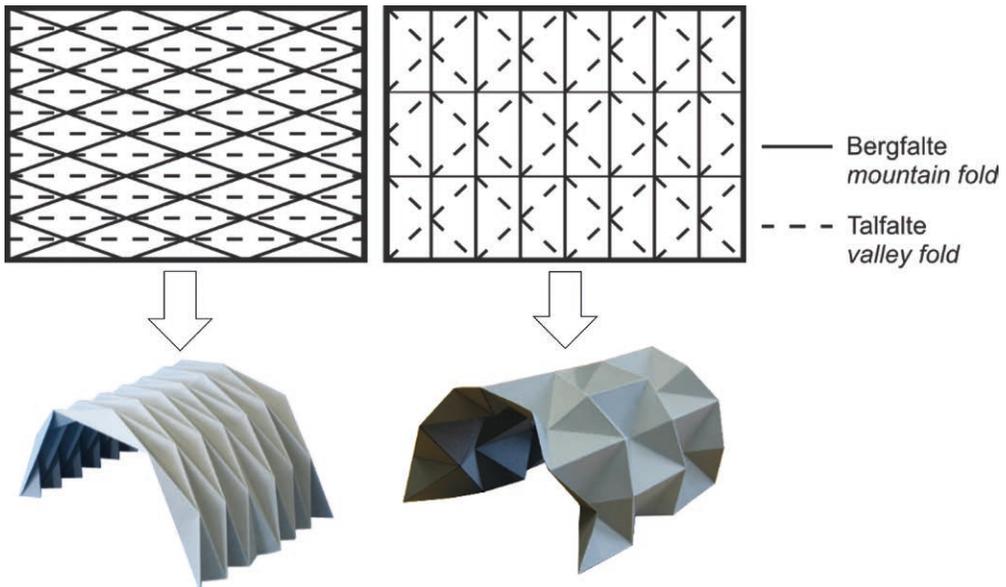


Bild 3: Starr faltbare Faltmuster: Yoshimura-Faltmuster (links) und Waterbomb-Faltmuster (rechts) | **Fig. 3:** Rigid foldable crease pattern: Yoshimura crease pattern (left) and waterbomb crease pattern (right)

2.2 Simulations- und Modellierungsrahmen Oricreate

Aufgrund der vielen Freiheitsgrade der Faltmuster sind die Gestaltungsmöglichkeiten für die endgültige Form einer Tragstruktur sehr vielfältig. Der Zusammenhang zwischen dem Faltmuster und der entstehenden Form ist nur für einfache Fälle offensichtlich. Zur gezielten Analyse und Steuerung des Formfindungsprozesses und des damit verbundenen Faltvorgangs ist die Unterstützung durch eine numerische Modellierung unabdingbar. Ebenso sind für eine effiziente Herstellung Hebe- und Faltmaschinen zu entwerfen, welche eine exakte Steuerung des Faltvorgangs ermöglichen.

Für den Entwurf und die Realisierung der Demonstratoren wurde am Institut eine Simulationsplattform entwickelt, die mit der Programmiersprache PYTHON implementiert wurde. Ihr Name *Oricreate* soll unterstreichen, dass das Modell materialunabhängig ist und allgemein für die Herstellung von Faltenwerken durch Faltung eingesetzt werden kann.

Das Modell ist als Optimierungsproblem formuliert und es lassen sich eine Vielzahl von Anwendungsaufgaben umsetzen. Die Hauptanwendungen sind:

- Formfindung,
- Modellierung der Formgebung mittels Faltparaten,
- Simulation des Trag- und Verformungsverhaltens der Falstrukturen.

Durch die Wahl einer Zielfunktion und die Kombination mit entsprechenden Nebenbedingungen wird das Modell für die jeweilige Aufgabe angepasst.

Nähere Details zur mathematischen Formulierung und Implementierung des numerischen Modells enthält [18]. Der Quelltext des Oricreate-Toolkits ist öffentlich zugänglich auf der Open-Source-Management-Plattform www.github.com [19]. Eine Online-Dokumentation mit Beispielen der Simulationsergebnisse und Animationen der simulierten Faltprozesse ist unter www.oricrete.com [20] verfügbar.

2.2 Simulation and modelling framework oricreate

Due to the many degrees of freedom of the crease pattern, the design space for the final shape of a load-bearing structure are very large. The connection between the crease pattern and the resulting shape is only obvious in simple cases. For the targeted analysis and control of the form-finding process and the associated folding process, support by numerical modelling is indispensable. Lifting and folding machines, which enable precise control of the folding process, must also be designed for efficient production.

For the design and realization of the prototypes, a simulation platform was developed at our institute, which was implemented with the programming language PYTHON. Its name '*oricreate*' should underline that the model is material independent and can generally be used for the production of folded plate structures by folding.

The model is formulated as an optimization problem and a multitude of application tasks can be realized. The main applications are:

- form finding,
- modelling of the folding process with folding devices,
- simulation of the load-bearing behaviour of folded structures.

By selecting a goal function and combining it with corresponding constraints, the model is adapted to the respective task.

Further details on the mathematical formulation and implementation of the numerical model can be found in [18]. The source code of the oricreate-toolkit is publicly available on the open source management platform www.github.com [19]. An online documentation with examples of the simulation results and animations of the simulated folding processes is available at www.oricrete.com [20].

2.3 Gestaltungsmöglichkeiten der Form und des Tragverhaltens von Faltwerken

Durch Studien mit dem Yoshimura-Faltmuster wurden drei Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung und Gestaltung der Form identifiziert [13]:

- Verteilung der Faltwinkel in der Endkonfiguration,
- Anpassung des Faltmusters unter Einhaltung bestimmter winkel- und längenbasierter Bedingungen,
- Modularisierung der globalen Geometrie und Montage des Gesamttragwerks aus separat gefertigten Einzelsegmenten.

Trotz der Bedingung der *rigid foldability* bleibt der Gestaltungsraum der erzielbaren Formen sehr groß. Neben der globalen Form, die auch das globale Tragverhalten bestimmt, können durch die Anordnung und Ausbildung der Faltkanten die Steifigkeitsverhältnisse innerhalb der Struktur und somit das lokale Tragverhalten gezielt beeinflusst werden. Auf das Tragverhalten des Querschnittes haben unter anderem die folgenden Parameter Einfluss, s. a. Bilder 4 und 5:

- die Faltfrequenz,
- die Faltungshöhe,
- Ausrichtung der Faltkante zur Tragrichtung.

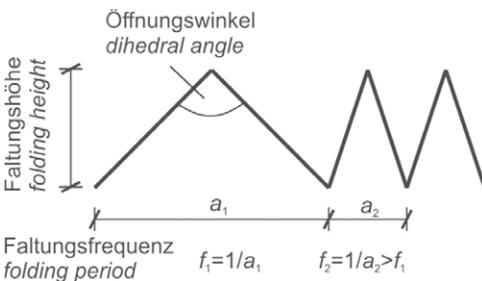


Bild 4: Merkmale von Faltungen, die das Tragverhalten des Querschnittes beeinflussen | **Fig. 4:** Characteristics of folds, influencing the load bearing behaviour of the cross-section

Die Faltfrequenz und die Faltungshöhe beeinflussen direkt das Widerstandsmoment und somit die Biegetragfähigkeit des Querschnittes.

2.3 Design options for the shape and for the load-bearing behaviour of folded plate structures

Through studies with the Yoshimura crease pattern, three measures for targeted influencing and shaping of the form were identified [13]:

- distribution of dihedral angles in the final configuration,
- adaption of the crease pattern under consideration of certain angle- and length-based constraints,
- modularization of the global geometry and assembly of the entire load-bearing structure from separately manufactured segments.

Despite the condition of rigid foldability, the design space of the achievable forms remains very large. In addition to the global shape, which also determines the global load-bearing behaviour, the arrangement and formation of the folded edges can influence the stiffness ratios within the structure and thus the local load-bearing behaviour. The following parameters, among others, have an influence on the load-bearing behaviour of the cross-section, see Figures 4 and 5:

- the folding period,
- the folding height,
- alignment of the folded edges to the supporting direction.

The folding frequency and the folding height directly influence the moment of resistance and thus the bending load capacity of the cross-section. The orientation of the folded edge to the main load direction has a special influence, as could be observed with experimental investigations on small scale folded vaults (Fig. 5). It was found that in configurations with diagonal folded edges with an angle smaller than 45° to the vertical (main load-bearing direction), the first cracking occurred in the facets (Fig. 5, left). At angles greater than 45°, the folded edges first cracked continuously (Fig. 5, right).

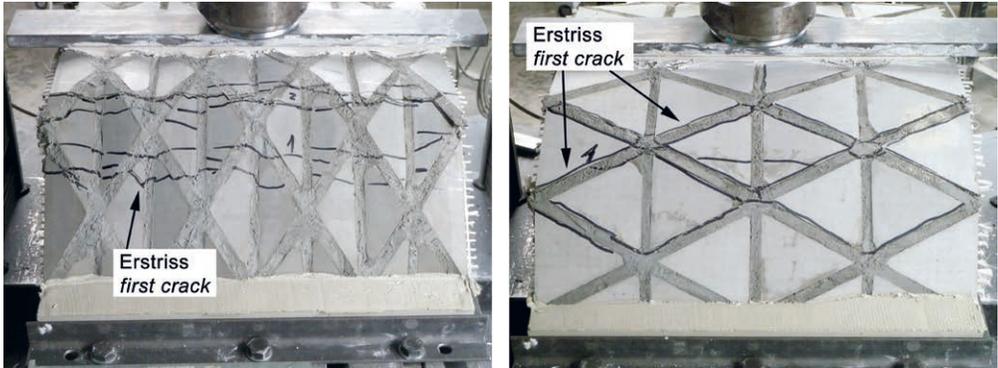


Bild 5: Ort des Erstrisses und Rissbild bei experimentellen Untersuchungen an kleinformatigen Bögen: Erstrissbildung in den Facetten bei diagonalen Faltkanten mit einem Winkel kleiner 45° zwischen Diagonale und vertikaler Faltkante (links); Erstrissbildung in Faltkanten mit Winkeln größer als 45° (rechts) | **Fig. 5:** Location of the first crack in experimental investigations of small scale vaults: first crack within the facets at an angle smaller than 45° between vertical and diagonal crease (left) and first crack within creases with an angle bigger than 45° between vertical and diagonal crease (right)

Einen besonderen Einfluss hat die Ausrichtung der Faltkante zur Haupttragrichtung, wie mit experimentellen Untersuchungen an kleinformatigen gefalteten Bögen beobachtet werden konnte (Bild 5). Es wurde festgestellt, dass bei steilen diagonalen Faltkanten mit einem Winkel kleiner 45° zur Vertikalen (Haupttragrichtung), die Erstrissbildung in den Facetten auftrat (Bild 5, links). Bei Winkeln größer 45° rissen durchgehend zuerst die Faltkanten (Bild 5, rechts).

2.4 Formfindung für Falwerke

Ein einfacher und schneller Ansatz, um neue Muster und Formen zu finden, ist das Probieren von Hand mit Papier. Für komplexere Formen und Geometrien werden die Zusammenhänge aber schnell unübersichtlich und ein experimenteller Ansatz mit Papier ist nicht mehr zielführend. Für den Entwurf von faltstrukturen auf Basis des Yoshimura-Faltmusters wurden drei Ansätze konzipiert:

- Beschreibung der geometrischen Beziehung zwischen Faltmuster und Form,
- Formfindung mit einer Faltsimulation unter Variation der kinematischen Randbedingungen,
- Formfindung mit Hilfe von Optimierungsansätzen.

2.4 Form finding for folded plate structures

A simple and quick approach to find new patterns and shapes is to try them out by hand with paper. For more complex shapes and geometries, however, the connections quickly become unclear and an experimental approach with paper is no longer effective. Three approaches were developed for the design of folded structures based on the Yoshimura folding pattern:

- description of the geometric relationship between crease pattern and shape,
- form finding with a folding simulation under variation of the kinematic boundary conditions,
- form finding with the help of optimization approaches.

The first approach can only be used for simple and regular structures such as barrel vaults. The other two approaches could be implemented with the oricrete platform.

2.5 Fold-and-grout method

2.5.1 Production of an oricrete plate

The production of a folding-prefab plate or oricrete plate for the fold-and-grout method is shown in Fig. 6 using the example of the *bike*

Der erste Ansatz lässt sich lediglich für einfache und regelmäßige Strukturen wie z. B. Tonnenschalen einsetzen. Die beiden anderen Ansätze konnten mit der Oricrete-Plattform umgesetzt werden.

2.5 Fold-and-grout-Verfahren

2.5.1 Herstellung der Falthalbzeuge

Die Herstellung eines Falthalbzeuges für das Fold-and-grout-Verfahren ist in Bild 6 am Beispiel des Demonstrators *bike shell-ter* [21] dargestellt. Zunächst wurde auf einer Schalplatte die untere Hälfte des Faltmusters mit Aussparungsleisten, die aus mit Klebeband umwickel-

shell-ter [21]. First, the lower half of the crease pattern was made on a formwork panel with spacer elements, which consist of wooden strips wrapped into tape (a). Next, the textile reinforcement was installed with slight tension (b), which ensures a centric position of the reinforcement during concreting. After the installation of the upper layer of the crease pattern (c), the plate was concreted. The fine concrete used [22] with a maximum grain size of 0.6 mm could easily penetrate the textile with a mesh size of 8.4 mm × 8.4 mm. After the concrete had hardened, the spacer elements of the upper layer were removed (d) and the oricrete plate was ready.

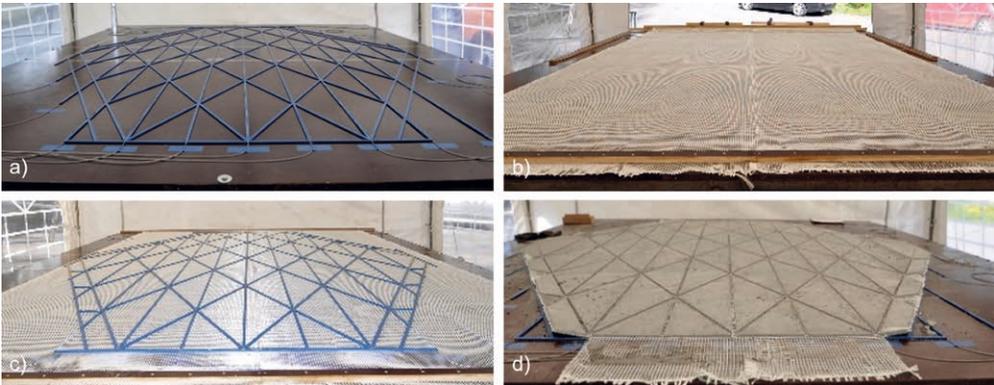


Bild 6: Herstellung eines Falthalbzeuges (hier für den Demonstrator *bike shell-ter*): a) untere Hälfte des Faltmusters, b) Einbau textile Bewehrung, c) obere Hälfte des Faltmusters vor der Betonage, d) fertiges Halbzeug | **Fig. 6:** Construction of an oricrete plate: lower half of the crease pattern a); installed textile reinforcement b); upper half of the crease pattern before concreting c); finished oricrete plate with removed spacers d)

ten Holzstreifen bestanden, hergestellt (a). Anschließend wurde die textile Bewehrung mit einer schwachen Vorspannung eingebaut (b), die eine zentrische Lage der Bewehrung während der Betonage sicherstellt. Nach dem Einbau der oberen Lage des Faltmusters (c) wurde die Platte betoniert.

Der verwendete Feinbeton [22] mit einem Größtkorn von 0,6 mm konnte das Textil mit einer Maschenweite von 8,4 mm × 8,4 mm problemlos durchdringen. Nach dem Erhärten des Betons wurden die Aussparungselemente der oberen Lage entfernt (d) und das Falthalbzeug ist fertig.

2.5.2 Lifting and folding of oricrete pre-fab plates

The oricrete plates are easy and inexpensive to produce due to the flat formwork. However, they require new working steps for lifting and folding in the further construction process. A complicating factor here is that the oricrete plates are a highly kinematic system before the fixation of the creases.

Small oricrete plates can still be lifted manually. An interesting approach to lifting was the use of suction cups in the realisation of a folding device (Fig. 7, left). With most large scale dem-

2.5.2 Heben und Falten der Falthalbzeuge

Die Falthalbzeuge sind durch die ebene Schaltung einfach und preiswert herzustellen. Sie verlangen aber im weiteren Bauablauf neuartige Arbeitsschritte für das Heben und Falten. Erschwerend hierfür ist, dass die Falthalbzeuge vor dem Fixieren der Faltkanten ein hochgradig kinematisches System sind.

Kleine Falthalbzeuge können noch manuell gehoben werden. Ein interessanter Ansatz zum Heben war die Verwendung von Saugnäpfen bei der Umsetzung eines Faltapparates (Bild 7, links). Bei den meisten großformatigen Demonstratoren wurden in ausgesuchte Faltkanten dünne Stahlseile unterhalb des Textils angeordnet. Durch die Befestigung dieser Seile an einem umlaufenden Rahmen konnte das Falthalbzeug angehoben werden.

Für die Überführung der ebenen Falthalbzeuge in die Endform wurden mehrere Konzepte entwickelt und untersucht. Als ein sehr robustes Verfahren hat sich der Einsatz einer Spantenkonstruktion erwiesen, auf der das Falthalbzeug aufgelegt und durch sein Eigengewicht in Form gebracht wird (Bild 8). Die Geometrie der Spanten wurde mit Hilfe der Oricreate-Plattform ermittelt. Neben der Formgebung übernahm die Spantenkonstruktion auch die Funktion der Fixierung der Faltstruktur für das Verfugen.

Die Faltung kann auch durch gezielte punktuelle Bewegungen, z. B. mit pneumatischen oder hydraulischen Aktuatoren durchgeführt werden.

onstrators within the project, thin steel cables were arranged in selected creases below the textile fabric. By attaching these ropes to a surrounding frame, the oricrete plate could be lifted.

Several concepts were developed and investigated for the folding process. The use of a wooden scaffolding on which the oricrete plate is placed and shaped by its dead load has proven to be a very robust method (Fig. 8). The geometry of the ribs of the scaffolding was determined using the oricrete platform. Besides the shaping, the wooden scaffolding also fulfilled the function of stabilization the folded structure for the grouting process.

Folding can also be carried out by specific punctual movements, e.g. with pneumatic or hydraulic actuators. This concept was implemented in a study with a crane adapter [23]. In order to reduce the degree of freedom of the structure, the facets were coupled with a mechanism consisting of rods and joints, whereby the folding could be carried out with a vertical movement (Fig. 7, left). Clamping profiles with a given angle are another method (Fig. 7, middle). One profile each is placed on the front and back of the crease and connected with screws through it. When the screws are tightened, the adjacent facets are brought into a folded position. A last way to fold is by hanging using the dead load (Fig. 7, right).

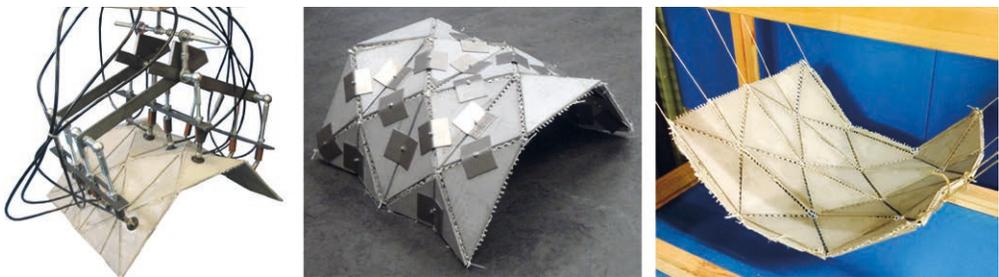


Bild 7: Verschiedene Ansätze zur Faltung von Falthalbzeugen; v. l. n. r.: kinematischer Kranadapter, Klemmbleche zur Vorgabe der Faltwinkel, Formgebung mit Eigengewicht durch Hängen | **Fig. 7:** Various approaches for folding; from left to right: folding device, clamping profiles with predefined angles, shaping with dead load by hanging

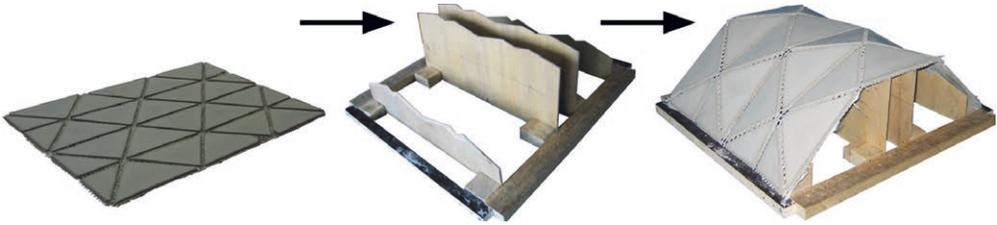


Bild 8: Falten mit Spantenkonstruktion unter Nutzung der Gravitation | Fig. 8: Folding with scaffolding and gravitation

In einer Studie mit einem Kranadapter wurde dieses Konzept umgesetzt [23]. Zur Reduktion der Freiheitsgrade der Struktur wurden die Facetten mit einem Mechanismus aus Stangen und Gelenken gekoppelt, wodurch die Faltung mit einer vertikalen Bewegung ausgeführt werden konnte (Bild 7, links). Ein weiteres Verfahren sind Klemmbleche mit einem vorgegebenen Winkel (Bild 7, Mitte). Jeweils ein Blech wird auf die Vorder- und auf die Rückseite der Faltkante gesetzt und mit Schrauben durch die Faltkante verbunden. Beim Anziehen der Schrauben werden die angrenzenden Facetten in eine gefaltete Position gebracht. Ein letztes Verfahren ist die Formgebung mit Hilfe des Eigengewichts durch Hängen (Bild 7, rechts).

2.5.3 Verguss der Fugen

Im gefalteten Zustand wird die Falterwerksform durch das Vergießen der Faltfugen fixiert. Erst durch das Verfugen wird die Beweglichkeit der Struktur unterbunden und die Tragwirkung als Falterwerk aktiviert. Kriterien bei der Auswahl geeigneter Mörtel waren seine Festigkeit, die Verarbeitungsdauer, die Verarbeitbarkeit, die Optik sowie die Kosten. Mit verschiedenen Mörteln wurden Herstellversuche sowie Haftzugversuche durchgeführt. Der Fugenmörtel Ardex WA auf Epoxidharzbasis erfüllte die Ansprüche am besten. Für das Einbringen des Mörtels haben sich der manuelle Einbau mit Hilfe eines Spachtels (Bild 9, oben) sowie der Einsatz einer Mörtelspritze bewährt (Bild 9, unten). Beim Verfugen war eine stabile Lagerung essentiell.

2.5.3 Grouting of creases

Through the grouting of the creases, the flexibility of the structure is eliminated and the load-bearing mechanism of a folded plate structure activated. Criteria for the selection of suitable mortars for grouting were its strength, processing time, workability, appearance and costs. Manufacturing tests and tensile adhesion tests were carried out with various mortars. The joint mortar Ardex WA based on epoxy resin best met the requirements. Manual installation using a palette-knife (Fig. 9, top) and the use of a mortar caulking gun (Fig. 9, bottom) proved to be the best methods for applying the mortar. A stable bearing was essential for the grouting process.



Bild 9: Einbringen des Mörtels in die Faltkante: händischer Einbau (oben) und Einbau mit Mörtelspritze (unten) | Fig. 9: Pouring of grout into folding edges: manual installation (top) and installation with mortar caulking gun (bottom)

2.6 Fold-in-fresh-Verfahren

Die Herstellung eines Elements im Laminierverfahren für das Fold-in-fresh-Verfahren ist in Bild 10 dargestellt. In dem Beispiel wurde nur eine Lage Textil eingebaut, jedoch lassen sich durch den lageweisen Aufbau auch mehrlagige Bewehrungen realisieren. Die Faltung des hier hergestellten Elementes mit Hilfe von Keilen war in Bild 2 dargestellt.

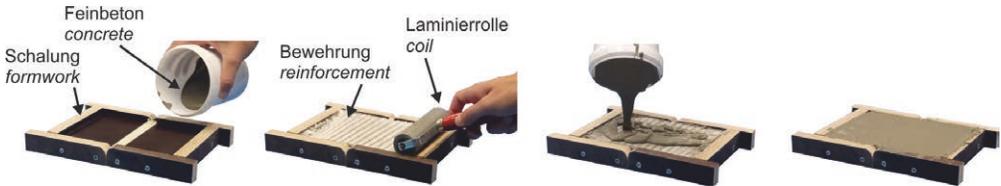


Bild 10: Exemplarische Darstellung der Herstellung einer im frischen Zustand faltbaren Platte mit dem Laminierverfahren | **Fig. 10:** Exemplary representation of the production of a plate for the fold-in-fresh-method using the lamination process

Zur Ermittlung der Herstellgrenzen des Fold-in-fresh-Verfahrens wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Es wurden unterschiedliche Textilien zur Ermittlung des maximal realisierbaren Neigungswinkels untersucht. Das beste Ergebnis von bis zu 50° Facettenneigung konnte mit ungetränkten engmaschigen Textilien erzielt werden. Der Faktor Zeit hat beim Falten eine herausragende Bedeutung. Durch den beginnenden Erhärtungsprozess des Betons nach der Betonage können mit fortschreitender Zeit stetig steilere Neigungen erreicht werden. Gleichzeitig werden die ohne Aufreißen des Querschnitts realisierbaren Faltewinkel durch das abnehmende Verformungsvermögen des Betons immer stumpfer. In diesem Spannungsfeld ist der optimale Zeitpunkt zu finden.

2.7 Vergleich der Herstellmethoden

Eine klare Aussage, dass eine Methode überlegen ist, ist nicht möglich, aber auch nicht notwendig. Beide Methoden weisen jeweils besondere Eigenschaften auf, die für unterschiedliche Einsatzzwecke von Vorteil sind. Die jeweiligen Vor- und Nachteile sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Ein Nachteil des Fold-and-grout-Verfahrens ist der aufwendige mehrstufige Prozess, der jedes

2.6 Fold-in-fresh method

The manufacturing of an element for the fold-in-fresh method using a laminating process is shown in Fig. 10. In the example, only one layer of textile reinforcement was used, however, multilayer reinforcement can also be achieved by layer-wise construction. The folding of the element produced here using wedges is shown in Fig. 2.

Experimental investigations were carried out to determine the manufacturing limits of the fold-in-fresh method. Different textile fabrics were examined to determine the maximum possible angle of inclination. The best result of up to 50° facet inclination was achieved with unimpregnated fabrics with small mesh sizes. The time factor is of outstanding importance in folding. Due to the initial hardening process of the concrete after concreting, continuously steeper inclinations can be achieved as time goes on. At the same time, the folding angles that can be achieved without tearing of the cross-section become increasingly blunt due to the decreasing deformability of the concrete. Within this domain, an optimum has to be found.

2.7 Comparison of manufacturing methods

A clear statement that a method is superior is not possible, but also not necessary. Both methods have special properties, which are advantageous for different applications. The respective advantages and disadvantages are listed in Table 1.

A disadvantage of the fold-and-grout method is the complex multi-phase process that is required each time to produce an oricrete plate. This is countered by rapid series production us-

Aspekt Aspect	Fold-and-grout	Fold-in-fresh
Serienfertigung Serial production	-	+
Schnelle Anpassung Faltmuster Fast adaption to crease pattern	+	-
Beliebige Neigungen und Faltwinkel Arbitrary inclinations and folding angle	+	-
Mehrlagige Bewehrung Multi-layer reinforcement	-	+

Tabelle 1: Vergleich ausgewählter Aspekte der Herstellmethoden | **Table 1:** Comparison of selected aspects of the manufacturing methods

Mal für die Erstellung eines Faltmusterhalbzeuges erforderlich wird. Diesem steht eine schnelle Serienfertigung mit dem Fold-in-fresh-Verfahren für Elemente mit dem gleichen Faltmuster und gleichen Grundrissabmessungen entgegen. Für eine Variation der Größe und des Faltmusters bei der Herstellung von Unikaten ist das Fold-and-grout-Verfahren besser geeignet. Der Aufwand der Erstellung eines individuellen Faltmusterhalbzeuges ist geringer als der Bau einer faltbaren Schalung. Die Präzision der gefalteten Elemente ist beim Einsatz einer faltbaren Schalung größer als beim Fold-and-grout-Verfahren. Aufgrund der Breite der Faltkante und der Flexibilität des Textils waren kleine ungeplante Verschiebungen unvermeidbar. Die maximal realisierbaren Neigungen und Öffnungswinkel sind beim Fold-in-fresh-Verfahren aufgrund der Fließfähigkeit des Betons begrenzt. Beim Fold-and-grout-Verfahren gibt es keine Einschränkungen, jedoch kann der Querschnitt nur mit einer zentrischen Lage Bewehrung ausgeführt werden. Durch die Herstellung der Platte im Laminierverfahren beim Fold-in-fresh-Verfahren kann der Querschnitt mehrlagig bewehrt werden.

2.8 Analyse des Tragverhaltens

Für die Ermittlung von Bemessungswerten und mechanischen Kennwerten wurden experimentelle Untersuchungen an Kleinkörpern durchgeführt. Im Fokus standen das Biegetragverhalten der Faltkanten und Facetten sowie das Zugtragverhalten der Facetten.

Für eine numerische Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens können die Geometriedaten der gefalteten Struktur aus der Oricreate-Plattform exportiert und als Eingabe für eine Simulation mit finiten Elementen verwendet

ing the fold-in-fresh method for elements with the same crease pattern and the same ground view dimensions. The fold-and-grout method is more suitable for varying the size and the crease pattern in the production of unique items. The effort involved in producing an oricrete plate with an individual crease pattern is less than building a foldable formwork. The precision of the folded elements is greater with the use of a foldable formwork than with the fold-and-grout method. Due to the width of the crease lines and the flexibility of the textile fabric, small-unplanned displacements were unavoidable. The maximum possible inclinations and dihedral angles with the fold-in-fresh method are limited due to the flowability of the concrete. In this respect there are no restrictions with the fold-and-grout method, but the cross-section can only be produced with a centric layer of reinforcement. By producing the plate using the laminating process of the fold-in-fresh method, the cross-section can be reinforced with several layers.

2.8 Analysis of the load-bearing behaviour

For the determination of design values and mechanical properties, experimental investigations were carried out on small specimens. The focus was on the flexural strength of the folded edges and facets as well as the tensile strength of the facets.

For a numerical analysis of the load-bearing and deformation behaviour, the geometry data of the folded structure can be exported from the oricreate platform and used as input for a finite element simulation (Figure 11, left). As failure criterion the first crack formation was defined. For this reason a linear-elastic formulation was sufficient.

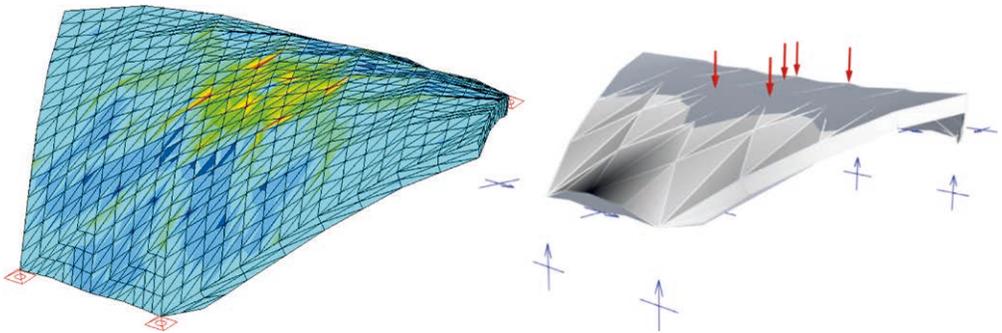


Bild 11: Numerische Untersuchung der Canopy-Faltschale: Finite-Elemente-Simulation (links), Untersuchung mit der Oricreate-Plattform (rechts) | **Fig. 11:** Numerical investigation of the canopy shell: finite element simulation (left) investigation with the Oricreate platform (right)

werden (Bild 11, links). Als Versagen wurde die Erstrissbildung definiert, wodurch eine linear-elastische Formulierung ausreichend war.

Im Rahmen der Arbeiten für die Canopy-Faltschale wurde ein weiterer Ansatz für die Tragwerk-analyse in Form einer Optimierungsaufgabe im Oricreate-Modell implementiert (Bild 11, rechts) [24]. Die Grundannahme für diesen Ansatz war, dass das Tragverhalten der Struktur von den Faltkanten bestimmt wird und diese auch als erstes versagen. Als Zielfunktion sollte das Minimum der potentiellen Energie der Struktur gefunden werden. Die gesamte potentielle Energie des Bauwerks setzte sich zusammen aus der Summe der äußeren Arbeit der einwirkenden Kräfte und des Eigengewichtes sowie der Formänderungsenergie der Faltkanten. Als Nebenbedingung wurden die Facetten als starr angenommen. Die Lösung der Optimierungsaufgabe ergab die Verformungen der Struktur und die Momentenverteilung entlang der Faltnlinien. Der Vorteil eines solchen Modellierungsansatzes besteht darin, dass der gesamte Faltungsprozess und die Strukturanalyse innerhalb des gleichen numerischen Rahmens modelliert werden können, ohne dass Daten exportiert und Ergebnisse nachbearbeitet werden müssen. Darüber hinaus hat das Modell nur eine überschaubare Anzahl an Freiheitsgraden, so dass der Rechenaufwand deutlich geringer im Vergleich mit einer Simulation mit finiten Elementen ist.

Beide Ansätze wurden im Rahmen der Arbeiten zur Canopy-Faltschale angewandt und mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen

Within the work on the canopy shell, a further approach for structural analysis was implemented in the form of an optimization problem in the oricreate model (Figure 11, right) [24]. The basic assumption for this approach was that the load-bearing behaviour of the structure is determined by the creases and that these also fail first. As a goal function the minimum of the potential energy of the structure should be found. The total potential energy of the structure was formulated as a sum of the external work due to the applied loads and stored energy due to the bending of fold lines. Additionally, the equality constraints of rigid facets were applied. The solution of the optimization problem delivers the deformations of the canopy and the distribution of rotational moments along the fold lines. The advantage of such a modelling approach is that the whole folding process and the structural analysis can be modelled within the same numerical framework without a need of data export and of post processing of results. Furthermore, the model consists of small number of degrees of freedom in contrast to a finite element (FE) simulation, which means that the computational effort is significantly lower.

Both approaches were applied in the work on the canopy shell and compared with the results of the experimental investigations [24]. Both were able to reproduce the deformation figure sufficiently well. However, the experimental investigation showed that the assumption of the fold line as the weakest element was not correct. The first cracking occurred in the facets. Due to

verglichen [24]. Beide konnten die Verformungsfigur ausreichend gut wiedergeben. Die experimentelle Untersuchung zeigte jedoch, dass die Annahme der Faltkante als schwächstes Element nicht korrekt war. Die Erstrissbildung trat in den Facetten auf. Durch diese fehlerhafte Annahme überschätzte die Simulation mit der Oricreate-Plattform die Erstrisslast von 5 kN mit 17,5 kN deutlich. Es ist zu erwarten, dass die Erweiterung der Simulation mit dem elastischen Verhalten der Facetten zu einem besseren Ergebnis führt. Unter der Annahme der minimalen Biegezugfestigkeit des Betons von 5 N/mm² wurde für das Erstrissmoment des Facettenquerschnitts ein Wert von 0,084 kNm/m ermittelt. In der FE-Simulation mit Infograph wurde dieser Wert bei einer Last von 4,5 kN erreicht.

3 Prototypen

3.1 Kleinformatige Prototypen

Zu Beginn der Untersuchungen wurden nur kleinformatige, modellartige Strukturen mit dem Fold-and-grout-Verfahren gebaut und untersucht. Der erste Prototyp eines Bogens mit dem Yoshimura-Faltmuster ist in Bild 12 (links) dargestellt. Als Basis diente eine 6 mm dicke Platte aus UHPC mit den Abmessungen 1,40 m × 0,80 m. Weitere kleinformatige Bögen und Probekörper wurden gebaut, um u. a. Fragestellungen zur Ausbildung der Faltkanten, der Faltung selbst und der Verfugung zu klären. Das Gestaltungskonzept der Segmentierung wurde im Rahmen einer Studie untersucht [25]. Aus 20 Segmenten wurde eine Kuppel gefertigt, die mit dem Namen *Oridome* bezeichnet



this incorrect assumption, the simulation with the oricreate platform clearly overestimated the first crack load of 5 kN with 17.5 kN. It is to be expected that the extension of the simulation with the elastic behaviour of the facets leads to a better result. Assuming the minimum bending tensile strength of the concrete with 5 N/mm², a value of 0.084 kNm/m was determined for the first crack moment of the facet cross-section. In the FE simulation with Infograph, this value was achieved with a load of 4.5 kN.

3 Prototypes

3.1 Small scale prototypes

At the beginning of the investigations, only small scale, model-like structures were built and investigated using the fold-and-grout method. The first prototype of a vault with the Yoshimura crease pattern is shown in figure 12 (left). A 6 mm thick UHPC plate measuring 1.40 m × 0.80 m served as basis. Further small scale vaults and specimens were built in order to clarify issues such as the design of the folding edges, the folding itself and the jointing. The design concept of segmentation was investigated in a study [25]. From 20 segments a dome was assembled, which was called *Oridome* (picture 12, right). It had a height of 40 cm and a diameter of 120 cm.

3.2 Singly-curved folded plate structures

Once the basic principles had been developed, the structures were to take on larger dimensions based on practical application scenar-



Bild 12: Kleinformatige Prototypen: erste Oricrete-Struktur (links) und Oridome, gefügt aus 20 Segmenten (rechts) | **Fig. 12:** Small scale prototypes: first oricrete structure (left) and 'Oridome' made out of 20 segments (right)

wurde (Bild 12, rechts). Sie hatte eine Höhe von 40 cm und einen Durchmesser von 120 cm.

3.2 Einfach gekrümmte Falwerke

Nach der Erarbeitung von Grundlagen sollten die Strukturen größere Abmessungen annehmen, die sich an praktischen Einsatzszenarien orientierten. Es wurden als erstes zwei Tonnenschalen gebaut und geprüft [26], [27]. Die Schalen wurden aus identischen, 1 cm dicken Falthalbzeugen mit Abmessungen von 2,4 m × 3,0 m hergestellt. Als Bewehrung wurde ein offenmaschiges Gelege aus AR-Glasfasern verwendet. Für den Faltprozess der ersten Schale in Bild 13 wurden Seile und eine Unterstützungsstruktur aus Spanten eingesetzt (Bild 14, links). Durch das langsame Ablegen der Platte auf die Spantenkonstruktion wurde das Halbzeug gefaltet (Bild 14, rechts).

Ein alternatives Konzept für die Faltung wurde bei der zweiten gefalteten Schale erprobt. Die zylindrische Zielform wurde zunächst mit Hilfe von Seilen und dem Eigengewicht in einer auf dem Kopf stehenden hängenden Konfiguration angenähert (Bild 15, links). Für die Feinjustierung der Form und die Fixierung wurden im jeweiligen Winkel der Falkante gekantete Bleche eingesetzt. Als zusätzlicher Arbeitsschritt musste die gesamte Schale gewendet werden, was mit Hilfe eines Kranes und eines Gabelstaplers gelang (Bild 15, rechts). Zur endgültigen Fixierung der Falkanten der Tonnenschalen wurden diese mit Mörtel verfügt.

Die Tragfähigkeit beider Schalen wurde untersucht [27]. Dazu wurde eine Einzellast jeweils



Bild 13: Tonnenschale I | Fig. 13: Barrel vault I

ios. First two barrel vaults were built and tested [26], [27]. The shells were made of identical oricrete pre-fab plates with dimensions of 2.4 m × 3.0 m and a thickness of one centimetre. An open-mesh fabric made of AR glass was used as reinforcement. For the folding process of the first shell in Fig. 13, ropes and a scaffolding were used (Fig. 14, left). The oricrete pre-fab plate was folded by slowly placing the plate on the frame construction (Fig. 14, right).

An alternative concept for folding was tested with the second barrel vault. The cylindrical target shape was approximated using ropes and dead load in an upside-down hanging configuration (Fig. 15, left). For the fine adjustment of the form and the fixation, clamping profiles with the respective angle of the folded edge were used. As an additional work step, the entire shell had to be turned, which was achieved with the aid of a crane and a forklift truck (Fig. 15, right). For the final fixation of the folded edges of the barrel vaults, these were grouted with mortar.

The load-bearing capacity of both vaults was investigated [27]. For this purpose a single load was applied in the middle of each vault. Barrel



Bild 14: Faltung der Tonnenschale I: Spantenkonstruktion (links) und Faltung des Halbzeuges durch Ablassen auf die Spantenkonstruktion (rechts) | Fig. 14: Folding process of barrel vault I: scaffolding (left); folding of the oricrete plate by use of the scaffolding (right)

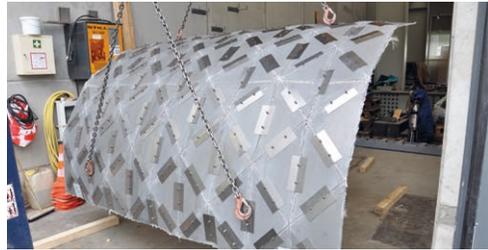


Bild 15: Arbeitsschritte bei der Herstellung von Tonnenschale II: Annäherung der Form durch Hängen (links); Wenden der Struktur (rechts) | **Fig. 15:** Steps during the construction process of barrel vault II: approximation of the form in a hanging state (left); turning (right)

mittig auf den Scheitel aufgebracht. Tonnenschale I war auf vier Punkten gelagert. Dagegen wurde die Tonnenschale II auf beiden Seiten liniengelagert. Bei der Tonnenschale I versagte eine Faltkante in der Nähe des Auflagers bei einer Last von 2,7 kN. Die Ausbildung des Auflagers war nicht optimal, da der Kraftfluss hier die Faltkante senkrecht schneidet. Tonnenschale II versagte bei einer Last von 8,1 kN durch das Aufreißen der senkrechten Faltkante in der Mitte der Schale auf einer Seite. Dieser Versagensmodus war völlig unerwartet. Im Nachgang zeigte sich, dass die Unterkonstruktion des Linienlagers zu weich gewesen war und das Tragverhalten eher dem eines Einfeldträgers entsprach. Nachdem die resultierenden Zugspannungen in Feldmitte die Erstrissspannung der Faltkante erreichten, versagte die Struktur schlagartig, da der Querschnitt mit nur einer Lage textiler Bewehrung unterbewehrt war.

Der Entwurf der Tonnenschalen war durch eher flachere Öffnungswinkel von bis zu 162° geprägt. Deutlich spitzere Winkel zwischen den Facetten bis 107° konnten beim *bike shell-ter* (Bild 16) realisiert werden [21]. Das Falthalbezeug (Bild 6) hatte eine Länge von 3 m und in der Mitte eine Breite von 2,4 m, die sich zu den Seiten auf 0,8 m verringerte. Für den Faltprozess wurden eine vereinfachte Spantenkonstruktion sowie Klemmbleche eingesetzt. Allerdings verlief der Faltprozess nicht reibungslos und es waren viele manuelle Korrekturen erforderlich. Auch wurde das Textil aus AR-Glas in den Faltkanten stark beansprucht und riss vor allem an den Kontaktstellen zu den Hebeseilen. Nach diesen Erfahrungen wurde für die folgende Canopy-Faltschale ein textiles Gelege aus Carbon mit

vault I was supported on four points. In contrast, barrel vault II was linearly supported on both sides. In the case of barrel vault I, a crease next to the support failed at a load of 2.7 kN. The design of the support was not optimal, as the force flow here cuts the crease vertically. Barrel vault II failed at a load of 8.1 kN. A vertical crease at one side was torn apart. This failure mode was completely unexpected. Afterwards it showed that the substructure of the linear support was too soft. The overall behaviour of the support was more like a simply supported beam. After the initial cracking stress of the crease was reached at maximum stressed spot in the middle of the span, the structure failed abruptly. The cross-section was underreinforced with only one layer of textile reinforcement.

The design of the barrel vaults was characterised by rather flat dihedral angles of up to 162° . Significant steeper angles between the facets of up to 107° could be achieved with the *bike shell-ter* (Fig. 16) [21]. The oricrete plate (Fig. 6) had a length of 3 m and a width of 2.4 m at the centre, which was reduced to 0.8 m on the sides. A simplified scaffolding and clamping profiles were used for the folding process. However, the folding process did not run smoothly and many manual corrections were necessary. The AR-glass textile fabric was also subjected to heavy wear in the creases and tore, especially at the contact points with the lifting ropes. Based on this experience, a carbon textile fabric with a coating of styrol-butadien rubber (SBR) was used for the following canopy shell, which proved to be much more robust.

SBR-Tränkung eingesetzt, dass sich als deutlich robuster erwies.

3.3 Doppelt gekrümmtes Faltwerk: Canopy-Faltschale

Ausgehend von einer identischen Grundplatte wie beim bike shell-ter wurde mit der in Bild 17 (rechts) dargestellten Canopy-Schale der Entwurfsraum auf doppelt gekrümmte Strukturen erweitert [24]. Durch den Einbezug des Hängeprinzips bei Entwurf und Herstellung konnte der Grundsatz des Prinzips *form follows force* umgesetzt werden (Bild 17, links).

An der Canopy-Faltschale wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die Schale war an den Seiten auf jeweils zwei Punkten gelagert und wurde wie auch die Tonnenschale im Bogenscheitel mit einer Einzellast belastet. Die Erstrisslast betrug 5 kN. Die im weiteren Belastungsverlauf entstehenden Risse fanden sich an der Plattenoberseite in den Viertelpunkten und an der Plattenunterseite im Scheitel. Dies steht im Einklang mit der Verteilung der Zugspannungen in einem Bogen unter einer Einzellast. Die maximale Traglast betrug 8 kN. Nach dem Erreichen dieser maximalen Last zeigte die Struktur ein sehr gutmütiges Verhalten. Die Verformung der Struktur schritt voran, ohne dass es zu einem schlagartigen Versagen kam. Die Risse fanden sich überwiegend in den Facetten und erst zu einem späteren Zeitpunkt entstanden auch Risse in den Faltkanten.

Für die Vermessung der Schale und die Verformungsmessung während des Versuches wurde



Bild 16: Bike shell-ter | Fig. 16: Bike shell-ter

3.3 Doubly-curved folded plate structure: canopy shell

Starting from an identical base plate as for the bike shell-ter, the design space was extended to doubly-curved structures with the canopy shell depicted in Fig. 17 (right) [24]. By including the hanging principle in the design and manufacturing process, it was possible to implement the principle *form follows force* (Fig. 17, left).

Experimental investigations were performed on the canopy shell. The shell was supported at two points on each side and, like the barrel vaults, loaded with a single load in the centre. First cracking occurred at a load level of 5 kN. The cracks that developed during the course of the load were found at the top side of the shell in the quarter points and at the bottom side of the shell in the middle. This was in accordance to the distribution of tensile stresses in a vault subjected to a single load. The maximum load was 8 kN. After reaching this maximum load, the structure showed a very good-natured be-



Bild 17: Canopy-Faltragwerk: Faltprozess durch Hängen (links); Ansicht fertige Schale (rechts) | Fig. 17: Canopy shell: folding process by hanging (left); view of finished structure (right)



Photogrammetrie eingesetzt, was sich sehr gut bewährt hat. Ausführliche Ergebnisse sind in [26] dargelegt.

3.4 Segmentierte Tonnenschale

Das Konzept der Segmentierung zur Erweiterung der Größe der herstellbaren Strukturen wurde beim Bau einer Tonnenschale erprobt [8]. Für die Herstellung der Einzelsegmente wurde erstmalig das Fold-in-fresh-Verfahren eingesetzt, wodurch das Verfugen entfiel. In Bild 18 sind die dazu verwendete faltbare Schalung sowie die Herstellung eines Elementes dargestellt. Mit der Schalung konnte pro Tag mit einem Zeitaufwand von einer Stunde ein Element hergestellt werden. Die Elemente ließen sich kompakt auf einer Palette stapeln (Bild 19, links).

Aus den Einzelementen wurde der Bogen schrittweise in einem Klappverfahren aufgebaut. An einer Seite war der Bogen gelenkig gelagert, an der anderen wurde er mit einem Kran angehoben, so dass manuell ein weiteres Element überlappend ergänzt werden konnte.

haviour. The structure continued to deform, but there was no sudden collapse. The cracks were mainly found in the facets and only at a later stage cracks appeared in the folding edges.

Photogrammetry was used for the measurement of the shell and the deformation measurement during the test, which has proved very successful. Detailed results are presented in [26].

3.4 Segmented barrel vault

The concept of segmentation to expand the size of the structures to be produced was tested during the construction of a barrel vault [8]. For the first time, the fold-in-fresh method was used to produce the single segments, eliminating the need for grouting the creases. Figure 18 shows the foldable formwork used for this as well as the production of a folded element. With the formwork, one element per day could be produced with a time requirement of one hour. As shown in Fig. 19 (left), the elements could be stacked compactly on a pallet.



Bild 18: Herstellung eines Elementes für die segmentierte Tonnenschale mit dem Fold-in-fresh-Verfahren; v. l. n. r.: Bestandteile der faltbaren Schalung, Schalung im gefalteten Zustand, Betonelement kurz nach dem Falten | **Fig. 18:** Production of a folded segment for the segmented barrel vault by fold-in-fresh; from left to right: components of foldable formwork, formwork in folded condition, folded element shortly after folding

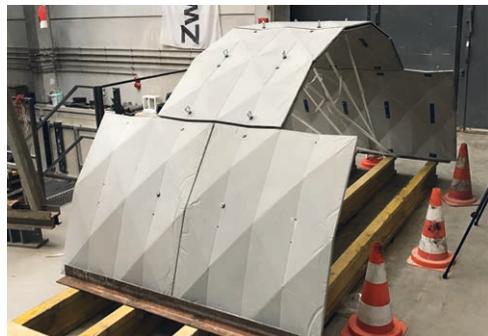
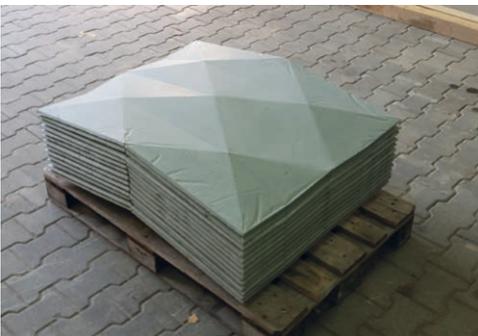


Bild 19: Vom Segment zum Bogen: gestapelte Elemente auf einer Palette (links), fertiger Bogen (rechts) | **Fig. 19:** From segments to a vault: stacked segments on a pallet (left) and finished vault (right)

Die Verbindung der Elemente untereinander erfolgte mit Schrauben, die auch einen Rückbau des Bogens ermöglichen. Die Schnüre an der Unterseite dienten zur Aufnahme der während des Anhebens entstehenden horizontalen Kräfte. Nach der Fertigstellung des Bogens wurden diese entfernt. Die Spannweite des aus elf einzelnen Segmenten realisierten Bogens betrug ca. 2,75 m, die Höhe 1,25 m.

3.5 Gefaltete Träger

Die zuletzt mit der Fold-in-fresh-Methode gebauten Prototypen waren gefaltete Träger. Das verwendete Faltmuster wurde aus dem Waterbomb-Faltmuster abgeleitet. Damit gelang im Gegensatz zum Yoshimura-Faltmuster eine unabhängige Gestaltung von Krümmung und Faltungshöhe. Für die Durchführung der Faltung wurde eine spezielle Faltschalung konstruiert. Das 2,2 m × 0,7 m große Faltmuster war aus einzelnen Facetten aus Holz, die mit Scharnierbändern verbunden wurden, aufgebaut. Es wurde anschließend in einem Holzkasten auf verschiedenen Punkten gelagert. In Studien mit der Oricreate-Plattform wurden der Falprozess simuliert und die Lage der Auflager ermittelt. Die Betonplatte wurde im Laminierverfahren erstellt, wodurch eine gezielte Verstärkung von hoch belasteten Stellen mit zusätzlicher Bewehrung möglich war.

Die Faltschalung wurde an drei Stellen gesteuert (Bild 20, links). In der Mitte wurde sie durch einen Stempel vertikal angehoben. Die Seiten wurden mit Schnüren kontrolliert abgelassen. Die gewünschte Zielform wurde sehr genau erreicht. Es wurden insgesamt fünf Falträger hergestellt. Einer der Träger ist in Bild 20 (rechts) dargestellt. Zur Vermeidung des Eindringens von Beton in die Scharniere wurden unterschiedliche Folien verwendet. Dabei zeigte sich, dass übliche Kunststofffolien vor allem in den Talfalten Wellen bildeten, die sich dann direkt im fertigen Betonelement wiederspiegeln und den Querschnitt schwächten. Eine deutliche Reduzierung der Wellenbildung und sehr schöne Oberflächen konnten hingegen durch den Einsatz einer Folie aus Latex erzielt werden.

With the help of a crane, the vault was assembled step by step with the finished elements in a clapping process. On one side, the arch was hinged. On the other side, the arch was lifted with the help of the crane, so that another element could be added manually. The elements were connected to each other with screws, which also made it possible to dismantle the arch. The strings on the underside were used to absorb the horizontal forces generated during lifting. These were removed after completion of the vault. The span of the vault, which consisted of eleven individual segments, was approximately 2.75 m, the height 1.25 m.

3.5 Folded girders

The last realized prototypes were folded girders made using the fold-in-fresh method. The pattern used for the design was derived from the waterbomb crease pattern. In contrast to the Yoshimura crease pattern, an independent design of the curvature and the folding height was achieved with it. A special foldable formwork was constructed for the folding process. The crease pattern was made up of individual facets of wood, which were connected with hinged bands and had dimensions of 2.2 m × 0.7 m. The crease pattern was then stored in a wooden box on various points. Studies with the oricreate platform simulated the folding process and determined the position of the supports. The concrete plate was constructed using a lamination process, which made it possible to selectively reinforce highly stressed areas with additional reinforcement.

The foldable formwork was controlled at three points (Fig. 20, left). The formwork was lifted vertically by a stamp situated in the middle. The sides were lowered with cords in a controlled manner. The desired target shape could be reached very exactly. A total of five folded girders were produced. One of the girders is shown right in Fig. 20. Different foils were used to prevent concrete from penetrating the hinges. It turned out that common plastic foils formed waves mainly in the valley folds, which were then reflected directly in the finished concrete



Bild 20: Gefalteter Träger mit Waterbomb-Faltpattern, links während der Faltung und rechts fertiger Träger | **Fig. 20:** Folded girder with waterbomb crease pattern: during folding (left) and finished girder (right)

Bei vier der Falträger wurde die Tragfähigkeit experimentell ermittelt. Dazu wurden sie mit einer Spannweite von 2 m an beiden Seiten unverschieblich gelagert und mittig mit einer Einzellast belastet. Es wurde eine maximale Tragfähigkeit von 13,5 kN erreicht. Das Tragverhalten der Träger war sehr robust und geprägt von vielfältigen Umlagerungsmöglichkeiten.

4 Methoden zur Steigerung der Tragfähigkeit

Bei den durchgeführten experimentellen Untersuchungen an den beiden Tonnenschalen sowie der Canopy-Faltschale trat das Versagen üblicherweise aufgrund der Überschreitung der Zug- oder Biegezugfestigkeit des Feinbetons ein. Die Querschnitte waren unterbewehrt; wodurch sie nach Erreichen der Erstrisslast direkt versagten. Die hohe Druckfestigkeit des Feinbetons wurde bei weitem nicht ausgenutzt, womit Potential zur Steigerung der Tragfähigkeit vorhanden ist. Es wurden hierzu zwei Ansätze untersucht [27]. Der erste Ansatz zur Verstärkung war die gezielte Aufbringung von zusätzlichen Textilbetonschichten. Einerseits wurde dadurch dem Querschnitt mehr statische Höhe gegeben und andererseits kann die Lage der Bewehrung aus der Querschnittsmitte an den Rand verschoben werden. Hierdurch kann die Bewehrung nach der Rissbildung effektiver Zugkräfte aufnehmen und es wird die Biegetragfähigkeit des Querschnittes erhöht. Der zweite Ansatz ist die Anwendung von Vorspannung, wodurch die hohe Druckfestigkeit des Betons besser ausge-

element und weakened the cross-section. A clear reduction of the wave formation and very beautiful surfaces, however, could be achieved by using a latex film.

The load-bearing capacity of four of the folded girders was investigated experimentally. For this purpose, they were rigidly supported on both sides and loaded with a single load in the middle. The girders had a span of 2 m. A maximum load capacity of 13.5 kN could be achieved. The load-bearing behaviour of the girders was very robust and characterised by a variety of relocation options.

4 Methods for increasing load-bearing capacity

In the experimental investigations carried out on the two barrel vaults and the canopy shell, failure usually occurred because the tensile or flexural strength of the fine concrete was exceeded. The cross-sections were underreinforced, so that they failed immediately after reaching the first crack load or large cracks were formed. The high compressive strength of the fine concrete has by far not been exploited. This offers the possibility for increasing the load-bearing capacity. Two approaches were examined [27]. The first approach to to strengthen the structure was the targeted application of additional textile concrete layers. On the one hand, this gave the cross-section more static height and on the other hand, the position of the reinforcement could be shifted from the centre

nutzt wird. Im Rahmen einer Studie wurde ein System zur Vorspannung ohne Verbund entwickelt (Bild 21) und an gefalteten Bögen mit einer Spannweite von 1,6 m und einen Stich von 0,46 m erprobt. In die Schalung für das Faltmusterhalbzeug wurden dazu zwei Schläuche mit je einem dünnen Stahlseil installiert (Bild 21, links). Nach der Betonage und dem Falten wurde in die mittlere Falte ein weiteres Spannglied eingelegt und alle Fugen vermörtelt. Mit einer Klemmkonstruktion konnte über ein Schraubgewinde je Spannglied eine Vorspannkraft von 3 kN erzeugt werden (Bild 21, Mitte).

Zur Bewertung der Wirksamkeit der Vorspannung wurden experimentelle Untersuchungen an zwei vorgespannten und zwei nicht vorgespannten Bögen durchgeführt (Bild 21, rechts). Die nicht vorgespannten Bögen versagten bei einer Last von 7,3 bzw. 7,8 kN und die vorgespannten bei 9,5 bzw. 9,9 kN. Die Erstrisslasten konnten im Mittel um 55 % gesteigert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Inspiziert von der japanischen Papierfaltkunst Origami wurde eine Methodik für den Entwurf und die Herstellung von Tragstrukturen durch Faltung entwickelt. In Kombination mit flächig bewehrten zementbasierten Verbundwerkstoffen wie Textilbeton ermöglicht das Faltkonzept die Realisierung von dünnwandigen, frei geformten Faltenwerken, die trotz komplexer Geometrie wirtschaftlich hergestellt werden können. Zur Unterstützung des Entwurfs und der

of the cross-section to one edge. This allows the reinforcement to absorb effective tensile forces after crack formation and increases the bending strength of the cross-section. The second approach is the application of prestressing, which makes better use of the high compressive strength of the concrete. As part of a study, a system for pre-stressing without bond was developed (Fig. 21) and tested on folded vaults with a span of 1.6 m and a height of 0.46 m. Two hoses, each with a thin steel cable inside, were installed in the formwork for the oricrete plate (Fig. 21, left). After concreting and folding, another tendon was inserted into the middle crease and subsequently the creases were grouted. With a screwing device the three tendons were pre-stressed with a force of 3 kN per tendon (Fig. 21, middle).

To evaluate the effectiveness of the prestressing, experimental investigations were carried out on two prestressed and two non prestressed vaults (Fig. 21, right). The non-prestressed vaults failed at a load of 7.3 and 7.8 kN each and the prestressed vaults at 9.5 and 9.9 kN, respectively. The first cracking load could be increased on average by 55%.

5 Summary and outlook

Inspired by the Japanese art of paper folding origami, a methodology was developed for the design and manufacture of load-bearing structures by folding. In combination with reinforced cement-based composite materials



Bild 21: Vorgespannter gefalteter Bogen; v. l. n. r.: Faltmuster mit eingebauten Spanngliedern, Aufbringung der Vorspannung und experimentelle Untersuchung | **Fig. 21:** Prestressed folded vault; from left to right: crease pattern with installed tendons, applying the pre-stressing, testing of a vault

Herstellung wurde die modulare Simulationsplattform Oricreate entwickelt, die den Faltprozess als mathematische Optimierungsaufgabe erfasst. Der Entwurfsraum zur Gestaltung der Form und der Tragfähigkeit wurde skizziert. Mit dem Fold-and-grout- und dem Fold-in-fresh-Verfahren wurden zwei Methoden vorgestellt, um aus bewehrtem Beton ein faltbares Medium zu machen. Mit der Herstellung von mehreren Prototypen wurden verschiedene Entwurfskonzepte und Herstellmethoden erprobt. Zur Untersuchung und Bewertung der Tragfähigkeit wurden experimentelle und numerische Methoden eingesetzt. Zur besseren Ausnutzung der Werkstoffe und zur Steigerung der Tragfähigkeit wurden das Ergänzen von zusätzlichen Schichten Textilbeton und der Einsatz von Vorspannung mit Erfolg angewendet.

Die entstehenden Strukturen können nicht nur als eigenständige Tragwerke, sondern auch als verlorene Schalung oder bei der Gestaltung von Fassaden- und Hüllsystemen eingesetzt werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198006311 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Turner, N.; Goddwine, B.; Mihir, S.: A review of origami applications in mechanical engineering. *Journal of Mechanical Engineering Science* 230 (2016) 14, S. 2345–2362 – DOI: 10.1177/0954406215597713
- [2] Sorguc, A.; Hagiwara, I.; Selcuk, S.: Origamics in architecture: a medium of inquiry for design in architecture. *METU Journal of the faculty of architecture* (2009) 2, S. 235–247 – DOI: 10.4305/METU.JFA.2009.2.12
- [3] Trautz, M.; Ayoubi, M.: Das Prinzip des Faltens in Architektur und Ingenieurbau. *Bautechnik* 88 (2011) 2, S. 76–79 – DOI: 10.1002/bate.201110006
- such as textile reinforced concrete, the folding concept enables the realization of thin-walled, freely formed folding structures that can be produced economically despite complex geometry. The modular simulation platform oricreate was developed to support the design and manufacture process. It captures the folding process as a mathematical optimization task. The design space for the design of the form and the load-bearing capacity was described. With the fold-and-grout and the fold-in-fresh method, two methods were presented to turn reinforced concrete into a foldable medium. Various design concepts and manufacturing methods were tested with the production of several prototypes. Experimental and numerical methods were used to investigate and evaluate the load bearing capacity. In order to make better use of the materials and to increase the load-bearing capacity, the addition of extra layers of textile reinforced concrete and the use of prestressing were successfully applied.
- The resulting structures can not only be used as independent supporting structures, but also, for example, as lost formwork or in the design of façade and cladding systems.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (no. 198006311) within the Priority Programme SPP 1542.

- [4] Herkrath, R.; Trautz, M.: Starre Faltungen als Leichtbauprinzip im Bauwesen. *Bautechnik* 88 (2011) 2, S. 80–85 – DOI: 10.1002/bate.201110007
- [5] Buri, H.: Origami aus Brettspertholz. *Detail* (2010) 10, S. 1066–1069
- [6] Scheerer, S.; Chudoba, R.; Garibaldi, M. P.; Curbach, M.: Shells made of Textile Reinforced Concrete – Applications in Germany. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures J.IASS* 58 (2017) 1 – special issue: new directions for shell structures, S. 79–93 – DOI: 10.20898/j.iass.2017.191.846

- [7] Rempel, S.; Will, N.; Hegger, J.; Beul, P.: Filigrane Bauwerke aus Textilbeton – Leistungsfähigkeit und Anwendungspotenzial des innovativen Verbundwerkstoffs. *Beton- und Stahlbetonbau* 110, Issue S1 – Supplement: Verstärkt mit Textilbeton (2015) Jan., S. 83–93 – DOI: 10.1002/best.201400111
- [8] van der Woerd, J. D.; Bonfig, C.; Hegger, J.; Chudoba, R.: Construction of a vault using folded segments made out of textile reinforced concrete by fold-in-fresh. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): *Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp.* 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9434, Book of Abstracts: S. 124, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.
- [9] Engelsmann, S.; Spalding, V.: Ein prototypisches Kunststoff-Faltwerk mit neuartiger Füge-technologie. *Stahlbau* 78 (2009) 4, S. 227–231 – DOI: 10.1002/stab.200910034
- [10] Marinitsch, S.; Schranz, C.; Kolbitsch, A.: Untersuchungen zur Tragfähigkeit eines Verbindungsdetails für Faltwerke aus Glas. *Bauingenieur* 90 (2015) 6, S. 265–271
- [11] Leitner, K.: Tragkonstruktionen aus plattenförmigen Holzwerkstoffen mit der textilen Fuge. Diss., RWTH Aachen University, 2004
- [12] Kind-Barkauskas, F.; Polonyi, S.; Kausen, B.; Brandt, J.: *Beton Atlas – Entwerfen mit Stahlbeton im Hochbau*. 2. Aufl., Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2001
- [13] van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Scholzen, A.; Hegger, J.: *Oricrete – Eine Entwurfs- und Herstellmethodik für dünnwandige Faltwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen*. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 11, S. 774–782 – DOI: 10.1002/best.201300057
- [14] Künstler, A.; Trautz, M.: Wandelbare Faltungen aus biegesteifen Faltelementen. *Bautechnik* 88 (2011) 2, S. 86–93 – DOI: 10.1002/bate.201110008
- [15] Evans, T. A.; Lang, R. J.; Magleby, S. P.; Howell, L. L.: Rigidly foldable origami gadgets and tessellations. *Royal Society Open Science* 2 (2015) 9, 150067, 18 S. – DOI: 10.1098/rsos.150067
- [16] Yoshimura, Y.: On the mechanism of buckling of a circular cylindrical shell under axial compression. Technical Memorandum 1390, National Advisory Committee for Aeronautics, 1955
- [17] Hanna, B.; Lund, J.; Lang, R.; Magleby, S.; Howell, L. L.: Waterbomb base: a symmetric single-vertex bistable mechanism. *Smart Materials and Structures* 23 (2014) 9, 094009, 11 S. – DOI: 10.1088/0964-1726/23/9/094009
- [18] Chudoba, R.; van der Woerd, J. D.; Hegger, J.: ORICREATE: Modeling framework for design and manufacturing of folded plate structures. In: Miura, K.; Kawasaki, T.; Tachi, T.; Uehara, R.; Lang, R.; Wang-Iverson, P. (Hrsg.): *Proc. of Origami6 – Part II: Technology, Art, Education*, 10.–13.08.2014 in Tokio (Japan), Providence: American Mathematical Society, 2015, S. 523–536
- [19] <https://github.com/simvisage/oricrete> (geprüft am | checked at 11.04.2018)
- [20] www.oricrete.com (geprüft am | checked at 11.04.2018)
- [21] van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Folded bike shell-ter: Application of oricrete design and manufacturing method. In: Kawaguchi, K.; Ohsaki, M.; Takeuchi, T. (Hrsg.): *Spatial Structures in the 21st Century – Proc. of the IASS Annual Symp.* 2016, 26.–30.09.2016 in Tokio (Japan), Madrid: IASS, 2016, publ. auf USB-Stick, 13 S.
- [22] Brockmann, T.: Mechanical and fracture mechanical properties of fine grained concrete for textile reinforced composites. Diss., RWTH Aachen University, 2006
- [23] van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Singly-curved shell structure made of textile-reinforced concrete plate using a folding technique. In: Obrebski, J. B.; Tarczewski, R. (Hrsg.): *BEYOND THE LIMITS OF MAN – Proc. of the IASS Symp.* 2013, 23.–27.09.2013 in Wroclaw (Polen), 2013, Book of Abstracts: S. 342, Langfassung auf CD, 6 S.
- [24] van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Canopy – Doubly Curved Folded Plate Structure. In: Hordijk, D. A.; Luković, M. (Hrsg.): *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering meet – Proc. of Int. fib Symp.*, 12.–14.06.2017 in Maastricht (Niederlande), Springer Int. Publ., 2018, S. 2512–2520 – DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2_286
- [25] van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.; Bongardt, C.: Oridome: Construction of a dome by folding. In: Reyolando, M.; Pauletti, R. (Hrsg.): *Shells, Membranes and Spatial Structures – Proc. of the IASS-SLTE 2014 Symp.* 2014, 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 2014, Beitrag Nr. 283, publ. auf USB-Stick, 8 S.
- [26] van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Design and construction of a thin barrel vault by folding. In: KIVI (Hrsg.): *Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp.* 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-527713, publ. auf USB-Stick, 13 S.
- [27] van der Woerd, J. D.; Geßner, S.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Design, construction and strengthening of shell structures made by folding. In: IABSE (Hrsg.): *Engineering the Future – Proc. of 39th IABSE Symp.*, 21.–23.9.2017 in Vancouver (Kanada), 2017, S. 2898–290

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1–10, 11 links | left, 12 rechts | right, 14–15, 17 rechts | right, 18, 21: Jan Dirk van der Woerd
- Bilder | Pictures 11 rechts | right, 12 links | left, 13, 16, 17 links | left, 20: Rostislav Chudoba

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Dünnwandige Falwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen | Folded plate structures made of cementitious composites

Antragsteller 1 Applicant 1:	Dr.-Ing. Rostislav Chudoba Oberingenieur Senior engineer
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	CH 276/3-1/2 (Projektnummer Project number: 198006311)
Kontakt Contact:	+49 241 80 28150 rostislav.chudoba@rwth-aachen.de www.imb.rwth-aachen.de
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger Professor und Institutsdirektor Professor and institute's director
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	HE 2637/24-1/2 (Projektnummer Project number: 198006311)
Kontakt Contact:	+49 241 80 25170 jhegger@imb.rwth-aachen.de www.imb.rwth-aachen.de
Adresse Address:	RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Förderphase I Period I: 01.07.2011–30.06.2014 Förderphase II Period II: 01.10.2014–30.09.2017 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 30.03.2018
Team Team:	Jan Dirk van der Woerd

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Finding new forms for bearing structures by use of origamics. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 263–268
- Chudoba, R.; van der Woerd, J. D.; Schmerl, M.; Hegger, J.: ORICRETE: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures. Advances in Engineering Software 72 (2013) 6, S. 119–127 – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.05.004>
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Computational model for simulation of rigid foldable origami structures. In: Zingoni, A. (Hrsg.): Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation – Proc. of 5th Int. Conf. on Structural Engineering, Mechanics & Computations, 02.–04.09.2013 in Kapstadt (Südafrika), 2013, Book of abstracts: S. 299–301, Langfassung auf CD-ROM, 6 S.
- Chudoba, R.; van der Woerd, J. D.; Hegger, J.: Modeling framework for design and manufacturing of folded shell structures. In: Obrebski, J. B.; Tarczewski, R. (Hrsg.): BEYOND THE LIMITS OF MAN – Proc. of the IASS Symp. 2013, 23.–27.09.2013 in Wrocław (Polen), 2013, Book of Abstracts: S.189, Langfassung auf CD, 5 S.
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Singly-curved shell structure made of textile-reinforced concrete plate using a folding technique. In: Obrebski, J. B.; Tarczewski, R. (Hrsg.): BEYOND THE LIMITS OF MAN – Proc. of the IASS Symp. 2013, 23.–27.09.2013 in Wrocław (Polen), 2013, Book of Abstracts: S. 342, Langfassung auf CD, 6 S.
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Gefaltete Strukturen – Origami für Textilbeton. TUDALIT-Magazin (2013) 9, S. 19 – Tagungsband zur 5. Anwendertagung Textilbeton am 24.–25.09.2013 in Friedrichshafen
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.: Gestaltung von dünnwandigen Falwerken aus zementbasierten Verbundwerkstoffen nach der Oricrete-Methodik. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskoll., 07.–08.11.2013 in Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. S. 77–82
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Scholzen, A.; Hegger, J.: Oricrete – Eine Entwurfs- und Herstellmethodik für dünnwandige Falwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 774–782 – DOI: 10.1002/best.201300057

- van der Woerd, J. D.; Bongardt, Ch.; Kolodzie, M.; Chudoba, R.; Hegger, Josef: Oridome – Das Prinzip der Vielfältigkeit: Konzept für eine gefaltete Kuppel aus Textilbeton. *BWI BetonWerk International* (2014) 1, S. 30–38
- van der Woerd, J. D.; Stark, A.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Concrete light – Origami-based folded structures and prestressed sandwich shell beams | Leicht Bauen mit Beton – Origami-basierte Falwerke und vorgespannte Sandwich-Schalenträger. *BFT international* 80 (2014) 2, S. 27–29 – Tagungsband der 58. Ulmer Betontage, 18.–20.02.2014 in Neu-Ulm
- Chudoba, R.; van der Woerd, J. D.; Hegger, J.: Numerical modeling support for form-finding and manufacturing of folded plate structures made of cementitious composites using origami principles. In: Bičanić, N.; Mang, H.; Meschke, G.; de Borst, R. (Hrsg.): *Proc. of Euro-C 2014 – Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures*, 24.–27.03.2014 in St. Anton am Arlberg (Österreich), 2014, S. 451–462
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.; Bongardt, C.: Oridome: Construction of a dome by folding. In: Reyolando, M.; Pauletti, R. (Hrsg.): *Shells, Membranes and Spatial Structures – Proc. of the IASS-SLTE 2014 Symp.* 2014, 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 2014, Beitrag Nr. 283, publ. auf USB-Stick, 8 S.
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Entwurf und Herstellung von Falwerken durch Faltung In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): *Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1*, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 60–69 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171612>
- Chudoba, R.; Hegger, J.; Scholzen, A.; Sharei, E.; Stark, A.; Will, N.; van der Woerd, J. D.: Die Leichtigkeit des Betons – Dünnwandige Schalenträgerwerke aus hochleistungsfähigen zementartigen Verbundwerkstoffen. *RWTH Themen – Bauingenieurwesen* (2015) 2, S. 42–45
- Chudoba, R.; van der Woerd, J. D.; Hegger, J.: ORICREATE: Modeling framework for design and manufacturing of folded plate structures. In: Miura, K.; Kawasaki, T.; Tachi, T.; Uehara, R.; Lang, R.; Wang-Iverson, P. (Hrsg.): *Proc. of Origami6 – Part II: Technology, Art, Education*, 10.–13.08.2014 in Tokio (Japan), Providence: American Mathematical Society, 2015, S. 523–536
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Design and construction of a thin barrel vault by folding. In: KIVI (Hrsg.): *Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp.* 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-527713, publ. auf USB-Stick, 13 S.
- Chudoba, R.; Claßen, M.; Hegger, J.; Rempel, S.; Stark, A.; Will, N.; van der Woerd, J. D.: Bauen mit Betonfertigteilen – Forschungsansätze für „das Bauen von morgen“. *RWTH Themen – Production Engineering* (2016) 1, S. 26–31
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Folded bike shell-ter: Application of oricrete design and manufacturing method. In: Kawaguchi, K.; Ohsaki, M.; Takeuchi, T. (Hrsg.): *Spatial Structures in the 21st Century – Proc. of the IASS Annual Symp.* 2016, 26.–30.09.2016 in Tokio (Japan), Madrid: IASS, 2016, publ. auf USB-Stick, 13 S.
- Scheerer, S.; Chudoba, R.; Garibaldi, M. P.; Curbach, M.: Shells made of Textile Reinforced Concrete – Applications in Germany. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures J.IASS* 58 (2017) 1 – special issue: new directions for shell structures, S. 79–93 – DOI: 10.20898/j.iass.2017.191.846
- van der Woerd, J. D.; Geßner, S.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Design, construction and strengthening of shell structures made by folding. In: IABSE (Hrsg.): *Engineering the Future – Proc. of 39th IABSE Symp.*, 21.–23.09.2017 in Vancouver (Kanada), 2017, S. 2898–2905
- van der Woerd, J. D.; Bonfig, C.; Hegger, J.; Chudoba, R.: Construction of a vault using folded segments made out of textile reinforced concrete by fold-in-fresh. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): *Interfaces: architecture, engineering, science – Proc. of the IASS Annual Symp.* 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9434, Book of Abstracts: S. 124, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.
- van der Woerd, J. D.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Canopy – Doubly Curved Folded Plate Structure. In: Hordijk, D. A.; Luković, M. (Hrsg.): *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering meet – Proc. of Int. fib Symp.*, 12.–14.06.2017 in Maastricht (Niederlande), Springer Int. Publ., 2018, S. 2512–2520 – DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2_286
- van der Woerd, J. D.; Hegger, J.; Chudoba, R.: Origami aus Beton. *DETAIL* (2018) 3, S. 16–18

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- van der Woerd, J. D.: Eine Methodik zur Realisierung dünnwandiger Falwerke aus zementbasierten Verbundwerkstoffen durch Faltung. 2018

Diplom- und Masterarbeiten | Diploma and Master's Theses

- Schmerl, M.: Entwicklung und Implementierung eines Simulationswerkzeugs zur Unterstützung der Herstellung von "Oricrete" Strukturen. Diplomarbeit, 2013
- Bonfig, C.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Verbindung von gefalteten Betonbauteilen. Masterarbeit, 2016
- Flunkert, L.: Numerische und experimentelle Untersuchung einer doppelt gekrümmten gefalteten Schale. Masterarbeit, 2016
- Weber, P.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Einbringung von Vorspannung in gefaltete Strukturen aus dünnen Textilbetonplatten. Masterarbeit, 2016

Bachelorarbeiten | Bachelor's Theses

- Felber, L.: Entwurf und Umsetzung von Falwerkprototypen aus zementartigen Verbundwerkstoffen. 2011
- Hiby, T.: Untersuchung von Fügemethoden für Falwerke aus Platten oder Segmenten. 2013
- Kolodzie, M.: Entwicklung und Erprobung eines Verfügunssystem für Oricrete-Platten. 2013
- Paul, S.: Überblick und Zusammenfassung von Verfahren und Konzepten zur Herstellung von Betonschalen ohne arbeitsintensive Schalung. 2013
- Schlichtholz, P.: Konstruktion einer Prüfvorrichtung für verfugte Falbkanten. 2013
- Taschenmacher, D.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten von Falbkanten in dünnwandigen Platten aus zementbasierten Verbundwerkstoffen. 2013
- de la Gala, T. R.: Entwurf und Untersuchung von Konzepten zur Faltung von Faltmustern aus Textilbeton. 2014
- Schwidder, S.: Untersuchung zum Zusammenhang von Form und Tragverhalten bei Falwerken. 2014
- Ringe, T.: Entwicklung und Implementierung eines Moduls zur Unterstützung der numerischen Analyse von „Oricrete“ Strukturen. 2015
- Boecker, S.: Experimentelle Untersuchungen zur Verstärkung von gefalteten Strukturen mit zusätzlichen Schichten Textilbeton. 2016
- Hartmann, F.: Experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von dünnen Textilbetonplatten. 2016
- Alsewailern, F.: Experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von verfugten Falbkanten. 2016
- Schneider, M.: Experimentelle Untersuchung von vorgespannten gefalteten Strukturen aus dünnen Textilbetonplatten. 2017
- Janiak, T.: Experimentelle Untersuchung zur Faltung von dünnwandigen Betonelementen aus Textilbeton im Grünzustand. 2017
- Borrmann, M.: Experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von gefalteten Kleinkörpern aus Textilbeton. 2017

Institutspraktika | Institute's internships

- Felber, L.: Ansätze zur Durchführung der Formgebung dünnwandiger textiltbewehrter Falwerke. 2011
- Löw, M.: Ansätze zur Befestigung von Hebevorrichtungen auf dünnwandige Platten aus zementbasierten Verbundwerkstoffen – Klebesysteme. 2012
- Paul, S.: Ansätze zur Befestigung von Hebevorrichtungen auf dünnwandige Platten aus zementbasierten Verbundwerkstoffen – Unterdrucksysteme. 2012
- Bongardt, C.; Kolodzie, M.: Entwicklung und Herstellung eines Kuppelbauwerks aus doppelt gekrümmten Falwerksegmenten aus Textilbeton. 2013
- Brasienne, F.: Herstellung eines Blumenkübels durch Falten von Beton. 2013
- de la Gala, T. R.: Falten von Strukturen aus Textilbeton. 2013

- Schliehe-Diecks, F.: Import und Untersuchung von Falwerkgeometrien in InfoCAD. 2013
- Jarmolkovicus, V.: Modeling of concrete folded plate structures based on origami crease patterns and export into ABAQUS using open source software – Pyformex. 2014
- Kersten, K.: Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Anordnung der Falten auf das Tragverhalten gefalteter Bögen. 2014
- Natta, C.: The collapsible dome. 2014
- Alsewailem, F.: Experimentelle Untersuchungen zum Zugtragverhalten von vier Textilien. Sommersemester 2016
- Boecker, S.: Experimentelle Untersuchung der Momententragfähigkeit von Falkanten. Sommersemester 2016
- Von Fournier, J.: Experimentelle Untersuchung der Tragfähigkeit von Textilbetonplatten unter Variation der Verankerung des Textils. Sommersemester 2016.
- Borrmann, C.: Ermittlung von Festigkeits- und Steifigkeitswerten von verfugten und unverfugten Textilbetonplatten. Sommersemester 2017
- Janiak, T.: Einfluss des Textils und des Betonalters auf im Grünzustand gefaltete Kleinkörper. Sommersemester 2017
- Seal, I.: Construction and analysis of a thin-walled folded plate structure made out of textile reinforced concrete. Sommersemester 2017
- Schneider, M.: Bau und Untersuchung eines gefalteten Bogens aus Textilbeton. Sommersemester 2017

Folgeprojekt | Follow-up project

- C04: Stabilität und Quasiduktilität von dünnwandigen Carbonbetonbauteilen | C04: Stability and quasi-ductility of carbon reinforced concrete structural members

Projektleiter Applicants:	Dr.-Ing. Rostislav Chudoba, Dr.-Ing. Frank Schladitz (TU Dresden)
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 280
Förderzeitraum Funding period:	01.07.2020–30.06.2024

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Teilnahme am SPP-internen Hornbach Baumarkt Wettbewerb beim Jahrestreffen 2012 in Braunschweig. Die Beiträge entstanden in Zusammenarbeit mit studentischen Hilfskräften Lina Werker und Demian Taschenmacher. | Participation in the SPP internal Hornbach competition at the 2012 annual meeting in Braunschweig. The contributions were made in cooperation with student assistants Lina Werker and Demian Taschenmacher.
- Betreuung einer Studentengruppe für die Teilnahme bei der Betonkanuregatta 2013 mit dem Team The fast-and-the-foldious. Mit dem Kanu The Foldious wurde der dritte Platz in der Konstruktionswertung und der sechste Platz in der Gestaltungswertung erzielt. | Supervision of a group of students for the participation at the concrete canoe regatta 2013, team 'The fast-and-the-foldious'. With the canoe 'The Foldious' the third place in the construction category and the sixth place in the design competition was achieved.
- 1. Preis von einem Studierendenteam der RWTH Aachen beim Tudalit-Wettbewerb 2013 mit dem Beitrag Oridome. Die Mitglieder des Teams waren Christian Bonfig und Michael Kolodzie. Der Beitrag entstand im Rahmen eines Institutspraktikums. | 1st prize from a team of students of RWTH Aachen University at the Tudalit competition 2013 with 'Oridome'. The members of the team were Christian Bonfig and Michael Kolodzie. The contribution was made as part of an internship at the Institute of Concrete Structures, RWTH Aachen University.
- Organisation und Ausrichtung des Treffens der Arbeitsgruppe Modellierung in Aachen am 22.4.2015 | Organisation and execution of the meeting of the working group 'Modelling' in Aachen on 22.4.2015
- Organisation und Ausrichtung des 6. Jahrestreffens des SPP 1542 in Aachen, 4.–6.10.2016 | Organisation and execution of the 6th annual meeting of the SPP 1542 in Aachen, 4.–6.10.2016
- 3. Platz bei der fib Student Competition in Maastricht 13.6.2017 (S-C02DE) im Rahmen des fib-Symposiums 2017 mit dem Beitrag fold it green. Team: Christian Bonfig, Tamara Mansaray, Jan Dirk van der Woerd | 3rd place at the fib Student's Competition in Maastricht 13.6.2017 (S-C02DE) at fib Symposium 2017 with the contribution 'fold it green'. Team: Christian Bonfig, Tamara Mansaray, Jan Dirk van der Woerd

Querschnittsadaption für stabförmige Druckbauteile | Cross sectional adaption for rod-shaped elements in compression

- ▶ Angela Schmidt, Manfred Curbach
- ▶ Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden

Auszüge dieses Berichts wurden bereits in ähnlicher Form zum Abschluss der ersten Förderphase des SPP 1542 veröffentlicht [1]. | Excerpts of this report were already published in a similar form at the end of the first funding period of SPP 1542 [1].

1 Einleitung

Druckbauteile sind essentielle Elemente eines jeden Bauwerks, denn in Form von Stützen oder Wänden tragen sie die Lasten in den Baugrund ab. Heutzutage werden sie zumeist mit einem rechteckigen Querschnitt und konstanten Abmaßen über die Höhe ausgeführt. Bereits runde Stützen stellen eine Ausnahme dar und werden vor allem aus architektonischen Gründen angeordnet. Aber wie würde die möglichst optimale Geometrie eines Druckbauteils aussehen? Im Rahmen des Projekts wurde dieser zentralen Fragestellung nach einer günstigen Adaption der Querschnittsgeometrie von Stützen in Quer- und in Längsrichtung nachgegangen. Wesentliche Zielsetzung war dabei, Stützen so entwerfen und berechnen zu können, dass sie in allen Querschnittsbereichen gleichmäßig ausgelastet sind. Dadurch werden schlankere Bauteile möglich, die aufgrund der Materialersparnis nicht nur zur Schonung unserer natürlichen Ressourcen beitragen, sondern auch wirtschaftlich von Vorteil sind und zu einem ästhetischeren Erscheinungsbild führen.

Grundsätzlich unterscheidet man bei Stützen zwischen den planmäßig zentrisch gedrückten und denen, die exzentrisch gedrückt bzw. mit einem Moment belastet werden. In der ersten Förderperiode wurden zentrisch gedrückte Stützen untersucht, während in der zweiten die kombinierte Beanspruchung aus Längsdruck und Biegung betrachtet wurde. In typischen Stahlbetonskelettbauten finden sich beide Fälle

1 Introduction

Pressure components are essential elements for any structure, because in the form of columns or walls they transfer the loads into the subsoil. Nowadays, they are usually designed with a constant rectangular cross-section over the full height. Already round columns are an exception and are arranged mainly for architectural reasons. But what would the optimum geometry of a pressure component look like? Within the framework of the project, this central question of a favourable adaptation of the cross-section geometry of columns in transverse and longitudinal direction was investigated. The main objective was to be able to design and calculate columns in such a way that they are equally loaded in all cross-section areas. This enables slimmer components which, due to the material savings, not only contribute to the conservation of our natural resources, but are also economically advantageous and lead to a more aesthetic appearance.

Basically, a distinction is made between columns that are pressed centrically as planned and those that are pressed eccentrically or loaded with a bending moment. In the first funding period, centrically pressed columns were examined, while in the second the combined load of longitudinal pressure and bending was analysed. Both cases can be found in typical reinforced concrete skeleton structures. Normally, no scheduled moments are entered for internal columns, whereas frame moments and -

wieder. Bei Innenstützen werden i. d. R. keine planmäßigen Momente eingetragen, wohingegen bei Randstützen Rahmenmomente und – in Abhängigkeit des gewählten Fassaden- und Aussteifungssystems – ggf. Windbeanspruchungen zu berücksichtigen sind.

Eine zentrische Druckbelastung von stabförmigen Bauteilen schließt Fragestellungen hinsichtlich des Stabilitätsverhaltens mit ein. Diese sind sogar insbesondere für eine Optimierung bedeutsam, da die optimale Form zentrisch gedrückter, gedrungener Stützen, die also keinen nennenswerten Schnittgrößenzuwachs nach Theorie II. Ordnung erhalten, trivial ist. Unter Voraussetzung der Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes ergibt sich in diesem Fall die Spannung als Quotient der einwirkenden Normalkraft und der Querschnittsfläche. Folglich würde sich bereits bei einem konstanten Querschnitt sowohl über die Stützenlänge als auch über den Stützenquerschnitt eine konstante Spannungsverteilung ergeben. Jeder Punkt in der Stütze würde somit die gleiche Beanspruchung erfahren, sodass bereits ein Optimum erreicht ist.

In der ersten Projektphase wurde sich deshalb auf die Untersuchung des Stabilitätsverhaltens konzentriert, wofür bestehende Berechnungsmethoden zur Form- und Querschnittsoptimierung aufbereitet, überprüft und weiterentwickelt wurden, während in der zweiten Phase ein Berechnungs- und Formfindungsmodell für Stützen mit einer kombinierten Beanspruchung aus Biegung und Längsdruck bei einem Querschnittsversagen aufgestellt wurde.

2 Zentrisch gedrückte Stützen

2.1 Theoretische Betrachtungen zur Optimierung stabilitätsgefährdeter Stützen

Die Berechnung des Stabilitätsversagens hat ihren Ursprung in der Elastizitätstheorie und beruht auf der Differentialgleichung der Biegelinie. Schließt man zunächst das Auftreten einer Exzentrizität aus, dann bleibt in der Gleichung zur Berechnung der Biegelinie nur das Flächen-

depending on the facade and bracing system selected – wind loads may have to be taken into account for edge columns.

A centric pressure loading of rod-shaped slender elements includes questions regarding the stability behaviour. These are even particularly important for optimisation, since the optimum shape of centrally pressed compact columns, i.e. no appreciable increase in internal forces according to second-order effects caused by deflection, is trivial. Assuming that Hooke's law is valid, in this case the stress results as a quotient of the acting normal force and the cross-sectional area. Consequently, even with a constant cross-section, a constant stress distribution would result over both the column length and the column cross-section. Each point in the column would thus be subjected to the same stress, so that an optimum has already been reached.

In the first period of the project the focus was therefore on the investigation of the stability behaviour, for which existing calculation methods for shape and cross-section optimisation were adapted, checked and further developed, while in the second period a calculation and shape-finding model for columns with a combined load of bending and longitudinal pressure in the case of cross-section failure was established.

2 Centrally pressed columns

2.1 Theoretical considerations for the optimisation of columns with buckling risk

The calculation of the stability failure has its origin in the theory of elasticity and is based on the differential equation of the bending line. If first the occurrence of an eccentricity is excluded, then in the equation for the calculation of the bending line only the area moment of inertia remains as a quantity dependent on the column shape. The buckling resistance is therefore directly influenced by this moment of inertia and its course in the longitudinal direction of the rod.

trägheitsmoment als eine von der Stützenform abhängige Größe übrig. Die Höhe des Knickwiderstandes wird folglich direkt von diesem Trägheitsmoment und dessen Verlauf in Stab-längsrichtung beeinflusst.

Stabquerschnitt

Das Flächenträgheitsmoment eines Querschnitts wird umso größer, je größer der Abstand einzelner Teilflächen zum Schwerpunkt ist. Dies erklärt den bekannten Zusammenhang, dass ein Rohr knickstabiler als ein massegleicher Vollzylinder ist. Bei Hohlprofilen muss jedoch zusätzlich darauf geachtet werden, dass die Wandstärke so groß gewählt wird, dass ein lokales Beulen ausgeschlossen wird.

Werden die Untersuchungen auf Vollprofile mit gleichen axialen Flächenträgheitsmomenten beschränkt, dann lässt sich das gleichseitige Dreieck als optimaler Querschnitt finden und würde in Form einer Stütze eine um 21 % größere Tragfähigkeit erzielen als eine volumengleiche Zylinderstütze (Bild 1, u. a. [1]-[3]). Dieses Potential des dreieckigen Querschnitts gegenüber dem kreisförmigen wurde bereits von Keller [4] analysiert und kann über die Gleichsetzung der Flächeninhalte und der anschließenden Verhältnisbildung der Trägheitsmomente einfach nachgewiesen werden. Um das große Potential von konvexen Hohl- bzw. konkaven Querschnitten herauszustellen, wurde beispielhaft eine Querschnittsfläche von 1600 cm² und eine einheitliche Wandstärke von 10 cm für den Vergleich in Bild 1 gewählt. Mit der rechts dargestellten aufgelösten Variante kann die Knicklast um ca. 300 % gesteigert werden.

Längsrichtung

Erste Versuche, die optimale Formgebung für eine Stütze in Längsrichtung zu beschreiben, wurden bereits 1770 von Lagrange unternommen (s. z. B. Frauenthal [5]). Jedoch erst im Jahre 1851 gelang es Clausen [6], das Variationsproblem vollständig zu lösen. Seitdem wurde diese Problematik von verschiedenen Forschern immer wieder aufgegriffen und die theoretischen

Cross-section

The moment of inertia of a cross-section increases the higher the distance between the individual partial surfaces and the centre of gravity. This explains the well-known connection that a tube is more resistant to buckling than a full cylinder of the same height and mass. In the case of hollow sections, however, additional care must be taken to ensure that the wall thickness is chosen to be large enough to prevent local buckling.

If the investigations are limited to solid profiles with the same axial moments of inertia, then the equilateral triangle can be found as the optimum cross-section and, in the configuration of a column, would achieve a load carrying capacity 21% higher than that of a cylinder column of the same volume (Fig. 1, e.g. [1]-[3]). This potential of the triangular cross-section compared to the circular cross-section was already analysed by Keller [4] and can easily be verified. For this, only the area contents have to be equated and then the ratios of the moments of inertia have to be calculated. In order to highlight the great potential of convex hollow and concave cross-sections, a cross-sectional area of 1600 cm² and a uniform wall thickness of 10 cm

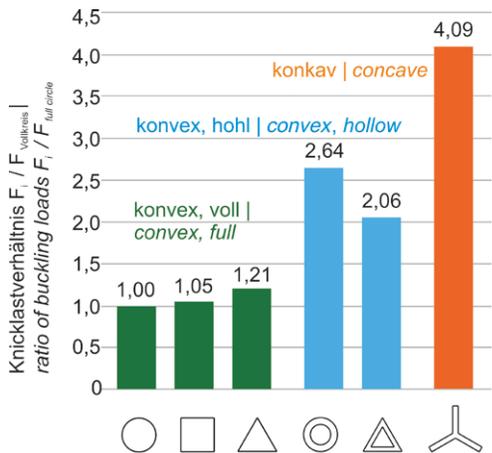


Bild 1: Relative Knicklaststeigerungen verschiedener Querschnittsformen im Vergleich zu einem Vollkreisquerschnitt bei Flächengleichheit | **Fig. 1:** Relative increase of buckling load for different cross-section designs in comparison to a coextensive full circle

Lösungen erweitert (z. B. Frauenthal [5], Olhoff/Rasmussen [7], Kirmser/Hu [8]). Eine Zusammenstellung der historischen Entwicklung enthält u. a. [9].

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass für konvexe Vollprofile mit gleich großen Flächenträgheitsmomenten in beiden Querschnittsachsen eine analytische Lösung zur Beschreibung der optimalen Stützenform hinsichtlich des Stabilitätsversagens existiert. Gegenüber einem unveränderlichen Stützenquerschnitt in Längsrichtung ist hierbei eine Erhöhung der Knicklast um maximal 33 % für eine optimierte volumengleiche Stütze möglich. Der optimale Verlauf hängt von der Knickfigur und somit von der Lagerung der Stützenenden ab, wobei die einzelnen Knickfiguren entsprechend des Ersatzstabsystems ineinander überführbar sind (Bild 2). Eine Überprüfung der optimierten Form erfolgte u. a. mithilfe des Näherungsverfahrens von Ritz-Timoshenko [2], [3].

Für die hinsichtlich eines Stabilitätsversagens optimierten Stützenformen wird eine Mindestquerschnittsabmessung erforderlich, um die Übertragung der Normalspannungen gewährleisten zu können. Je größer der Mindestquerschnitt im Verhältnis zur durchschnittlichen Querschnittsfläche ist, desto mehr nähert sich

were chosen as examples for the comparison in Figure 1. With the resolved variant shown on the right, the buckling load can be increased by approx. 300%.

Longitudinal direction

First attempts to describe the optimal shape for a column in longitudinal direction were undertaken by Lagrange as early as 1770 (see e.g. Frauenthal [5]). However, it was not until 1851 that Clausen [6] succeeded in solving the variation problem completely. Since then, this problem has been taken up repeatedly by various researchers and the theoretical solutions have been extended (e.g. Frauenthal [5], Olhoff/Rasmussen [7], Kirmser/Hu [8]). A compilation of the historical development contains, among others, [9].

The investigations have shown that for convex full profiles with equally large moments of inertia in both cross-section axes, an analytical solution exists to describe the optimum column shape with regard to stability failure. Compared to a constant column cross-section in the longitudinal direction, an increase of the buckling load by a maximum of 33% is possible for an optimised column of the same volume. The optimum shape depends on the buckling figure and thus on the support of the column ends, where-

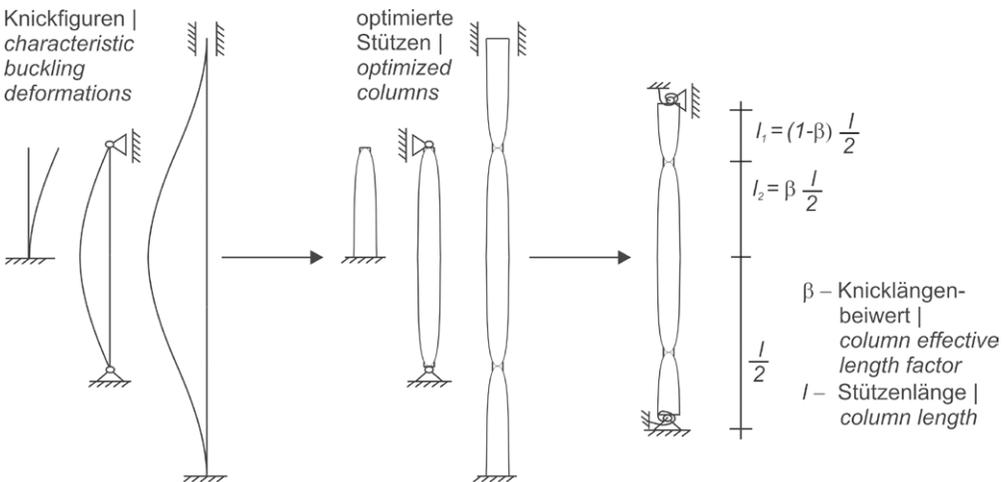


Bild 2: Herleitung der optimierten Geometrien für verschiedene Lagerungen | Fig. 2: Derivation of optimized geometries for different conditions of end support

die optimierte Geometrie einem konstanten Querschnittsverlauf über die Stützhöhe an und desto kleiner fällt folglich die Tragfähigkeitssteigerung aus. Diese kombinierte Problemstellung kann numerisch gelöst werden und wurde für den gelenkig gelagerten Stab von Frauenthal [5] und für den beidseitig eingespannten Stab von Olhoff und Rasmussen [7] veranschaulicht. Mit den von ihnen entwickelten Diagrammen kann die erzielbare Tragfähigkeitssteigerung leicht ermittelt werden.

Zur Erzielung höherer Tragfähigkeiten können die Ergebnisse der Querschnitts- und Formoptimierung miteinander kombiniert werden. Für Stützen mit konvexen Vollquerschnitten ergibt sich der Gesamtsteigerungsgrad der Knicklast aus der Multiplikation der einzelnen Steigerungsgrade beider Einflussgrößen (s. Keller [4], max. 61 %). Ergänzend konnte durch eigene Untersuchungen gezeigt werden, dass sich auch das große Potenzial gegliederter Querschnitte durch eine Kombination mit der optimierten Form in Stabrichtung noch weiter erhöhen lässt, [3]. Um die optimierte Stützengeometrie in Längsrichtung für die im Massivbau am häufigsten vorkommende Lagerung einer beidseitig elastischen Einspannung angeben zu können, wurden weiterführende Untersuchungen vorgenommen [11], da die bekannten Ergebnisse (z. B. [7]) nur für die idealen Lagerungsbedingungen gelten.

2.2 Experimentelle Untersuchungen zum Stabilitätsversagen

2.2.1 Zielstellung und Versuchsplan

Die vorgestellten theoretischen Ergebnisse zur Optimierung stabilitätsgefährdeter zentrisch gedrückter Stützen wurden unter der Annahme idealisierter Beziehungen gewonnen, die im Wesentlichen den Gültigkeitsgrenzen der Euler'schen Knickgleichungen entsprechen. Diese idealisierten Beziehungen gelten bekannterweise jedoch nur für das „*Knicken eines geraden zentrisch gedrückten Stabes aus homogenem Material, welches unbeschränkt elastisch und bruch-sicher ist*“ (Kollbrunner/Meister [12]). Mit (Stahl-)

by the individual buckling figures can be transferred into each other (Fig. 2). An examination of the optimised shape was carried out, among other things, with the aid of the Ritz-Timoshenko approximation method [2], [3].

A minimum cross-section dimension is required for the columns shape optimised for stability failure in order to ensure the transmission of normal stresses. The larger the minimum cross-section in relation to the average cross-sectional area, the closer the optimised geometry approaches a constant cross-sectional profile over the column height and the smaller the increase in load capacity. This combined problem can be solved numerically and was illustrated for a column with hinged ends by Frauenthal [5] and for a column clamped on both sides by Olhoff and Rasmussen [7]. With the diagrams developed by them, the achievable load capacity increase can be easily determined.

The results of cross-section and shape optimisation can be combined to achieve higher load-bearing capacities. For columns with convex full cross-sections, the total degree of increase of the buckling load results from the multiplication of the individual degrees of increase of both influencing variables (see Keller [4], maximum 61%). In addition, our own investigations have shown that the great potential of structured cross-sections can be further increased by combining them with the optimised shape in the direction of the rod, [3]. In order to be able to give the optimised column geometry in the longitudinal direction for the most frequently occurring support of an elastic clamping on both sides in solid construction, further investigations were carried out [11], since the known results (e.g. [7]) only apply to the ideal support conditions.

2.2 Experimental investigations of stability failure

2.2.1 Objectives and test program

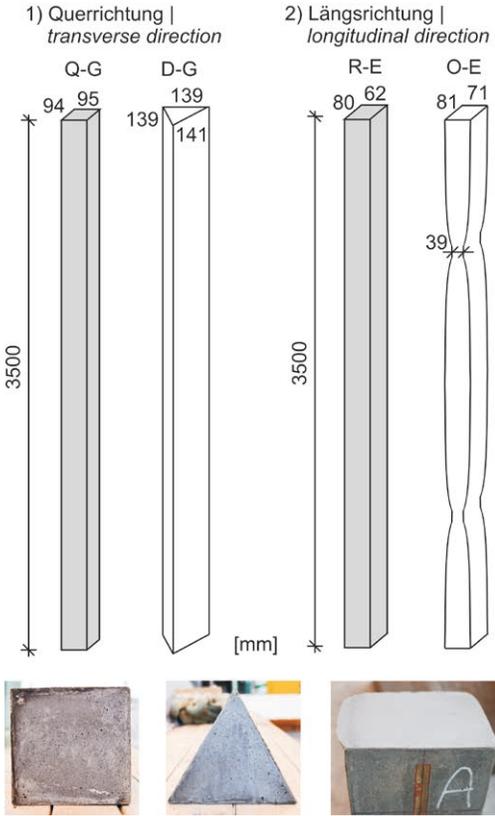
The presented theoretical results for the optimisation of stability of centrally pressed columns

Beton wird es jedoch nie möglich sein, diese Bedingungen gänzlich einzuhalten, da Imperfektionen nicht zu vermeiden sind und (Stahl-)Beton ein inhomogenes Material ist, welches bei hoher Ausnutzung plastische Eigenschaften aufweist. Infolge einer noch so kleinen vorherrschenden Exzentrizität (in der Baupraxis also immer) wachsen mit steigender Last vorzeitig die Ausbiegung der Stütze und somit die resultierenden Schnittgrößen und die wirkende Materialbeanspruchung an (Spannungszuwachs nach Theorie II. Ordnung). Je kleiner die Exzentrizität und umso größer die Schlankheit der Stütze sind, desto mehr wird sich allerdings die Versagenslast der theoretischen Knicklast annähern.

Ziel der experimentellen Arbeiten war es daher zu ermitteln, inwiefern ein Knickversagen nach Elastizitätstheorie überhaupt auftreten kann und ob sich mit den optimierten Geometrien tatsächlich die berechneten Laststeigerungen erreichen lassen. Für die Analyse der Übergänge zwischen idealem Materialversagen, Versagen nach Theorie II. Ordnung und Stabilitätsversagen wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, die auch zur Parameterfestlegung für die experimentelle Überprüfung der Form- und Querschnittsoptimierung diente. Die Versuchsreihe umfasste insgesamt 22 Tests mit Probekörpern von acht verschiedenen Schlankheitsgraden (3 bis 95). Für die ausführliche Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse wird auf [11] verwiesen. Wichtigste Ergebnisse waren, dass das Versagen sehr schlanker, zentrisch gedrückter Betonstützen gut mit der Elastizitätstheorie beschrieben werden kann und dass diese Versagensart deutlich geringere Streuungen aufweist als bei einem Materialversagen. Die Optimierungsergebnisse der Formen in Quer- und Längsrichtung wurden unabhängig voneinander in zwei separaten Teilschritten untersucht, um feststellen zu können, ob jede Variation den für sich gewünschten Effekt bringt bzw. wo und warum es ggf. zu Abweichungen kommt. Wenn beide Einflüsse einzeln ausreichend erforscht bzw. bestätigt werden können, dann sollte die Übertragbarkeit auf andere Formen bzw. ihre Kombination ebenfalls gegeben sein. Eine Übersicht des Versuchsprogramms zeigt Bild 3, vgl. [10].

were obtained under the assumption of idealized relations, which essentially correspond to the validity limits of the Euler formula. However, these idealized relations are only valid for the *"buckling of a straight centrally pressed rod of homogeneous material, which is unrestrictedly elastic and unbreakable"* (Kollbrunner/Meister [12]). With (reinforced) concrete, however, it will never be possible to fully comply with these conditions, since imperfections cannot be avoided and (reinforced) concrete is an inhomogeneous material which exhibits plastic properties at high utilization. As a result of an eccentricity, however small it may be (i.e. always in construction practice), the deflection of the column and thus the resulting internal forces and the effective material stresses increase prematurely with increasing load (stress increase according to second-order effects). However, the smaller the eccentricity and the greater the slenderness ratio of the column, the more the failure load will approach the theoretical buckling load.

The aim of the experimental work was therefore to determine the extent to which buckling failure according to elasticity theory can occur at all and whether the calculated load increases can actually be achieved with the optimised geometries. For the analysis of the transitions between ideal material failure, failure according to second-order effects and stability failure, a series of tests was carried out, which also served to determine the parameters for the experimental verification of shape and cross-section optimisation. The test series included a total of 22 tests with specimens of eight different slenderness ratios from 3 to 95. For a detailed description of the results, please refer to [11]. The most important results were that the failure of very slender, centrally pressed concrete columns can be well described with the elasticity theory and that this type of failure has significantly lower scatter than with material failure. The optimisation results of the forms in transverse and longitudinal direction were examined independently of each other in two separate steps in order to determine whether each variation produces the desired effect or where and why deviations may occur. If both influences can be



Übersicht Versuchsprogramm zentrischer Druck
overview test program axial compression

Bezeichnung name:			
Q-G	D-G	R-E	O-E
Querschnittsform cross-section type:			
Quadrat square	Dreieck triangle	Rechteck rectangle	Optimiert optimized
Lagerung support conditions:			
G-Gelenkig hinged support		E-Einspannung clamped support	
mittlere Querschnittsfläche average of cross-sectional area; A [cm ²]:			
89	84	49	49
Schlankheitsgrad slenderness ratio; λ [-]:			
135	130	99	100
Versuchszahl number of tests [-]:			
4	4	3	3

Bild 3: Versuchsprogramm zu zentrisch gedrückten Stützen zur Überprüfung der Formeinflüsse; Stützegeometrien mit mittleren Abmessungen | Fig. 3: Test program of axial loaded columns for verification of both form influences; geometries of columns with average dimensions

2.2.2 Gewählte Randbedingungen

Um die Voraussetzungen des elastischen Knickens möglichst gut erfüllen zu können, wurden die experimentellen Untersuchungen im Projekt an sehr schlanken Stützen durchgeführt. Um die Inhomogenität des Materials zu verringern, wurde auf den Einbau einer Bewehrung verzichtet und ein ultrahochfester Beton (UHPC) mit einem sehr geringen Größtkorn von 0,5 mm gewählt (M2Q-Rezeptur ohne Fasern [13]).

Die Betonage aller Stützen erfolgte in offenen liegenden Schalungen (Bild 4 und Bild 6, Mitte). So wird Entmischungs- und Entlüftungsproblemen vorgebeugt, außerdem ist die Schalungsherstellung preiswerter und einfacher.

sufficiently researched or confirmed individually, then transferability to other forms or their combination should also be given. An overview of the experimental program is shown in Figure 3, cf. [10].

2.2.2 Chosen boundary conditions

In order to meet the requirements of elastic buckling as far as possible, the experimental investigations in the project were carried out on very slender columns. In order to reduce the inhomogeneity of the material, no reinforcement was used and an ultra-high strength concrete (UHPC) with a very low maximum grain size of 0.5 mm was chosen (M2Q mixture without fibres acc. to [13]).

Aufgrund der recht hohen Herstellungs- und Verarbeitungsanforderungen des UHPC konnte pro Betoncharge immer nur eine Stütze hergestellt werden. Diese lagerten bis zum Versuchstag bei Raumtemperatur und wurden anschließend in einer Säulenprüfmaschine mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,01 mm/s bis zum Bruch gefahren. Unter Beachtung der Kapazität der Prüfmaschine und der üblichen Länge von Hochbaustützen wurde die Absolutlänge der Stützen zu 3,50 m gewählt. Die Wahl der übrigen Abmessungen resultierte aus der Lagerung und der Knickgefahr. Als Schutzmaßnahme vor dem kraftvollen plötzlichen Versagen der unbewehrten Probekörper wurden diese von einem Plexiglasrohr ummantelt getestet. Für eine möglichst ebene Aufstandsfläche erfolgte ein Abgleich der Stützenenden mit einem hochfesten Ausgleichsmörtel. Am Tag des jeweiligen Stützenversuchs wurde der E-Modul an drei Prismen mit den Abmessungen 160/40/40 mm und die Druckfestigkeit an drei 10er Würfeln ermittelt. Zu Vergleichszwecken ist in den folgenden Tabellen nur der E-Modul als Betonkennwert aufgeführt, da dieser das Stabilitätsversagen wesentlich beeinflusst.



Bild 4: Betonage einer dreieckigen Stütze | **Fig. 4:** Concreting of a triangular column

All columns were concreted in open horizontal formwork (Fig. 4 and Fig. 6, centre). This prevents segregation or honeycombs in the concrete and makes formwork production cheaper and simpler.

Due to the rather high manufacturing and processing requirements of the UHPC, only one column could be produced in each casting process. The samples were stored at room temperature until the day of the test and were then tested in a testing machine with a loading rate of 0.01 mm/s until failure. Considering the capacity of the testing machine, and the typical size of columns used in structural engineering, the column length was set to 3.50 m. The choice of the other dimensions resulted from the bearing arrangement and the risk of buckling. As a safety measure against the powerful sudden failure of the unreinforced test specimens, they were tested encased in a plexiglass tube. The bottom and the top of the columns were flattened with a high-performance mortar to ensure that the contact surface was as flat as possible. On the day of the respective column test, the modulus of elasticity was determined on three prisms with the dimensions 160/40/40 mm and the compressive strength on three cubes with 10 cm edge length, all manufactured from the same batch. For comparison purposes, only the modulus of elasticity is listed in the following tables as a concrete parameter, as this has a significant influence on the stability failure.

2.2.3 Verification of the cross-section geometry

The investigation of the cross-sectional influence was carried out on the theoretically „best“ solid profile, the equilateral triangle. The greatest increase in load-bearing capacity of a triangular column shape should be achieved in comparison to a cylinder, however, a square column was chosen as a reference due to simpler manufacturing, on which the influence should also be visible. Four columns were tested for each cross-section type. Since the formwork was produced manually, there were minor geometric deviations in the constancy of the side lengths of a cross-section and in the area constancy be-

2.2.3 Überprüfung der Querschnittsgeometrie

Die Untersuchung des Querschnittseinflusses erfolgte an dem theoretisch „besten“ Vollprofil, dem gleichseitigen Dreieck. Die größte Tragfähigkeitssteigerung einer dreieckigen Stützenform sollte sich im Vergleich zu einem Zylinder erzielen lassen, allerdings wurde herstellungsbedingt eine quadratische Stütze als Referenz gewählt, an welcher der Einfluss ebenfalls sichtbar sein sollte. Pro Querschnittsart wurden vier Stützen geprüft. Da eine manuelle Schalungsherstellung erfolgte, gab es geringe geometrische Abweichungen in der Konstanz bei den Seitenlängen eines Querschnitts und hinsichtlich der Flächenkonstanz zwischen den beiden Querschnittstypen. Der Flächeninhalt des dreieckigen Profils fiel etwas geringer aus als der des quadratischen Querschnitts (vgl. Bild 3). Diese Unterschiede wurden in der weiteren Auswertung berücksichtigt.

Aufgrund der geringeren Stabilität gelenkig gelagerter Stützen gegenüber eingespannten wurde für die Stützenversuche zum Querschnittseinfluss eine gelenkige Linienlagerung realisiert. Die Bauhöhe des Gelenks erhöht die tatsächliche Knicklänge der Stützen um die Dicken der angeschlossenen Lastverteilungsplatten an Stützenkopf und -fuß. Entsprechend der Gelenkauführung nach Bild 5 ergab sich somit eine Knicklänge von 362 cm. Allerdings wurde der Gelenkaufbau nach den ersten Versuchen Q-G-1/2 und D-G-1 modifiziert, da die Lastverteilungsplatte am Stützenkopf für den dreieckigen Grundriss etwas zu klein war. Aus diesem Grund wurde eine größere Stahlplatte unter dem Ausgangsgelenk angebracht. Die Knicklänge wurde damit für die übrigen Versuche auf 365 cm erhöht.

In Tabelle 1 sind die Versuchsergebnisse zur Überprüfung des Querschnittseinflusses zusammengestellt. Aufgrund des bereits beschriebenen herstellungsbedingten Flächenunterschieds der beiden Querschnittstypen wurde die Bruchlast jeder Stütze auf ihren Querschnittsflächeninhalt bezogen. Werden die so erhaltenen Bruchlastspannungen miteinander verglichen, dann kann durch die Berücksichtigung der re-

tween the two cross-section types. The surface area of the triangular profile was somewhat smaller than that of the square cross-section (cf. Fig. 3). These differences were taken into account in the further evaluation.

Due to the lower stability of hinged compared to clamped columns, a hinged line support was implemented for the tests on the cross-sectional influence. The height of the line support increases the actual critical length of the columns by the thickness of the load distribution plates connected to the head and foot of the columns. According to the hinge setup shown in Fig. 5, the effective length was 362 cm. However, the hinge setting was modified after the first test of Q-G-1/2 and D-G-1, because the steel plates were slightly too small for the triangular cross-section. For this reason, a larger steel plate was fixed beneath the initial hinge. Thereby, the effective length was increased to 365 cm for all further tests.

Table 1 shows the test results for verifying the cross-sectional influence. Because of the difference in area between the two cross-section types due to the manufacturing process described above, the ultimate load of each column was related to its cross-sectional area. If the ultimate load stresses thus obtained are compared with each other, an average increase of 11% can be determined by considering the real cross-sectional area sizes.



Bild 5: Gelenkiges Linienlager | Fig. 5: Hinged line support

Quadrant Square (Q)					Dreieck Triangle (D)					$\frac{(\bar{D})}{(\bar{Q})}$
Q-G-1	Q-G-2	Q-G-3	Q-G-4	Mittelwert Mean value (\bar{Q})	D-G-1	D-G-2	D-G-3	D-G-4	Mittelwert Mean value (\bar{D})	
E-Modul Modulus of elasticity $E_{cm,Prisma}$ [MPa]										
48.900	44.200	46.500	47.000	46.650	47.000	46.500	48.800	45.500	46.950	1,01
Bruchlast Ultimate load F [kN]										
229	208	249	245	233	216	238	267	250	243	1,04
Bruchlastspannung (Versuch) Ultimate stress (test) $\sigma = F / A$ [MPa]										
25,7	23,3	28,0	27,5	26,1	25,7	28,4	31,8	29,8	28,9	1,11
Berechnete Knickspannung Calculated critical stress σ_{ki} (Euler) [MPa]										
27,1	24,5	25,3	25,6	25,6	28,1	27,3	28,7	26,7	27,7	1,08
Verhältnis Ratio $\sigma(\text{test})/\sigma_{ki}(\text{Euler})$ [-]										
0,95	0,95	1,10	1,07	1,02	0,92	1,04	1,11	1,12	1,04	

Tabelle 1: Versuchsergebnisse der Querschnittsoptimierung axial gedrückter Stützen | **Table 1:** Test results for the cross-sectional optimization of axial loaded columns

alen Querschnittsflächengrößen eine mittlere Steigerung von 11 % festgestellt werden.

Zu Vergleichszwecken wurden anhand der tatsächlichen Abmessungen und Betoneigenschaften die idealen Knickspannungen nach Euler (Knicklast pro Querschnittsfläche) berechnet. Diese erreichten im Durchschnitt eine Steigerung von 8 %. Folglich wurde eine gute mittlere Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch erreicht und somit konnte der prinzipielle Einfluss der Querschnittsform erfolgreich nachgewiesen werden. Auffällig ist jedoch, dass für jede einzelne Stütze diese Abweichungen größer sind und dass nur bei den ersten drei Stützenversuchen (Q-G-1, Q-G-2 und D-G-1) die Bruchlastspannungen unter den berechneten lagen, während sie in den übrigen Versuchen jeweils um ähnliche Prozentsätze größer ausfielen. Demnach ist es naheliegend, dass bei der Modifizierung des Gelenkaufbaus dessen Reibbeiwert verändert wurde. Auf diesen Zusammenhang wurde in [11] näher eingegangen.

2.2.4 Überprüfung des Formeinflusses

Der Effekt einer Variation in Längsrichtung wurde an zweidimensional veränderten Stützen überprüft. Das bedeutet, dass durch einen rechteckigen Grundriss die Knickrichtung

For comparison purposes, the ideal buckling stresses according to Euler (buckling load per cross-sectional area) were calculated on the basis of the actual dimensions and concrete properties. These achieved an average increase of 8%. As a result, a good average agreement between calculation and test was achieved and thus the principal influence of the cross-sectional shape could be successfully demonstrated. It is noticeable, however, that these deviations are greater for each individual column and that only in the first three column tests (Q-G-1, Q-G-2 and D-G-1) the ultimate load stresses were below the calculated ones, while in the remaining tests they were higher by similar percentages. Accordingly, it is obvious that the coefficient of friction was influenced during the modification of the hinge setup. This relationship was discussed in more detail in [11].

2.2.4 Verification of the shape influence

The effect of a variation in longitudinal direction was tested on two-dimensionally modified columns. This means that the direction of deformation was determined by a rectangular cross-section and that therefore only the critical longitudinal sides were designed with optimum shape (cf. Fig. 3). This method allows both an easier formwork and easier measurements.

vorgegeben wurde und demzufolge auch nur die kritischen Längsseiten formoptimiert ausgeführt wurden (vgl. Bild 3). Dieses Vorgehen erleichtert den Schalungsbau und die Erfassung von Messwerten. Als Referenz wurden rechteckige Stützen herangezogen. Der Einfluss der Formoptimierung wurde an Stützen mit beidseitiger Einspannung überprüft, da die ideale Form in Längsrichtung entsprechend Bild 2 lagerungsabhängig ist und in der Realität zumeist eine Teileinspannung vorliegen wird. Dafür wurden die Stützen direkt zwischen die Lasteintragungsplatten der Prüfmaschine gestellt. Lediglich eine Lastverteilungsplatte, die vor allem für eine völlig ebene Aufstandsfläche sorgen sollte, wurde dazwischen angeordnet (s. Bild 6, links).

Die Schalung für die formoptimierte Stütze wurde aus Kunststoffblöcken computergesteuert gefräst (Bild 6, Mitte). Eine genaue Vermessung jeder Stütze ergab, dass die gewünschte Volumengleichheit in dieser Versuchsreihe sehr gut erreicht wurde. Dennoch sind zum Vergleich

Rectangular columns were used as a reference. The influence of the shape optimisation was tested on columns with clamping on both sides, since the ideal shape in the longitudinal direction is dependent on the position as shown in Fig. 2 and in reality, most columns are at least partially restrained. For this purpose, the columns were placed directly between the load plates of the testing machine. Only one load distribution plate, which was primarily intended to ensure a completely flat contact area, was placed in between (see Fig. 6, left).

The formwork for the shape-optimised columns (Fig. 6, centre) was computer-controlled milled from synthetic blocks. An exact measurement of each column showed that the desired volume equality was achieved in this test series. Nevertheless, the results given in Table 2 also show the resulting ultimate stresses for comparison purposes.

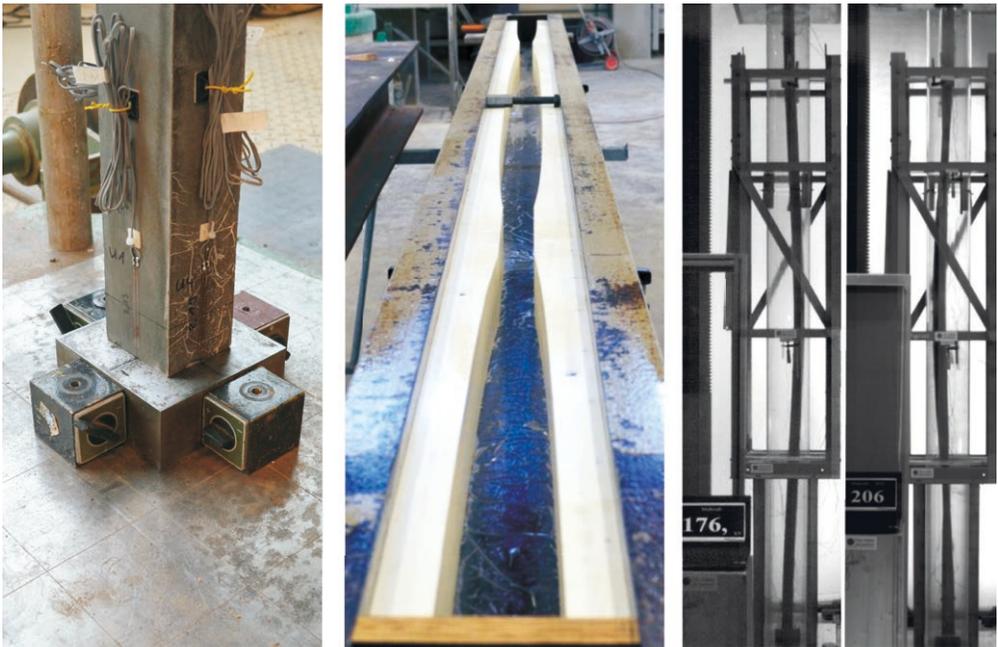


Bild 6: Formoptimierung in Längsrichtung: Realisierung der Einspannung (links), Schalung (Mitte) und Stabilitätsversagen einer rechteckigen Stütze im Vergleich zur optimierten Stütze (rechts) | **Fig. 6:** Shape optimization in longitudinal direction; clamped support (left), formwork (middle) and buckling of the rectangular column in comparison to the optimized one (right)

Rechteck Rectangular (R)				Optimiert Optimized (O)				(\bar{O}) / (\bar{R})
R-E-1	R-E-2	R-E-3	Mittel Mean (\bar{R})	O-E-1	O-E-2	O-E-3	Mittel Mean (\bar{O})	
E-Modul Modulus of elasticity $E_{cm,Prisma}$ [MPa]								
43.200	43.800	44.000	43.700	41.600	41.800	41.600	41.700	0,95
Bruchlast Ultimate load F [kN]								
169	184	181	178	216	219	226	220	1,24
Bruchlastspannung (Versuch) Ultimate stress (test) $\sigma = F / A$ [MPa]								
34,7	37,0	36,5	36,1	43,9	44,6	45,5	44,7	1,24

Tabelle 2: Versuchsergebnisse der Formoptimierung axial gedrückter Stützen | **Table 2:** Test results for the shape optimization of axial loaded columns

in Tabelle 2 auch die resultierenden Bruchlastspannungen aufgeführt.

Aus der Tabelle lässt sich erkennen, dass sowohl die Versagenslasten der drei rechteckigen Stützenversuche recht nah beieinander liegen als auch die der drei optimierten Stützen. Außerdem ist ersichtlich, dass alle Bruchlasten der optimierten höher als die der rechteckigen Stützen ausfielen, sodass durch die Formvariation eine mittlere Steigerung von 24 % erreicht werden konnte und das, obwohl die Betonkennwerte für den E-Modul bei den formoptimierten Stützen sogar etwas geringer ausfielen als die bei den rechteckigen. Die Höhe der Steigerung war unter Berücksichtigung des gewählten Mindestquerschnitts mit verschiedenen Berechnungsmethoden vorab ermittelt worden. Demnach können der Einfluss und das Steigerungspotenzial der Form in Längsrichtung ebenfalls als erwiesen angesehen werden. Ein beispielhaftes Stabilitätsversagen beider Stützen ist rechts in Bild 6 dargestellt. Ausführliche Informationen sind in [10] gegeben.

3 Exzentrisch belastete Stützen

3.1 Theoretische Betrachtungen zur Formfindung außermittig beanspruchter Druckglieder

3.1.1 Festlegung der Untersuchungsbereiche

Für eine kombinierte Beanspruchung aus Biegung und Längsdruck sind mehrere Lastfälle

It can be seen from the table that both the failure loads of the three rectangular column tests and those of the three optimised column tests are very close to each other. In addition, it is evident that all ultimate loads of the optimised columns were higher than those of the rectangular columns, so that an average increase of 24% could be achieved due to the shape variation, even though the concrete parameters for the modulus of elasticity for the shape-optimised columns were slightly lower than those for the rectangular columns. The height of the increase was determined in advance using various calculation methods, taking into account the selected minimum cross-section. Accordingly, the influence and the increase potential of the shape in the longitudinal direction can also be regarded as proven. An exemplary stability failure of both columns is shown on the right in Figure 6. Detailed information are given in [10].

3 Eccentrically loaded columns

3.1 Theoretical considerations for form finding of eccentrically loaded pressure members

3.1.1 Definition of the areas of investigation

Several load cases are conceivable for a combined load of bending and longitudinal pressure. In order to investigate the most characteristic cases, a variant study was carried out on a typical reinforced concrete skeleton structure. The boundary conditions chosen were sufficient

denkbar. Um möglichst charakteristische Fälle zu untersuchen, wurde eine Variantenstudie an einem typischen Stahlbetonskelettbau durchgeführt. Als Randbedingungen wurden eine ausreichend vorhandene Gebäudeaussteifung sowie monolithisch ausgeführte Anschlüsse an Stützenkopf und -fuß gewählt. Durch die so entstehende Rahmenwirkung werden Biegemomente an den Stützenenden eingeleitet. Unter Variation sämtlicher geometrischer Größen sowie unter Beachtung verschiedener Lastfälle und Tragsysteme (Anordnung von Unterzügen, punktgestützte Decken) wurde ermittelt, dass sich in allen Randstützen stets ein ähnlicher Verlauf der Momentenbeanspruchung einstellt. Dieser ist durch einen Nulldurchgang des Moments ca. im mittleren Drittel der Stützhöhe gekennzeichnet. Das Verhältnis aus Normalkraft und Moment variiert sehr stark, da es sowohl von der Gebäudeausführung, und zwar insbesondere von dem Steifigkeitsverhältnis zwischen Stütze und Unterzug (bzw. Decke), als auch von der betrachteten Etage abhängt (Bild 7).

In der untersten Etage eines mehrgeschossigen Gebäudes wird das Moment häufig durch eine hohe wirkende Normalkraft völlig überdrückt, sodass keine Zugspannungen im Querschnitt auftreten, die eine Bewehrung erfordern würden. Zur Aufnahme großer Druckspannungen

building stiffening and monolithic connections at the bottom and the top of the columns. Due to the resulting frame effect, bending moments are induced at the column ends. By varying all geometric dimensions and taking into account different load cases and load-bearing systems (arrangement of beams, point-supported ceilings), it was determined that a similar course of the bending moment always occurs in all edge columns. This is characterised by a zero crossing of the moment approx. in the middle third of the column height. The ratio of normal force to bending moment varies greatly as it depends both on the building design, in particular on the stiffness ratio between column and beam (or ceiling), and on the floor under consideration (Fig. 7).

In the lowest floor of a multi-storey building, the bending moment is often completely suppressed by a high acting normal force, so that no tensile stresses occur in the cross-section that would require reinforcement. For large compressive stresses, the use of (ultra)high-strength concrete would be recommended instead. In contrast, the low vertical loads in the uppermost floors result in the occurrence of high tensile stresses as a result of predominantly bending loads and thus require the use of large quantities of reinforcement. A normal strength concrete quality would already be suf-

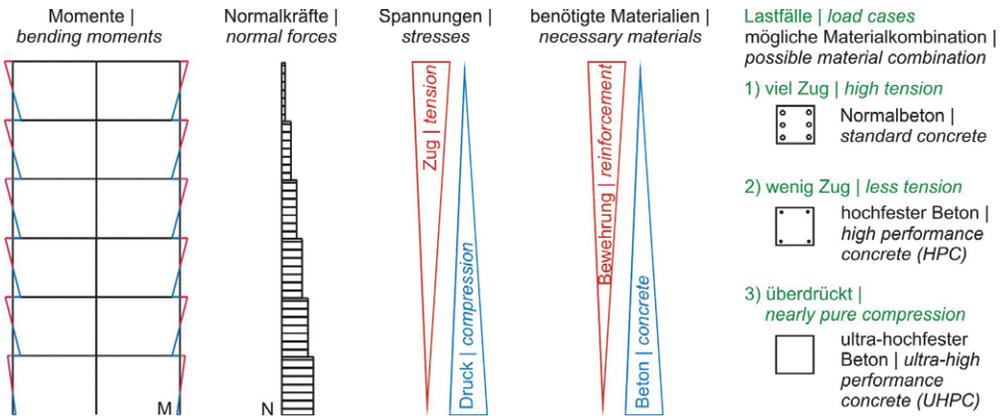


Bild 7: Abhängigkeit des Momenten-Normalkraft-Verhältnisses von der Etage sowie Auswirkungen auf die resultierenden Spannungen und die notwendigen Materialkombinationen bei gleicher Querschnittsfläche | **Fig. 7:** Dependence of the bending moment-normal force ratio on the floor level as well as effects on the resulting stresses and the necessary material combinations for the same cross-sectional area

würde sich stattdessen der Einsatz eines (ultra-)hochfesten Betons empfehlen. Im Gegensatz dazu stehen die geringen vertikalen Auflasten in den obersten Etagen, die das Auftreten großer Zugspannungen infolge vorwiegender Biegebeanspruchung bewirken und somit den Einsatz von hohen Bewehrungsmengen erfordern. Eine geringe bis normalfeste Betongüte wäre hier bereits ausreichend. Aus diesen Überlegungen wurde für unterschiedliche Verhältnisse von Momenten- und Normalkraftbeanspruchung beispielhaft eine geeignete Formfindung und Materialwahl durchgeführt.

3.1.2 Formfindung der Druckglieder

Unter der Voraussetzung eines eintretenden Materialversagens erfolgte die Formfindung der Stützen so, dass in jeder Querschnittsebene die Bruchdehnung des Betons erreicht wird (Bild 8). Eine Ausnahme kann hierbei die Stützenmitte sein, für die infolge von Querkraft oder konstruktiver Durchbildung ggf. ein größerer Mindestquerschnitt erforderlich wird. In den Fällen einer notwendig werdenden Bewehrung wird diese stets parallel zur Außenkontur der Stütze angeordnet, um die beste Wirkung des Hebelarms zu erzielen. Die Bewehrungsseisen können infolge des Momentennulldurchgangs in Stützenmitte und der daraus resultierenden alleinigen Druckbeanspruchung in diesem Bereich zwar nicht über die gesamte Stützenhöhe voll ausgenutzt werden, allerdings wurden sie so dimensioniert, dass sie zumindest in den auf Zug beanspruchten Endbereichen das Fließniveau erreichen. Außerdem wurde definiert, dass bezogen auf die durchschnittliche Querschnittsfläche der maximal zulässige Bewehrungsgehalt lt. Eurocode 2 [15] nicht überschritten werden darf. Für eine festgesetzte Querschnittsfläche lassen sich unter diesen Bedingungen für eine beliebige Momenten-Normalkraft-Kombination sowohl die optimale Form als auch die erforderliche Betongüte und Bewehrung finden.

Die Formfindung erfolgte iterativ an einer über die Höhe segmentierten Stütze. Für die konstante Referenzstütze wurden zunächst die Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung mithil-

ficient here. Based on these considerations, a form finding and material selection was carried out for different ratios of bending moment and normal force load.

3.1.2 Form finding of the pressure elements

Under the assumption that material failure would occur, the shape of the columns was determined in such a way that the ultimate concrete strain was achieved in each cross-sectional plane (Fig. 8). An exception may be the column centre, for which a larger minimum cross-section may be required due to transverse force or a constructive criterion. In cases where reinforcement becomes necessary, it is always arranged parallel to the contour of the column in order to achieve the best effect of the inner lever arm. The reinforcement bars cannot be fully utilised over the entire column height due to the zero crossing of the bending moment in the middle of the column and the resulting pure compression in this area, but they were dimensioned in such a way that they reach the yield strength at least in the end sections subjected to tensile stresses. In addition, it was defined that the maximum allowed reinforcement content according to Eurocode 2 [15] must not be exceeded in relation to the average cross-sectional area. Under these conditions, both the optimum shape and the required concrete quality and reinforcement can be found for any combination of bending moment and normal force.

The shape was found iteratively on a column segmented by height. For the constant reference column, the internal forces were first determined using suitable software (RSTAB), taking into account the second-order effects, whereupon the corresponding strain distribution could be determined in each cross-section plane considered. Subsequently, the cross-section dimensions were modified in such a way that the desired limit strains were achieved in each plane. In the following iteration steps, the internal forces for the resulting column form were determined again according to second-order effects and the cross-section geometry

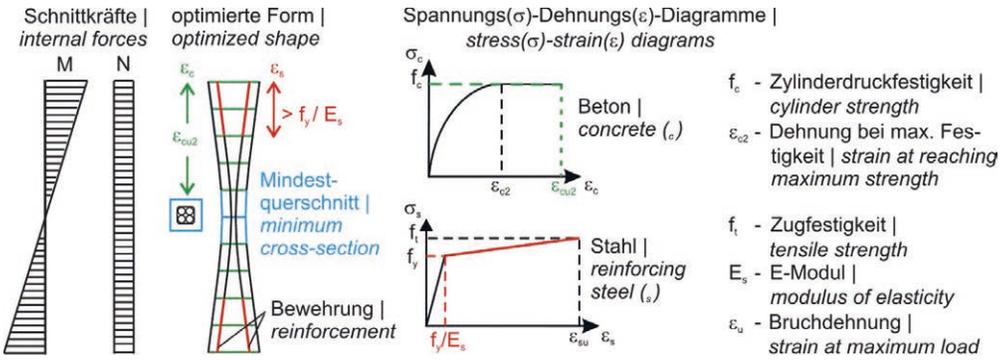


Bild 8: Festgelegte Kriterien zur Formfindung und Spannungs-Dehnungs-Diagramme nach Eurocode 2 [15] | **Fig. 8:** Defined criteria for the shape finding and stress-strain diagrams acc. to Eurocode 2 [15]

fe einer geeigneten Software (RSTAB) bestimmt, woraufhin in jeder betrachteten Querschnittsebene die zugehörige Dehnungsverteilung ermittelt werden konnte. Anschließend wurden die Querschnittsabmessungen so modifiziert, dass in jeder Ebene die angestrebten Grenzdehnungen erreicht werden. In den darauffolgenden Iterationsschritten wurden die Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung für die resultierende Stützenform erneut bestimmt und darauf aufbauend die Querschnittsgeometrie schrittweise verbessert. Sobald Konvergenz vorlag, war die optimale Stützenform gefunden.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Druckkraft der Einfluss der Theorie II. Ordnung immer weiter steigt und letztendlich auf die Optimierungsergebnisse der Stabilitätsbetrachtung (Abschn. 2) und der damit verbundenen Traglaststeigerung zurückführt. Dagegen kann bei einer kleinen Längsdruckkraft und hoher Biegebeanspruchung durch eine Optimierung das notwendige Betonvolumen bis auf die Hälfte reduziert werden, vgl. [14].

3.1.3 Anschlussbereich an die Decke

Der Stützenanschluss an die angrenzenden Bauteile (Decken/Unterzüge) erfolgt i. d. R. rechtwinklig. Bei einer derart scharfkantigen Ausbildung sind hohe Spannungskonzentrationen in diesen Eckbereichen zu erwarten, die zu einem vorzeitigen Materialversagen führen, bevor die maximal aufnehmbare Spannung im eigentli-

was improved step by step. As soon as convergence was available, the optimal column shape was found.

The results show that with increasing compressive force the influence of the second-order effects increases more and more and finally leads to the optimisation results of the stability analysis (section 2) and the associated load increase. On the other hand, with a small longitudinal compressive force and high bending stress, the necessary concrete volume can be reduced by up to half through optimisation, cf. [14].

3.1.3 Connection area to the ceiling

The column connection to the neighbouring components (ceilings/beams) is usually rectangular. With such a sharp-edged design, high stress concentrations are to be expected in these corner areas, which lead to premature material failure before the maximum stress in the actual column cross-section is reached. There is therefore further potential for optimisation for the area between column and ceiling.

In order to check the occurrence of local stress concentrations, numerical investigations were first carried out with the FE program ATENA [18]. A 25 cm wide and 3 m high column with a 1 m wide and 25 cm high central ceiling section at the column top and bottom was modelled (Fig. 9). The underside of the ceiling section at the bottom of the column was assumed to be

chen Stützenquerschnitt erreicht wird. Für den Übergangsbereich zwischen Stütze und Decke besteht somit weiteres Optimierungspotential.

Um das Auftreten lokaler Spannungskonzentrationen zu überprüfen, wurden zunächst numerische Untersuchungen mit dem FE-Programm ATENA durchgeführt [18]. Es wurde eine 25 cm breite, 3 m hohe Stütze mit jeweils einem mittig anschließenden, 1 m breiten und 25 cm hohen Deckenabschnitt an Stützenkopf und -fuß modelliert (Bild 9). Die Unterseite des Deckenabschnitts am Stützenfuß wurde starr eingespannt. Das Aufbringen einer horizontalen Verschiebung und einer vertikalen Last erfolgte auf den Deckenabschnitt am Stützenkopf.

Ausgehend von diesem System wurden für die Ausbildung des Eckbereiches geometrisch verschiedene, flächengleiche Möglichkeiten der Voutung entwickelt und hinsichtlich ihrer Eignung zur Reduktion der lokal erhöhten Spannungen untersucht. Es zeigt sich, dass für diesen Lastfall die entsprechend der Zugdreieck-Methode nach Mattheck [16] bzw. Achenbach et al. [17] berechnete Voutenform am wirksamsten Spannungskonzentrationen reduziert. In der gewählten Beispielberechnung konnten die Spannungen mit diesem Verfahren auf bis zu 52 % gegenüber dem scharfkantigen

rigidly clamped, while a horizontal displacement and a vertical load were applied to the ceiling section at the top of the column.

Starting from this system, geometrically different, area-equal possibilities of curvatures were developed for the formation of the corner area and examined with regard to their suitability for the reduction of the locally increased stresses. It has been shown that for this load case the haunch form calculated according to the tensile triangle method according to Mattheck [16] or Achenbach et al. [17] most effectively reduces stress concentrations. In the selected example calculation, the stresses could be reduced with this method to up to 52% compared to the sharp-edged column connection [18], whereby it must be taken into account that the calculation was linear-elastic, but that real concrete also permits stress redistributions by plastification.

The connection area between column and ceiling was also extensively investigated in the second project of the applicant „Lightweight ceiling structures made of layered high-performance concretes“. The focus there was on optimising the punching shear behaviour. A detailed description can be found in the final report of the mentioned project, see page 144 seq.

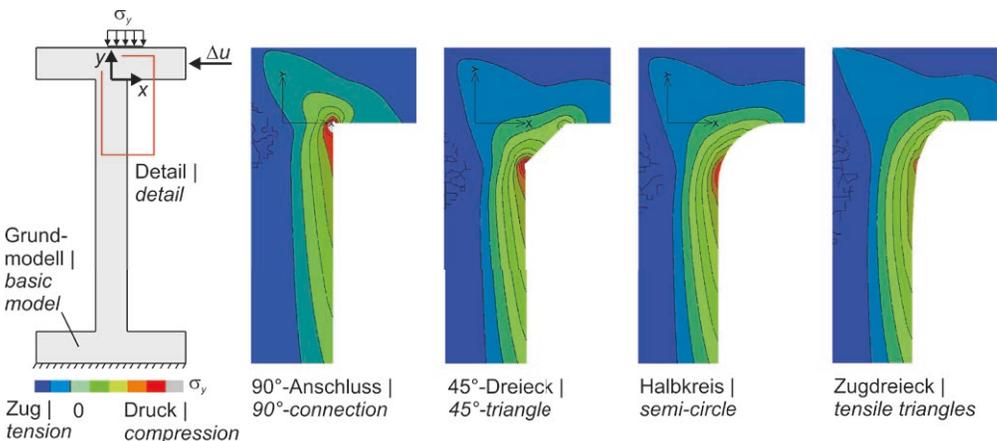


Bild 9: Reduktion der Kerbspannungen im Deckenanschlussbereich für flächengleiche Vouten für den Lastfall Druck mit Biegung; links: Referenzsystem, anschließend Spannungen bei verschiedenen Vouten aus 2D-Simulation mit dem FE-Programm ATENA | **Fig. 9:** Reduction of notch stresses in the area of ceiling connection for coextensive haunches for the load-case of compression with bending; left: reference system followed by stresses of different haunches from 2D-simulation with the FE-program ATENA

Stützenanschluss verringert werden [18], wobei zu berücksichtigen ist, dass die Berechnung linear-elastisch erfolgte, realer Beton jedoch durch Plastifizierung auch Spannungsumlagerungen zulässt.

Der Anschlussbereich zwischen Stütze und Decke wurde auch im zweiten Projekt des Antragstellers „*Leichte Deckentragwerke aus geschichteten Hochleistungsbetonen*“ ausgiebig untersucht. Der Schwerpunkt lag dort auf einer Optimierung des Durchstanstragverhaltens. Eine ausführliche Beschreibung befindet sich im Abschlussbericht des besagten Projekts, S. 144 ff.

3.2 Experimentelle Überprüfung außermittig beanspruchter Druckglieder

3.2.1 Zielstellung und Versuchsplan

Üblicherweise werden Stützen experimentell mit einer gleichgerichteten Exzentrizität untersucht, d. h. unter einer Momentenbelastung, die über die gesamte Bauteilhöhe konstant ist oder aufgrund des Schnittgrößenwachses nach Theorie II. Ordnung ihr Maximum in Stützenmitte erreicht. Eine experimentelle Überprüfung der Beanspruchungssituation, wie sie in den Randstützen typischer Rahmentragwerke auftritt, also mit einem Momentennulldurchgang in Stützenmitte, ist den Autoren nicht bekannt. Um den gewünschten Momentenverlauf in der Stütze zu erreichen, wurde ein statisches System nach Bild 10 gewählt, bei dem an Stützenkopf und -fuß zwei gleichlange, aber entgegengesetzt gerichtete Hebelarme angeordnet wurden.

Bild 11 zeigt eine Übersicht des Versuchsprogramms. In der ersten Versuchsreihe wurden Stützen mit einem großen Momenten-Normalkraft-Verhältnis untersucht. Dies entspricht einer Belastung, wie sie in den obersten Stockwerken eines Gebäudes auftreten würde (vgl. Lastfall 1 in Bild 7). Die zweite Versuchsreihe diente zur Überprüfung eines geringeren Momenten-Normalkraft-Verhältnisses, bei dem das Moment aber noch nicht vollständig überdrückt wird (Lastfall 2 in Bild 7). Für diesen Lastfall erfolgte nach zwei Versuchsdurchgängen eine Modifika-

3.2 Experimental verification of eccentrically loaded pressure elements

3.2.1 Objectives and test program

Usually columns are investigated experimentally with a uniform eccentricity, i.e. with a bending moment that is constant over the entire height of the component or reaches its maximum in the middle of the column due to the increase in internal forces according to second-order effects. An experimental examination of the stress situation, as it occurs in the edge columns of typical frameworks, i.e. with a zero crossing of the bending moment in the middle of the column, is not known to the authors. In order to achieve the desired bending moments in the column, a static system according to Fig. 10 was chosen, in which two equally long but oppositely directed lever arms were arranged at the column top and bottom.

Figure 11 shows an overview of the test program. In the first test series, columns with a large ratio of bending moment and normal force were investigated. This corresponds to a load that would occur on the top floors of a building (cf. load case 1 in Fig. 7). The second series of tests served to check a lower ratio of bending moment to normal force at which the bending moment is not yet completely exceeded (load case 2 in Fig. 7). For this load case, the geometry for the last test was modified after two columns were tested. The third load case from Fig. 7 was only considered theoretically, since a completely pressed cross-section leads back to the results of the stability optimisation.

3.2.2 Chosen boundary conditions

In order to achieve a clear distinction between the component under investigation and the load introduction structure, the lever arms were designed as steel girders and not, as usual in former experiments, as reinforced concrete consoles (e.g. Mehmel et al. [19]). The almost rigid connection was made by bolting the reinforcing bars (double bolted socket bars) to the steel girders. The column end surfaces were

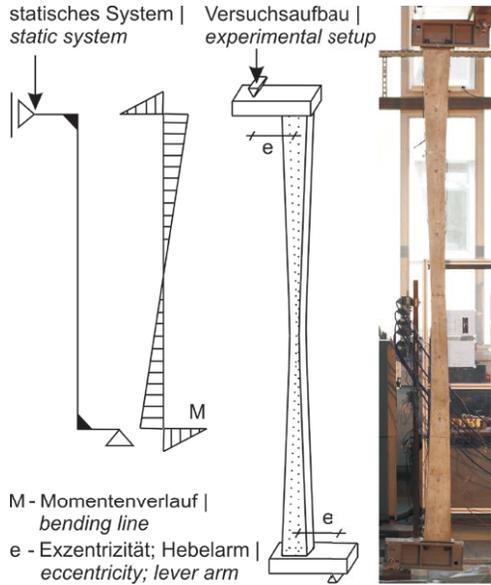
tion der Geometrie für den letzten Durchgang. Der dritte Lastfall aus Bild 7 wurde nur theoretisch betrachtet, da ein völlig überdrückter Querschnitt zu den Ergebnissen der Stabilitätsoptimierung zurückführt.

3.2.2 Gewählte Randbedingungen

Um eine klare Abgrenzung zwischen dem zu untersuchenden Bauteil und der Lasteinleitungs-konstruktion zu erzielen, wurden die Hebelarme als Stahlträger ausgeführt und nicht, wie es in älteren Versuchen üblich war, als Stahlbetonkonsolen (z. B. Mehmel et al. [19]). Der nahezu biegesteife Anschluss erfolgte über eine Verschraubung der Bewehrungseisen (Doppelmuffenstäbe) mit den Stahlträgern. Die Stützenendflächen wurden mit einem Ausgleichsmörtel wieder planparallel abgeglichen. Die gelenkige Lagerung wurde entsprechend Bild 11 über einen mit Lagerböcken verbundenen Rundstab umgesetzt.

Aufgrund der höheren Lasteinleitungs-konstruktion im Vergleich zu den Stabilitätstests musste die Stützenlänge auf 3,3 m reduziert werden. Die übrigen Abmessungen ergaben sich für eine beispielhaft gewählte Belastungs-situation unter Voraussetzung einer quadra-tischen Querschnittsfläche. Allerdings kam es erneut zu geringfügigen Abweichungen bei der angestrebten Geometrie sowie der Flächenkon-stanz, sodass im Folgenden wieder die Bruch-lastspannungen aufgeführt werden.

Die Betondeckung wurde zu 2 cm festgelegt. Eine Bügelbewehrung wird aus statischen Gründen nicht erforderlich. Da sich die Mindestbügelbewehrung nach Eurocode 2 [15] nicht ausreichend mechanisch begründen lässt (Graubner/Kempf [20]), wurde auf deren Einbau verzichtet. Lediglich zur Lagesicherung der oberen Eisen wurden einige Bügel angeordnet. Die Betonage erfolgte analog zu den zentrischen Druckversuchen in liegenden, offenen Schalungen. Diesmal konnten mit einer Betoncharge sowohl eine Referenz- als auch eine optimierte Stütze hergestellt werden, da kein Hochleis-tungsbeton zum Einsatz kam, was den Misch-vorgang vereinfachte. In der Regel wurden am



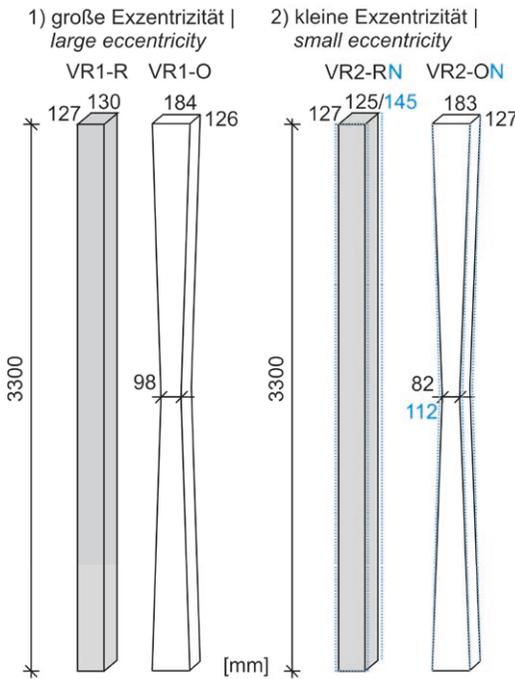
M - Momentenverlauf | bending line
 e - Exzentrizität; Hebelarm | eccentricity; lever arm

Bild 10: Statisches System sowie Umsetzung des Versuchsaufbaus zur Erzielung der gewünschten Momentenbeanspruchung | Fig. 10: Static system and implementation of experimental setup to achieve the desired bending loading

again levelled plane-parallel with a levelling mortar. The hinged support was implemented as shown in Fig. 11 using a round bar connected to bearing brackets.

Due to the higher load introduction construction when compared to the stability tests, the column length had to be reduced to 3.3 m. The other dimensions resulted from an exemplary load situation for a square cross-sectional area. However, there were again minor deviations in the desired geometry as well as in the area constancy so that the ultimate stresses instead the ultimate loads are listed below in Table 3.

The concrete cover was set to 2 cm. A stirrup reinforcement was not necessary for static reasons. Since the minimum stirrup reinforcement according to Eurocode 2 [15] cannot be sufficiently justified mechanically (Graubner/Kempf [20]), it was not installed. Some stirrups were only arranged to secure the position of the upper bars. Concreting was carried out in the same way as for the centric compression



Übersicht Versuchsprogramm exzentrischer Druck | overview test program non-axial loading

Bezeichnung name:			
VR1-R	VR1-O	VR2-RN	VR2-ON
R - Referenz reference			
O - Optimiert optimized			
N - neue Geometrie new geometry			
Beton; Bewehrung concrete; reinforcement:			
C25/30; 4Ø14		C45/55; 4Ø8	
Hebelarm / planmäßige Exzentrizität lever arm / sheduled eccentricity, [cm]:			
30		8	
mittlere Querschnittsfläche average of cross-sectional area; A [cm²]:			
165	173	158 / 183	164 / 188
Schlankheitsgrad slenderness ratio; λ [-]:			
88	83	92 / 79	88 / 78
Versuchszahl number of tests [-]:			
3	3	2 / 1	2 / 1



Bild 11: Versuchsprogramm für exzentrisch gedrückte Stützen zur Überprüfung der Ergebnisse der Formfindung für zwei unterschiedliche Moment-Normalkraft-Verhältnisse; mittlere Stützenabmessungen und Lasteinleitungskonstruktionen | Fig. 11: Test program for non-axial loaded columns for verification of the optimization results for two different load ratios of bending moment and normal force, average dimensions of the columns and lever arm constructions

jeweiligen Stützenprüftag (± 1 d) die Druckfestigkeit und der E-Modul des Betons an drei Normzylindern [21] bestimmt. Als Referenz ist in den nachfolgenden Ergebnistabellen diesmal die Druckfestigkeit angegeben, da diese maßgebend für das Materialversagen ist.

3.2.3 Stützen mit großer Exzentrizität

Unter Berücksichtigung der festgelegten Kriterien ergab sich für die Materialkombination eine erforderliche mittlere Betondruckfestigkeit der Klasse C20/25 bei einer Bewehrungsmenge von

tests in horizontal, open formwork. This time it was possible to produce both a reference and an optimised column in each casting process, as no high-performance concrete was used, which simplified the mixing process. Generally, the compressive strength and the modulus of elasticity of the concrete were determined on three standard cylinders [21] on the respective column test day (± 1 d). As a reference, this time the compressive strength is given in the following result tables, since this is decisive for the material failure.

Rechteck Rectangular (R)				Optimiert Optimized (O)				$(\bar{O}) / (\bar{R})$
VR1-R-1	VR1-R-2	VR1-R-3	Mittel Mean (R)	VR1-O-1	VR1-O-2	VR1-O-3	Mittel Mean (O)	
Druckfestigkeit Compressive strength $f_{cm,cyl}$ [N/mm ²]								
33,3	35,3	35,5	34,7	33,0	36,3	35,5	34,9	1,01
Bruchlast Ultimate load F [kN]								
51,9	49,8	57,0	52,9	84,9	91,5	95,9	90,8	1,72
Bruchlastspannung (Versuch) Ultimate stress (test) $\sigma = F / A$ [N/mm ²]								
3,1	3,0	3,5	3,2	4,9	5,3	5,5	5,2	1,63

Tabelle 3: Versuchsergebnisse der Formoptimierung bei großer Exzentrizität | **Table 3:** Test results for the optimization of the shape with large eccentricity

4 Ø 14 mm. Experimentell wurde in etwa die Güte eines C25/30 erreicht (8 mm Größtkorn). Die Versuche wurden alle bei einer Geschwindigkeit von 0,025 mm/s gefahren. Die Größe des gewählten Mindestquerschnitts resultierte sowohl aus konstruktiven Anforderungen als auch aus der Sicherstellung der Querkraftübertragung.

Mit den in Tabelle 3 dargestellten Ergebnissen wird deutlich, dass durch die Optimierung eine große Laststeigerung von über 60 % erreicht wurde im Vergleich zu den annähernd volumengleichen Referenzstützen. Wird in den Berechnungen das vorhandene Lochspiel und die damit verbundene vergrößerte Hebelarmlänge berücksichtigt, dann wird eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erzielt (Berechnung: 96 kN bzw. 54 kN).

Ergänzend wurden die Abmessungen einer quadratischen Referenzstütze bestimmt, die die gleiche Belastung wie die optimierte Stütze aufnehmen könnte. Es ergab sich ein Querschnitt von 17,5 × 17,5 cm², was dem 1,8-fachen Betonvolumen entspricht.

3.2.4 Stützen mit kleiner Exzentrizität

Zur Überprüfung des deutlich kleineren Momenten-Normalkraft-Verhältnisses werden nur noch 8 mm dicke Eisen bei einer Betonfestigkeitsklasse C45/55 (Größtkorn 8 mm) erforderlich. Im Vergleich zu den Versuchen mit großer Exzentrizität wurde die Prüfgeschwindigkeit

3.2.3 Columns with high eccentricity

Taking into account the defined criteria, the concrete compressive strength required for this material combination was a C20/25 with 8 mm maximum grain size and a reinforcement quantity of 4 Ø 14 mm. In the experiments, the quality of a C25/30 was achieved. The tests were all carried out at a speed of 0.025 mm/s. The size of the selected minimum cross-section resulted both from constructive criteria and from ensuring the transverse force transmission.

With the results shown in Table 3 it becomes obvious that a large load increase of more than 60% was achieved by the optimisation compared to the almost volume equal reference columns. If the existing hole tolerance and the associated increased lever arm lengths are taken into account in the calculations, a good agreement with the test results is achieved (calculation: 96 kN or 54 kN).

In addition, the dimensions of a square reference column were determined, which could carry the same load as the optimised column. This resulted in a cross-section of 17.5 × 17.5 cm², which represents 1.8 times the concrete volume.

3.2.4 Columns with small eccentricity

In order to check the significantly smaller ratio of bending moment to normal force, only 8 mm thick bars are required for a concrete strength class C45/55 (maximum grain size 8 mm). In

nach dem ersten Durchgang auf 0,01 mm/s reduziert, da aufgrund des kürzeren Hebelarms der erforderliche Maschinenweg bis zum Bruch deutlich kleiner ist.

Die Versuchsergebnisse in Tabelle 4 zeigen, dass mit der anfangs berechneten Geometrie keine Laststeigerung erzielt werden konnte. Die im Versuch erreichten Lasten der Referenzstützen entsprechen zwar in etwa der Berechnung (140 kN), jedoch lagen die der optimierten Stützen deutlich darunter (240 kN). Die Ursache hierfür war, dass bei der konkaven Form anstelle eines angedachten Materialversagens ein Stabilitätsversagen auftrat. Die Referenzstützen verformten sich analog zu allen Stützen mit großer exzentrischer Belastung S-förmig, wie es auch der durch den Versuchsaufbau initiierten Biegebeanspruchung entspricht (s. auch Bild 10, rechts), und versagten letztlich am Stützenkopf oder -fuß. Die konkaven Formen versagten dagegen infolge eines Ausknickens im mittleren Bereich der Stützhöhe.

Bemerkenswert ist, dass die mittleren Schlankheiten der Referenz und der konkaven Stütze in etwa gleich hoch waren, die nach Elastizitätstheorie ermittelten Knicklasten deutlich über den erreichten Versagenslasten lagen und dennoch bei der konkaven Form ein Stabilitäts- anstelle eines Materialversagens auftrat. In der anschließenden Analyse stellte sich heraus, dass bei den Berechnungen zur Formfindung der Einfluss ei-

comparison to the tests with high eccentricity, the test speed after the first run was reduced to 0.01 mm/s, because due to the shorter lever arm, the required piston movement to break is considerably shorter.

The test results in Table 4 show that no load increase could be achieved with the initially calculated geometry. The loads of the reference columns achieved in the test correspond approximately to the calculation (140 kN), but those of the optimised columns were significantly lower (240 kN). The reason for this was that in the concave shape a stability failure occurred instead of an intended material failure. The reference columns deformed in an s-shape, analogous to all columns with large eccentric loads, corresponding to the bending load initiated by the test setup (see also Fig. 10, right), and ultimately failed at the column head or foot. In contrast, the concave forms failed due to a buckling in the middle area of the column height.

It is remarkable that the mean slenderness ratio of the reference and the concave column were about the same, the buckling loads determined according to the elasticity theory were significantly higher than the failure loads achieved, and yet the concave form showed a stability failure instead of a material failure. The subsequent analysis revealed that the influence of a non-linear internal force determination was underestimated in the calculations for form

Rechteck Rectangular (R)		Optimiert Optimized (O)				(\bar{O}) / (\bar{R})		
VR2-R-1	VR2-R-2	Mittel Mean (R1-R2)	VR2-RN-3	VR2-O-1	VR2-O-2	Mittel Mean (O1-O2)	VR2-ON-3	
Druckfestigkeit Compressive strength $f_{cm,oyl}$ [N/mm ²]								
55,5	57,4	56,5	54,4	55,1	58,4	56,8	55,8	1,01 1,03
Bruchlast (Rechenwert) Ultimate load (calculated value) F [kN]								
148,0	156,1	152,1	215,7	129,3	160,9	145,1	234,9	0,95 1,09
Bruchlastspannung (Versuch) Ultimate stress (test) $\sigma = F / A$ [N/mm ²]								
9,3	10,0	9,7	11,8	7,9	9,8	8,9	12,5	0,92 1,06

Tabelle 4: Versuchsergebnisse der Formoptimierung bei kleiner Exzentrizität | **Table 4:** Test results for the optimization of the shape with small eccentricity

ner nichtlinearen Schnittgrößenermittlung unterschätzt wurde. Neben der Beachtung einer ungewollten Ausmitte und des Zuwachses nach Theorie II. Ordnung hätte auch das Aufreißen des Betons bereits bei der Schnittgrößenermittlung berücksichtigt werden müssen. Die äußeren Schnittgrößen müssten über Momenten-Verkrümmungs-Linien und den daraus gewonnenen Biegelinien bei einer stufenweisen Laststeigerung ermittelt werden. Durch das Aufreißen des Betons findet eine Steifigkeitsabnahme statt. Wachsen die äußeren Schnittgrößen schneller als die inneren an, dann kann kein Gleichgewicht mehr zwischen einwirkendem und widerstehendem Moment hergestellt werden. Somit wird ein Stabilitätsversagen maßgebend.

Durch eine Vergrößerung der Stützenmittenbreite wurde eine neue Form bestimmt (Proben ...N-3 in Tabelle 4), für welche die nichtlineare Berechnung ein Steigerungspotenzial von ca. 50 % versprach. Im Versuch konnte dies leider erneut nicht erreicht werden, da die Referenzstütze eine höhere und die optimierte Geometrie eine geringere Traglast als berechnet erreichten. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass für beide Geometrien rechnerisch eine gleich große, über die gesamte Stützenhöhe konstante Ausmitte angesetzt wurde. Entscheidend für das Versagen der Referenzstütze ist jedoch die am Stützenkopf bzw. -fuß vorherrschende Exzentrizität, welche sich im Wesentlichen auf die Größe des vorhandenen Lochspiels beschränken lässt. Für die konkave Geometrie ist dagegen die wirkende Exzentrizität in der Stützenmitte maßgebend, welche infolge einer Stützenvorkrümmung wesentlich größer sein kann als die an den Stützenenden vorherrschende. Eine solche Vorkrümmung konnte im Versuch sogar gemessen werden. Ein weiterer möglicher Grund ist, dass aufgrund der Verwendung von Muffenstäben an den Stützenenden ein größerer Bewehrungsgehalt vorherrscht als in den übrigen Bereichen, was aufgrund der gewählten Konfiguration zu einer nicht zu vernachlässigenden Erhöhung gegenüber dem berechneten Widerstand führte. Darüber hinaus hängen die rechnerischen Ergebnisse der konkaven Stütze sehr stark von dem gewählten Zugversteifungsansatz ab.

finding. In addition to the consideration of an undesired eccentricity and the increase according to second-order effects, the cracking of the concrete should also have been taken into account during the determination of the internal forces. The external forces would have to be determined using bending moment curvature lines and the resulting bending lines with a successive load increase. As a result of the cracking of the concrete, a decrease in stiffness takes place. If the external internal forces increase faster than the internal ones, then no equilibrium can be established between the acting and resisting moments. Thus, a stability failure becomes decisive.

By increasing the width of the middle of the column, a new shape was determined for which the non-linear calculation promised an increased potential of approx. 50% (specimen ...N-3 in Table 4). Unfortunately, this could not be achieved again in the test, since the reference column achieved a higher load capacity and the optimised geometry a lower load capacity than calculated. One possible reason for this is that for both geometries an equal eccentricity, constant over the entire column height, was taken into account by calculation. However, the decisive factor for the failure of the reference column is the eccentricity at the column top or bottom, which can essentially be limited to the size of the existing hole tolerance. For the concave geometry, however, the effective eccentricity in the middle of the column is decisive, which can be considerably greater than the eccentricity at the column ends due to a column pre-deformation. Such a pre-deformation could even be measured in the test. A further possible reason is that due to the use of bolted socket bars at the column ends a higher reinforcement content was present than in the other areas, which led to a not negligible increase compared to the calculated resistance due to the selected configuration. Furthermore, the calculated results of the concave column depend very much on the chosen tension stiffening method.

4 Demonstrator

In Zusammenarbeit mit dem zweiten SPP-Projekt an unserem Institut „*Leichte Deckentragwerke aus geschichteten Hochleistungsbetonen*“ (s. S. 144 ff.) erfolgte zum Abschluss der zweiten Projektphase der Bau eines Demonstrators, s. S. 686 ff.

5 Zusammenfassung

In der ersten Phase des Forschungsprojekts lag der Fokus auf der Optimierung zentrisch gedrückter Stützen. Es konnte theoretisch und experimentell gezeigt werden, dass eine Formoptimierung für schlanke knickgefährdete Stützen sowohl für den Stabquerschnitt als auch für die Längsrichtung vorgenommen werden kann. In der zweiten Phase wurde die Formoptimierung außermittig belasteter Druckglieder thematisiert. Für überwiegend auf Biegung beanspruchte Stützen mit verhältnismäßig geringer Normalkraft konnte ein sehr großes Optimierungspotenzial nachgewiesen werden. Bei höheren Normalkräften wurde allerdings eine recht hohe Sensitivität hinsichtlich auftretender Imperfektionen festgestellt, wodurch derzeit nur eine materielle Optimierung und keine Formfindung empfohlen werden können.

Große Vorteile, vor allem auch für die wirtschaftliche Anwendung, sind derzeit im Fertigteilbau von Hallen denkbar, wo viele gleichartig überwiegend biegebeanspruchte stabförmige Bauteile zum Einsatz kommen und folglich der Einsparungseffekt pro Schal- und Bemessungsaufwand hoch wäre.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198118038 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

4 Demonstrator

In cooperation with the second SPP project at our institute "*Lightweight slab structures from layered high-performance concretes*" (see page 144 and following), a demonstrator was realized at the end of the second project phase, see page 686 et seq.

5 Summary

In the first period of the research project, the focus was on the optimisation of centrally pressed columns. It could be shown theoretically and experimentally that a shape optimisation for slender columns with buckling risk can be carried out both for the cross-section and for the longitudinal direction of the rod. In the second period, the optimisation of the shape of eccentrically loaded compression members was addressed. A very large optimisation potential could be demonstrated for columns with relatively low normal forces, which are predominantly subjected to bending loads. At higher normal forces, however, a quite high sensitivity to imperfections was found, so that at present only material optimisation and no form finding can be recommended.

Great advantages, above all also for economic applications, are currently thinkable in the pre-fabricated construction of halls, where many similarly predominantly bending loaded rod-shaped elements are used and consequently the saving effect per formwork and design effort would be high.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (number 198118038) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Schmidt, A.; Curbach, M.: Querschnittsadaption stabförmiger Druckbauteile. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im SPP 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 26–35 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171350>
- [2] Schmidt, A.: Formoptimierung von Stützen. Diplomarbeit, TU Dresden, 2013
- [3] Schmidt, A.; Henke, M.; Fischer, O.; Curbach, M.: Formvariationen von Druckgliedern. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 792–803 – DOI: 10.1002/best.201300053
- [4] Keller, J.: The Shape of the Strongest Column. Archive for Rational Mechanics and Analysis (1960) 5, S. 275–285
- [5] Frauenthal, J.: Constrained Optimal Design of Columns Against Buckling. Journal of Structural Mechanics 1 (1972) 1, S. 79–89
- [6] Clausen, T.: Ueber die Form architektonischer Säulen. Bulletin de la classe physicomathématique de l'académie impériale des sciences de Saint-Petersbourg 9 (1851), S. 370–380
- [7] Olhoff, N.; Rasmussen, S.: On Single and Bimodal Optimum Buckling Loads of Clamped Columns. International Journal of Solids and Structures 13 (1976) 7, S. 605–614
- [8] Kirmser, P. G.; Hu, K.: The Shape of the Ideal Column Reconsidered. The mathematical intelligencer 15 (1993) 3, S. 62–67
- [9] Schmidt, A.; Curbach, M.: Historische Betrachtungen zur Formoptimierung von Stützen. In: Krawtchuk, A.; Zimmermann, T.; Strauss, A. (Hrsg.): Werkstoffe und Konstruktionen – Innovative Ansätze 2013 – Festschrift zu Ehren von o.Univ.-Prof. DI Dr.techn. Dr.phil. Dr.-Ing.e.h. Konrad Bergmeister, MSc., Berlin: Ernst & Sohn, 2013, S. 19–26
- [10] Schmidt, A.; Curbach, M.: Design optimization to increase the (buckling) stability of concrete columns. Structural Concrete 18 (2017) 5, S. 680–692 – DOI: 10.1002/suco.201600183
- [11] Schmidt, A.; Curbach, M.: Zentrische Druckversuche an schlanken UHPC-Stützen. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 9, S. 588–602 – DOI: 10.1002/best.201600027
- [12] Kollbrunner, C.; Meister, M.: Knicken: Theorie und Berechnung von Knickstäben, Knickvorschriften. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer, 1955, hier: S. 5/6
- [13] Bornemann, R.; Schmidt, M.; Fehling, E.; Midden-dorf, B.: Ultra-Hochleistungs-beton UHPC-Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten. Beton- und Stahlbetonbau 96 (2001) 7, S. 458–467 – DOI:10.1002/best.200100550
- [14] Schmidt, A.; Curbach, M.: Architectural columns as a result of shape optimization. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture. engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9253, Book of Abstracts: S. 152, Langfassung auf USB-Stick, 8 S.
- [15] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [16] Mattheck, C.: Design in Nature. Berlin: Springer, 1998
- [17] Achenbach, M.; Edler, J.; Hellmig, R. J.; Mattheck, C.; Moldenhauer, H.; Sachs, W.; Tesari, I.: Entwicklung von effizienten, einfach anzuwendenden Konstruktionsprinzipien für technische Bauteile nach dem Vorbild der Natur. Schlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt, Bad Laasphe / Eggenstein-Leopoldshafen / Rödermark / Engen-Welschingen, 2010
- [18] Schwiteilo, K.: Concrete columns formed by nature. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 303–308
- [19] Mehmel, A.; Schwarz, H.; Kasperek, K. H.; Makovi, J.: Tragverhalten ausmittig beanspruchter Stahlbetondruckglieder. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb, Heft Nr. 204, Berlin: Ernst & Sohn, 1969
- [20] Graubner, C.-A.; Kempf, S.: Mindestbewehrung in Betontragwerken. Warum und Wieviel? Beton- und Stahlbetonbau 95 (2000) 2, S. 72–80 – DOI: 10.1002/best.200000130
- [21] DIN EN 12390-1:2012-12: Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen; Deutsche Fassung EN 12390-1:2012.

Bildnachweise | Picture credits

- Alle Bilder: Angela Schmidt; Ausnahmen: Bild 5: Gregor Schacht, Bild 6 rechts: Kollegen des Otto Mohr-Laboratoriums, Bild 9: Katrin Schwiteilo. Die Bilder 1–9 wurden bereits vorab publiziert und erscheinen hier in modifizierter Form; Erstveröffentlichungen in [10] (Bilder 1, 2; basierend auf [2]), [9] (Bilder 3–6), [14] (Bilder 7, 8) und [18] (Bild 9).
- All pictures: Angela Schmidt; exceptions: Fig. 5: Gregor Schacht, Fig. 6 right: colleagues of the Otto Mohr Laboratory, Fig. 9: Katrin Schwiteilo. Fig. 1–9 have already been published in advance and appear here in modified form; first publications in [10] (Fig. 1, 2; based on [2]), [9] (Fig. 3–6), [14] (Fig. 7, 8), and [18] (Fig. 9).

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Querschnittsadaption für stabförmige Druckbauteile

Cross sectional adaption for rod-shaped elements in compression

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach Institutsdirektor und Direktor des Otto-Mohr-Laboratoriums Institute's director and director of the Otto Mohr Laboratory
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	CU 37/17-1/2 (Projektnummer Project number: 198118038)
Adresse Address:	TU Dresden, Institut für Massivbau, 01062 Dresden
Kontakt Contact:	+49 351 463 37660 manfred.curbach@tu-dresden.de https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Phase I Period I: 01.07.2011–30.09.2014 Phase II Period II: 01.10.2014–30.09.2017 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 30.06.2020
Team Team:	Angela Schmidt (01.04.2013–28.02.2018) Regine Ortlepp (01.10.2012–30.04.2013) Katrin Schwiteilo (01.07.2011–31.10.2012) Iurii Vakaliuk (01.02.2018–Projektende End of project) Marc Koschemann (01.02.2018–Projektende End of project)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Schwiteilo, K.: Concrete columns formed by nature. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 303–308
- Schmidt, A.; Curbach, M.: Historische Betrachtungen zur Formoptimierung von Stützen. In: Krawtschuk, A.; Zimmermann, T.; Strauss, A. (Hrsg.): Werkstoffe und Konstruktionen – Innovative Ansätze 2013 – Festschrift zu Ehren von o.Univ.-Prof. DI Dr.techn. Dr.phil. Dr.-Ing.e.h. Konrad Bergmeister, MSc., Berlin: Ernst & Sohn, 2013, S. 19–26
- Schmidt, A.; Curbach, M.; Henke, M.; Fischer, O.: Formvariationen von Druckgliedern. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 792–803 – DOI: 10.1002/best.201300053
- Schmidt, A.; Curbach, M.: Querschnittsadaption stabförmiger Druckbauteile. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im SPP 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 26–35 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171350>
- Schmidt, A.; Curbach, M.: Buckling failure of columns – with form variations to higher load capacities. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-501715, publ. auf USB-Stick, 12 S.
- Schmidt, A.; Curbach, M.: Zentrische Druckversuche an schlanken UHPC-Stützen. Beton- und Stahlbeton 111 (2016) 9, S. 588–602 – DOI: 10.1002/best.201600027
- Schmidt, A.; Curbach, M.: Architectural columns as a result of shape optimization. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9253, Book of Abstracts: S. 152, Langfassung auf USB-Stick, 8 S.
- Schmidt, A.; Curbach, M.: Design optimization to increase the (buckling) stability of concrete columns. Structural Concrete 18 (2017) 5, S. 680–692 – DOI: 10.1002/suco.201600183

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Schmidt, A.: Formoptimierung schlanker Betondruckglieder. 2022

Studienarbeiten | Student's research projects

- Schmidt, A.: Form follows force – Optimierung der Geometrie von Stützen. Projektarbeit, 2013
- Schmidt, A.: Formoptimierte Stützen. Diplomarbeit, 2013
- Müller, E.: Lasteinleitung in Stützen bei experimentellen Untersuchungen. Projektarbeit, 2014
- Scheffler, A.: Reduzierung der Kerbspannungen im Anschlussbereich Stütze/Decke. Projektarbeit, 2014
- Schwarz, R.: Entwurf und Berechnung einer formoptimierten Fahrradüberdachung. Diplomarbeit, 2017

Folgeprojekt | Follow-up project

- SFB/TRR 280: Konstruktionsstrategien für materialminimierte Carbonbetonstrukturen – Grundlagen für eine neue Art zu bauen | CRC/Transregio 280: Design strategies for material-minimised carbon reinforced concrete structures – principles of a new approach to construction

Sprecher Speaker:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 280
Förderzeitraum Funding period:	seit since: 01.07.2020
Partner Partners:	25 Forschende der TU Dresden, der RWTH Aachen University und des ipf Dresden e.V. 25 researchers of TU Dresden, RWTH Aachen University and ipf Dresden e.V.

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- 2012, Regine Ortlepp: Preis beim SPP-internen Hornbach-Wettbewerb (Entwurf eines Winkelstützelements) | Winner of SPP 1542 Hornbach Competition (Design of a cantilever wall element)
- 2013, Angela Schmidt: Gottfried-Brendel-Preis für Projektarbeit | Gottfried Brendel Prize for Project Work
- 2014, Angela Schmidt: Kurt-Beyer-Preis für Diplomarbeit | Kurt Beyer Prize for Diploma Thesis
- 2019–2021: Realisierung eines Demonstrators, ausgestellt im Deutschen Museum München | Realisation of a demonstrator for long-term use in the Deutsches Museum in Munich

Leichte Deckentragwerke aus geschichteten Hochleistungsbetonen | Lightweight ceiling structures made of layered high-performance concrete

- ▶ Michael Frenzel, Kristina Farwig, Manfred Curbach
- ▶ Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden

Anmerkung: Auszüge des Aufsatzes zu Ergebnissen der ersten Förderperiode wurden bereits in ähnlicher Form in [1] veröffentlicht. | Note: Excerpts of the report on the results of the first funding period have already been published in a similar form in [1].

1 Einleitung

Stahlbetondeckenplatten sind material- und energieintensive Biegetragwerke, wenn sie, wie derzeit üblich, ebenflächig mit konstanter Querschnittshöhe und aus einer Betonsorte hergestellt werden. Diese Ausführung ist aus statischer und bauökologischer Sicht sehr ineffizient, da der bewehrte Beton nur an wenigen Stellen sowohl in der Haupttragrichtung als auch über die Deckenhöhe voll ausgenutzt wird. Mit einer gleichmäßigen Ausnutzung können Material und Gewicht und damit natürliche Ressourcen gespart werden. Dazu wurden zwei grundlegende Ansätze verfolgt:

- 1. Querschnittsoptimierung:** höherfeste Betone werden in dünnen Deckschichten in besonders druck- und zugbeanspruchten Bereichen eingesetzt. Sie nehmen vorwiegend die Kräfte aus der Biegebeanspruchung auf und sichern den Verbund mit der Bewehrung. Gering tragfähige, leichte Betone werden im weniger beanspruchten mittleren Querschnittsbereich angeordnet, was zu einem dreischichtigen Aufbau führt. Auf eine Schubbewehrung wird – wie bei Platten üblich – verzichtet. Die Tragfähigkeit in der Verbundfuge ist sicherzustellen.
- 2. Formoptimierung:** Die Trägerhöhe wird (zusätzlich) in Haupttragrichtung kraftflussgerecht verändert, so dass das Material in den Deck- und Kernschichten gleichmäßig ausgenutzt ist. Aus funktionalen Gründen kann je-

1 Introduction

Reinforced concrete floor slabs are material- and energy-intensive flexural load-bearing structures if, as it is currently the case, they are produced flat with a constant cross-sectional height and from one type of concrete. This design is very inefficient from a structural and building ecology point of view, as the reinforced concrete is only fully utilised at a few areas both in the main load-bearing direction and across the slab height. With an uniform utilisation, material and weight and thus natural resources can be saved. Two basic approaches were taken to achieve this:

- 1. Cross-section optimisation:** higher-strength concretes are used in thin cover layers in areas subject to particularly high compressive and tensile stresses. They mainly absorb the forces from the bending stress and secure the bond with the reinforcement. Lightweight concretes with low strengths are placed in the less stressed middle part of the cross-section, resulting in a three-layer structure. Shear reinforcement is dispensed – as usual with slabs. The load-bearing capacity of the interface between the different concrete layers must be ensured.
- 2. Shape optimisation:** the member height is (additionally) changed in the main load-bearing direction according to the force flow, so that the material is evenly utilised in the face and core layers. For functional reasons, how-

doch lediglich die Plattenunterseite angepasst werden – die Oberseite verläuft horizontal.

ever, only the underside of the ceiling slab can be adjusted – the top side remains horizontal.

In der ersten Förderphase konzentrierten sich die Untersuchungen auf einachsig gespannte, einfeldrig oder endlos durchlaufende Decken. Besonders wichtig war es, die Betone für die Querschnitts- und Formoptimierung so auszuwählen, dass sie im Zusammenspiel mit der Bewehrung möglichst effizient ausgenutzt werden. Des Weiteren lag der Fokus auf den durch den Schichtenverbund auftretenden Fugen und der damit einhergehenden Fugentragfähigkeit, um ein möglichst monolithisches Tragverhalten sicherzustellen.

In the first funding phase, the investigations concentrated on single-span or endless continuous one way ceilings. It was particularly important to select the concretes for cross-section and shape optimisation in such a way that they are utilised as efficiently as possible in interaction with the reinforcement. Furthermore, the focus was on the interfaces resulting from combining different concrete layers and the associated interface resistance in order to ensure the most monolithic load-bearing behaviour possible.

Die zweite Förderphase diente dazu, die Erkenntnisse der ersten Phase auf zweiachsig gespannte Decken – im Speziellen auf punktgestützte Endlosdurchlaufplatten mit quadratischem Stützenraster – zu übertragen und die generierbaren Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Aufgrund der komplexen Beanspruchungsverhältnisse bei diesen Decken zeigte es sich als erforderlich, die Untersuchungen vor allem auf experimenteller Ebene getrennt für den Stütz- und Feldbereich durchzuführen.

The second funding phase served to transfer the findings of the first phase to two way ceilings – in particular to point-supported continuous flat slabs with a square column grid – and to show the optimisation potential that can be generated. Due to the complex stress conditions in these slabs, it turned out to be necessary to carry out the investigations separately for the support and mid-span area, especially at the experimental level.

2 Einachsig gespannte Decken

2 One way ceilings

2.1 Theoretische Untersuchungen

2.1 Theoretical investigations

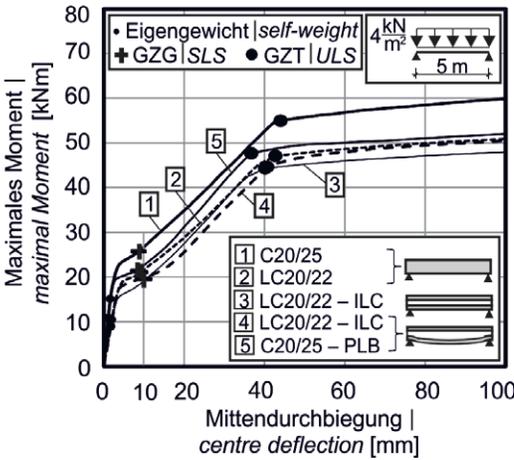
2.1.1 Gewichtersparnis und Effizienz

2.1.1 Weight saving and efficiency

Frenzel und Kahnt [2], [3] zeigen die möglichen Gewichts- und Ressourcenersparnisse infolge der Querschnitts- und Formoptimierung rechnerisch am Beispiel einer gewöhnlichen einfeldrigen Platte mit einer Spannweite von 5 m auf. Dabei wurden die Vorgaben des EC 2 [4] bezüglich der zulässigen Mittendurchbiegung von max. 10 mm im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) und der abzutragenden Nutzlast von 4 kN/m² im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) berücksichtigt. Bild 1 stellt das Tragverhalten einer parallelgurtigen Platte aus Normalbeton C20/25 (Nr. 1) konstruktivem Leichtbeton LC20/22 (Nr. 2), einer parallelgurtig

Frenzel and Kahnt [2], [3] show the possible weight and resource savings as a result of cross-section and shape optimisation by calculation using the example of a common single-span slab with a span of 5 m. The specifications of EC 2 [4] regarding the permissible centre deflection of max. 10 mm in the serviceability limit state (SLS) and the imposed load to be transferred of 4 kN/m² in the ultimate limit state (ULS) were taken into account.

Fig. 1 compares the load-bearing behaviour of a flat ceiling slab of regular concrete C20/25 (No. 1) with structural lightweight concrete LC20/22 (No. 2), a three-layered flat and shape-



Nr.	No.	h/d [mm]/[mm]	a_s in [%]	g in [%]
1		210/185	100	100
2		240/210	78	73
3		260/230	67	59
4		310/280	58	51
5		310/285	58	62

h Trägerhöhe | *element's height*
 d statische Höhe | *effective depth*
 a_s Bewehrungsfläche | *area of reinforcement*
 g Eigengewicht | *self-weight*

Bild 1: Tragverhalten verschiedener querschnitts- und formoptimierter Platten unter einer Belastung von 4 kN/m² und einer zulässigen Mittendurchbiegung von 10 mm im GZG, Gegenüberstellung der Stahl- und Gewichtsgewinne geschichteter, einfeldriger Platten | **Fig. 1:** Load bearing behaviour of different cross-sectional and form optimized slabs under a loading of 4 kN/m² and allowed centre deflection of 10 mm at SLS, comparison of the steel and weight gains of layered, one-way slabs

und formoptimierten Platte aus LC20/22 und Infralichtbeton (ILC, Nr. 3 und 4) sowie C20/25 und Porenleichtbeton (PLB, Nr. 5) einander gegenüber. Tabelle 1 zeigt die iterativ numerisch ermittelten Plattenhöhen h , statischen Höhen d , erforderlichen Bewehrungsmengen a_s und die mögliche Gewichtsreduzierung für die verschiedenen Varianten. Bei der kraftflussgerecht ausgebildeten Platte aus konstruktiven Leichtbetonen (Nr. 4) betragen das Gewicht lediglich 51 % und der Stahlbedarf 58 % der Referenzplatte aus Normalbeton C20/25.

2.1.2 Ressourcenersparnis

Zur Beurteilung der Ersparnis an natürlichen Ressourcen ist besonders die Betonzusammensetzung von großer Bedeutung. Um die Gewinne bestimmen zu können, wurden ökobilanzielle Betrachtungen auf Basis der GaBi-Datenbank [5] zu den verschiedenen Betonsorten durchgeführt. Maßgebende Parameter zur Beurteilung der Ressourcenersparnis und des Umwelteinflusses sind z. B. der Bedarf an Primärenergie und der CO₂-Ausstoß. Frenzel/Kahnt [3] führen Betonrezepturen auf, die die benötigten und rechnerisch angesetzten Betonfestigkeiten und -steifigkeiten aufweisen und stellen beispielhaft für den Primärenergiebedarf die verschiedenen

optimised slab of LC20/22 and infralightweight concrete (ILC, No. 3 and 4) as well as C20/25 and porous lightweight concrete (PLB, No. 5). Table 1 shows the iteratively numerically determined slab heights h , effective depth d , required area of reinforcement a_s and the possible weight reduction for the different variants. In the case of the slab made of structural lightweight concretes (No. 4), which is designed in accordance with the force flow, the weight is only 51% and the steel requirement 58% of the reference slab made of regular concrete C20/25.

2.1.2 Saving in resources

In order to assess the savings in natural resources, the concrete composition in particular is of great importance. In order to be able to determine the gains, life cycle assessment considerations were carried out on the basis of data from the GaBi database [5] on the different types of concrete. Decisive parameters for assessing the resource savings and the environmental impact are, for example, the primary energy demand and the CO₂ emissions. Frenzel/Kahnt [3] list concrete mixtures with the required and calculated concrete strengths and stiffnesses and compare the different concrete types and slab designs as examples

Betonsorten und Plattenausführungen einander gegenüber (Bild 2). Es ist ersichtlich, dass konstruktive Leichtbetone (LC20/22 und Infralichtbeton ILC) unter Verwendung von üblichen Blähtonzuschlägen deutlich mehr Energie pro Kubikmeter benötigen als Normal- und Porenleichtbetone (PLB). Damit sind geschichtete Decken in der Kombination C20/25-PLB zur Einsparung von Ressourcen zu bevorzugen.

for the primary energy demand (Fig. 2). It can be seen that structural lightweight concretes (LC20/22 and infralightweight concrete ILC) using common expanded clay aggregates require significantly more energy per cubic metre than regular and porous lightweight concretes (PLB). Thus, layered ceiling slabs in the combination C20/25-PLB are to be preferred for saving resources.

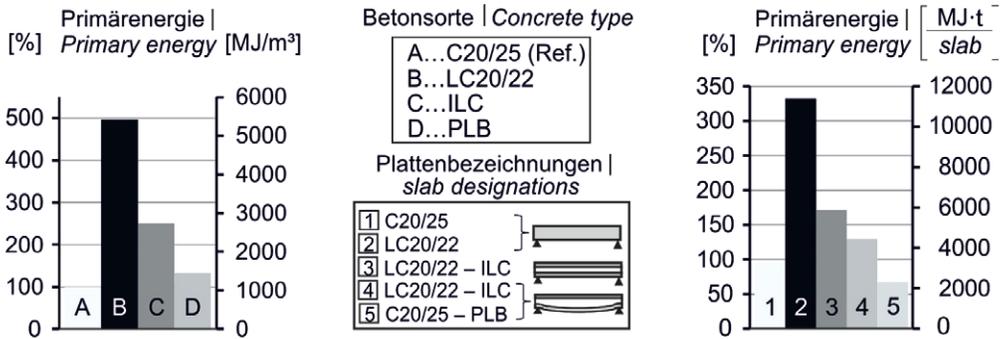


Bild 2: Primärenergieverbrauch der betrachteten Betonsorten (links) und bezogen auf das Gewicht geschichteter Deckenplatten (rechts) | Fig. 2: Primary energy consumption of the considered concrete types (left) and related to the weight of layered ceiling slabs (right)

2.1.3 Auswahl geeigneter Betone

Auf Grundlage der vorgestellten Ergebnisse erfolgten weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen an geschichteten Platten mit der minimalgewichtigen Anordnung LC20/22-ILC (konstruktiver Leichtbeton-Infralichtbeton) und der besonders ressourcensparenden Kombination C20/25-PLB (Normalbeton-Porenleichtbeton). Dabei wurde beachtet, dass die Betone mit der vorhandenen Mischtechnologie der lokal ansässigen Betonwerke herstellbar und damit technisch und wirtschaftlich umsetzbar waren.

2.1.3 Selection of suitable concretes

On the basis of the results presented, further theoretical and experimental investigations were carried out on layered slabs with the minimum weight arrangement LC20/22-ILC (structural lightweight - concrete-infralightweight concrete) and the particularly resource-saving combination C20/25-PLB (normal concrete-porous lightweight concrete). It was taken into account that the concretes could be produced with the existing mixing technology of the local concrete plants and were thus technically and economically feasible.

2.1.4 Analytische und numerische Modellierung

Während der Projektlaufzeit wurde ein analytisches Verfahren zur Querschnitts- und Formoptimierung geschichteter Träger auf Basis der Kraftgrößenmethode nach Theorie I. Ordnung entwickelt (Modellskizze siehe Bild 3, links), mit dem die Betonarten, Schichtdicken, Bewehrungsmenge und Trägerhöhe in der Art bestimmt werden können, dass die Materiali-

2.1.4 Analytical and numerical modelling

During the project, an analytical method for optimising the cross-section and shape of layered elements was developed on the basis of the method of consistent deformation according to the I. order theory (model sketch, see Fig. 3, left), with which the types of concrete, layer thicknesses, amount of reinforcement and cross-sectional height can be determined

en und die Betonfugen im Grenzzustand der Tragfähigkeit in jedem Querschnitt bestmöglich ausgelastet sind. Der genaue Versagensort und die Versagensart können damit nicht mehr vorhergesagt werden. Rechts in Bild 3 ist exemplarisch der theoretische Ausnutzungsgrad (1 = 100 %) entlang der Trägerachse (halbes System, span: 7 m) eines zweiseitig voll eingespannten, geschichteten Trägers mit veränderlicher Querschnittshöhe unter Einzellast gezeigt. Es ist ersichtlich, dass die Biegetragfähigkeit im Bereich der Einspannung ($0 \leq x < 0,8 \text{ m}$ und $x = 3,5 \text{ m}$) und die Fugentragfähigkeit im Bereich $0,8 \text{ m} \leq x < 3,5 \text{ m}$ zu 100 % erreicht werden.

Ergänzend zur analytischen Berechnung geschichteter Deckenelemente wurde ein zwei-dimensionales, numerisches Modell mit dem Finite-Elemente-Programm Atena Engineering 2D, Červenka Consulting Ltd., entwickelt, um Kräfte, Spannungen, Dehnungen und Verformungen in jedem Punkt eines geschichteten Elementes bestimmen und damit die Materialausnutzung beurteilen zu können. Das Modell diente zur Berechnung der Gewichtersparnis und Effizienz (siehe Bild 1) sowie zur – im Vergleich zum analytischen Modell – genaueren Beurteilung des Tragverhaltens der experimentell untersuchten, geschichteten, klein- und großformatigen Schub- und Plattenprüfkörper (s. Abschnitt 2.2). Mit dem numerischen Modell ließ sich jedoch im Gegensatz zum analytischen Modell der Formfindungsprozess im Rahmen des Projektes nicht automatisieren.

in such a way that the materials and the concrete interfaces in the ultimate limit state are optimally utilised in each cross-section. The exact location and type of failure can thus no longer be predicted. Fig. 3 on the right shows an example of the theoretical degree of utilisation (1 = 100%) along the beam axis (half system, span: 7 m) of a layered beam with two fixed ends and variable cross-sectional height under concentrated load. It can be seen that the flexural capacity in the end and centre area ($0 \leq x < 0.8 \text{ m}$ and $x = 3.5 \text{ m}$) and the interface capacity in the area of $0.8 \text{ m} \leq x < 3.5 \text{ m}$ are achieved at a level of 100%.

Complementary to the analytical calculation of layered ceiling slabs, a two-dimensional numerical model was developed with the finite element programme Atena Engineering 2D, Červenka Consulting Ltd. in order to determine forces, stresses, strains and deformations at every point of a layered element and thus to be able to assess the material utilisation. The model was used to calculate weight savings and efficiency (see Fig. 1) and – compared to the analytical model – to more accurately evaluate the load-bearing behaviour of the experimentally investigated, layered, small- and large-sized shear and slab test specimens (see Section 2.2). However, in contrast to the analytical model, the numerical model could not be used to automate the form-finding process within the scope of the project.

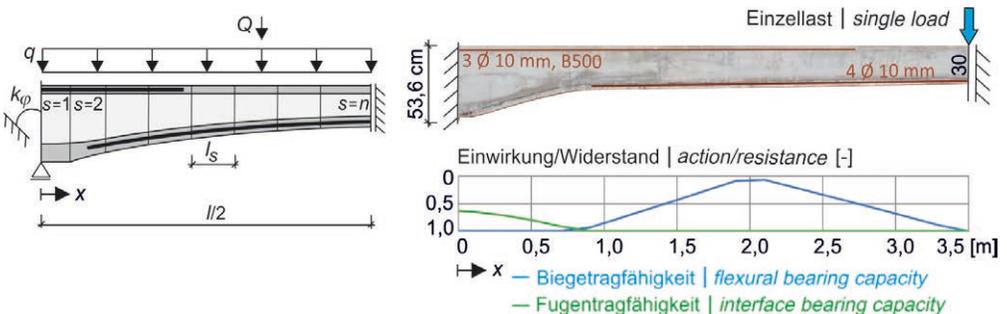


Bild 3: Modellierung querschnitts- und formoptimierter Tragglieder (links) und theoretischer Ausnutzungsgrad (1 = 100 %) entlang der Trägerachse eines 7 m langen, geschichteten und formoptimierten Trägers unter Einzellast (halbes System, rechts) | **Fig. 3:** Modelling of cross-sectional and shape optimized bearing members (left) and theoretical utilisation factor (1 = 100%) along the axis of a 7 m long layered and shape-optimized member under single load (half system, right)

2.2 Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen des Projektes wurde eine Vielzahl an experimentellen Untersuchungen durchgeführt, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

2.2.1 Schubkörper

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von unbewehrten Betonfugen erfolgte die Prüfung von mehr als 45 kleinformatigen, quaderförmigen ($12 \times 28 \times 21 \text{ cm}^3$), fünfschichtigen Druck-Druck-Schubkörpern in drei verschiedenen Beton- und Fugenrauigkeitskombinationen. Mit Hilfe der bestimmten Bruchlasten und Verformungen ließen sich Kennwerte wie die Haftschub- und Haftzugfestigkeit sowie fugenspezifische Spannungs-Verschiebungs-Beziehungen bestimmen, die zur Kalibrierung und Verifizierung der Rechenmodelle erforderlich waren [6].

2.2.2 Parallelgurtige Platten

Zur Identifizierung und Analyse der für geschichtete Elemente relevanten Versagensarten – Biegezug-, Schub- und Fugenversagen – wurden in 4-Punkt-Biegeversuchen 36 geschichtete Platten bis zum Bruch belastet. Die Probekörper bestanden aus den zwei gewählten Materialkombinationen LC20/22-ILC und C20/25-PLB und besaßen verschiedene Längen (150, 200 und 250 cm) und Plattenhöhen von 10 cm bzw. 20 cm. Zusätzlich wurden drei einschichtige, 10 cm hohe und 250 cm lange Referenzplatten getestet.

Die geschichteten Platten wiesen 20 bzw. 30 mm starke Deckschichten und 50 mm bzw. 150 mm starke Kernschichten auf. Die untere Deckschicht war mit fünf bzw. vier B500-Stabstählen, Durchmesser 6 mm, bewehrt. Typische Momenten-Mittendurchbiegungs-Verläufe zeigt exemplarisch Bild 4 für 10 cm hohe, geschichtete Elemente aus Normal- und Porenleichtbeton. Bei vier Platten dieser Kombination stellte sich ein Fugenversagen ohne Stahlfließen (Bild 4, Nr. 1–4, Bild 5 links), bei vier Platten ein Fugenversagen mit Stahlfließen (Bild 4,

2.2 Experimental investigations

Within the framework of the project, a large number of experimental investigations were carried out, which are presented in the following sections.

2.2.1 Shear specimens

In order to determine the load-bearing capacity of unreinforced concrete interfaces, more than 45 small-format, cuboid ($12 \times 28 \times 21 \text{ cm}^3$), five-layer compression-shear bodies were tested in three different concrete and joint roughness combinations. With the help of the measured failure loads and deformations, specific values such as the adhesive shear strength and adhesive tensile strength as well as interface-specific stress-displacement relationships could be obtained, which were required for the calibration and verification of the calculation models [6].

2.2.2 Layered slabs with constant height

36 layered slabs were loaded to failure in 4-point bedding tests to identify and analyse the failure modes relevant for layered elements – flexural, shear and interface failure. The specimens consisted of the two selected material combinations LC20/22-ILC and C20/25-PLB and had different lengths (150, 200 and 250 cm) and panel heights 10 cm and 20 cm respectively. In addition, three single-layer, 10 cm high and 250 cm long reference panels were tested.

The layered slabs consisted of top and bottom layers, 20 and 30 mm thick respectively and a 50 mm or 150 mm thick core layer. The bottom layer was reinforced with five or four B500 steel bars, diameter 6 mm. Typical moment-centre deflection curves are shown in Fig. 4 for 10 cm high layered elements made of regular and porous lightweight concrete. Four slabs of this combination showed an interface failure without steel yielding (Fig. 4, numbers 1–4, Fig. 5, left), four slabs showed an interface failure with steel yielding (Fig. 4, numbers 5–8) and one slab showed a bending tensile failure character-

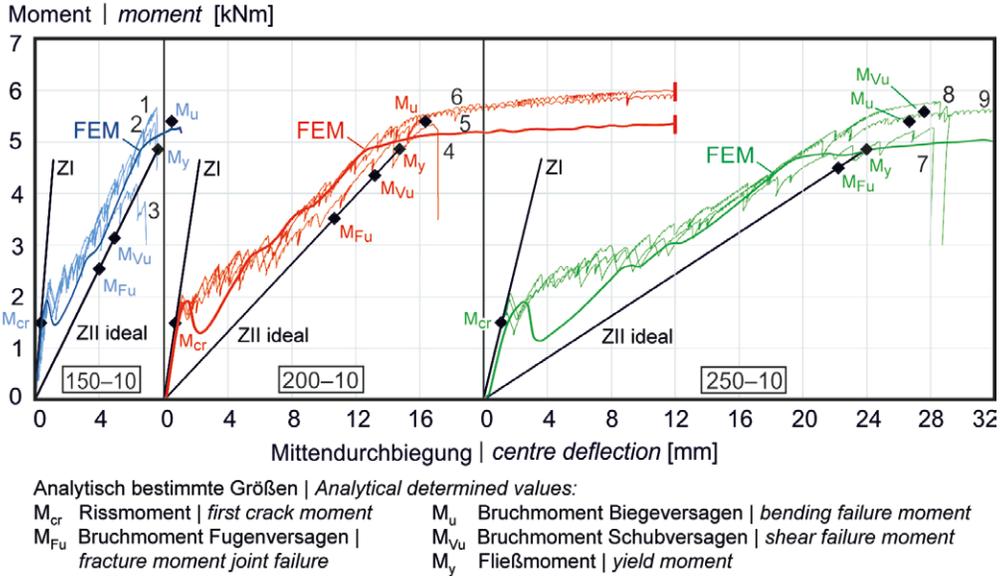


Bild 4: Vergleich zwischen experimentell und rechnerisch bestimmten Momenten-Mittendurchbiegungs-Beziehungen für geschichtete Plattenstreifen aus Normal- und Porenleichtbeton (C20/25-PLB) mit einer Höhe von 10 cm und Längen von 150, 200 und 250 cm | **Fig. 4:** Comparison between experimentally and computationally determined moment-centre deflection relationships for layered slab strips made of regular and foam concrete (C20/25-PLB) with a height of 10 cm and lengths of 150, 200 and 250 cm



Bild 5: Geschichtete Platten aus Normal- und Porenleichtbeton (C20/25-PLB) mit Fugenversagen (links) bzw. Biegezugversagen (rechts) | **Fig. 5:** Layered slabs made of regular and foam concrete (C20/25-PLB) with interface failure (left) and bending failure (right)

Nr. 5–8) und bei einer Platte Biegezugversagen ein, das durch das Reißen des Stahls gekennzeichnet war (Bild 4, Nr. 9, Bild 5, rechts, [7]).

ised by fracture of the steel (Fig. 4, No. 9, Fig. 5, right), [7].

2.2.3 Großformatige Plattenstreifen

2.2.3 Large format slab strips

Die Erkenntnisse aus den zuvor genannten kleinformatigen Tests, die erfolgreiche Validierung der Berechnungsmodelle und die Bereitstellung eines Verfahrens zur Formfindung führten zur Dimensionierung, Herstellung und Prüfung von drei großformatigen Plattenstreifen. Zum einem konnte damit die praktische Umsetzbarkeit geschichteter Deckenelemente mit veränderlicher Querschnittshöhe im Maßstab 1 : 1, zum anderen auch die Eignung der Rechenmodelle demonstriert werden. Exemplarisch erfolgte die

The findings from the aforementioned small-format tests, the successful validation of the calculation models and the provision of a procedure for form finding led to the dimensioning, production and testing of three large-format slab strips. On the one hand, this made it possible to demonstrate the practical feasibility of layered ceiling elements with variable cross-sectional heights on a scale of 1 : 1, and on the other hand, the suitability of the calculation models. As an example, the centre span of an endless continuous strip with 7 m span was investigated

Untersuchung des Mittelfeldes eines Endlosdurchlaufträgers mit 7 m Spannweite in folgenden drei Varianten: ein Referenzträger mit konstanter Höhe von 35 cm aus Normalbeton C20/25 unter mittig angeordneter Einzellast und zwei formoptimierte Träger aus Normalbeton C20/25 und Porenleichtbeton, die konstante Deckschichtdicken von 45 mm und eine veränderliche Querschnittshöhe entlang der Spannrichtung aufwiesen. Die Formen waren verschieden, da ein Träger mit einer Einzellast in Feldmitte und einer mit einer Streckenlast (durch acht Einzellasten aufgelöst) belastet wurde. Bild 6 stellt exemplarisch den Träger unter Streckenlast mit den wesentlichen Abmaßen im Versuchsstand dar. Die Form des geschichteten Trägers unter Einzellast ist ausschnittsweise in Bild 3 abgebildet. Alle drei Träger wiesen gleiche Betonvolumina zwischen den Auflagerlinien und die gleiche Bewehrungsmenge auf, so dass die Bruchlasten direkt miteinander verglichen werden konnten, [1].

2.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

2.3.1 Schubkörper

Die Untersuchungen an Schubkörpern haben gezeigt [6], dass:

- die Haftscher- und Haftzugfestigkeit (erwartungsgemäß) relativ großen Streuungen unterliegen, wobei diese bei glatten und gerechten Fugen aus C20/25-PLB am geringsten sind,
- gerechte und verzahnte Fugen eine ähnliche Tragfähigkeit zeigen, die über der von glatten Fugen liegt,

in the following three variants: a reference member with a constant height of 35 cm made of regular concrete C20/25 under a centrally arranged concentrated load and two form-optimised strips made of regular concrete C20/25 and porous lightweight concrete, which had constant cover thicknesses of 45 mm and a variable cross-sectional height along the span direction. The shapes were different, as one girder was loaded with a concentrated load in the centre of the span and one with a line load (resolved by eight concentrated loads). Fig. 6 shows exemplarily the strip under line load with the main dimensions and the test set-up. The shape of the layered slab strip under concentrated load is shown in part in Fig. 3. All three members had the same concrete volumes between the support lines and the same amount of reinforcement, so that the failure loads could be compared directly with each other, [1].

2.3 Results and conclusions

2.3.1 Shear specimens

The investigations on shear specimens have shown [6], that:

- the adhesive shear strength and adhesive tensile strength are (as expected) subject to relatively large scatters, whereby these are lowest for smooth and rough interfaces made of C20/25-PLB,
- rough and indented interfaces have a similar load-bearing capacity, which is higher than that of smooth interfaces,

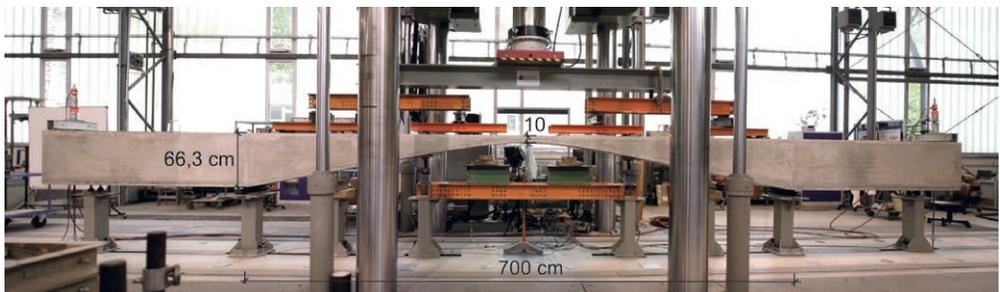


Bild 6: Formoptimierter, geschichteter Plattenstreifen unter Streckenlast (hier realisiert mit acht Einzellasten im Feldbereich) | **Fig. 6:** Shape-optimized, layered slab strip under uniform loading (here realised with eight single loads in the mid span)

- gerechte Fugen deutlich leichter bei geschichteten Deckenelementen realisiert werden können als verzahnte Fugen und somit bevorzugt herzustellen sind,
- die Fugen der Materialkombination LC20/22-ILC etwa doppelt so tragfähig wie die der Materialkombination C20/25-PLB sind,
- das Tragverhalten von Schubkörpern numerisch simuliert werden kann und daraus fugenspezifische Spannungs-Öffnungs-Beziehungen bestimmbar sind, die zur Berechnung des Fugenversagens geschichteter Platten benötigt werden.
- roughened interfaces can be realised much more easily with layered ceiling elements than indented interfaces and are therefore preferable,
- the interfaces of the material combination LC20/22-ILC are about twice as load-bearing as those of the material combination C20/25-PLB,
- the load-bearing behaviour of shear specimens can be simulated numerically and interface-specific stress-opening relationships are determinable from this, which are required for the calculation of the interface failure of layered slabs.

Der gewählte Versuchsaufbau und das Analyseverfahren werden als geeignet bewertet und daher zur weiteren Anwendung empfohlen.

The chosen experimental set-up and the analysis procedure are evaluated as suitable and therefore recommended for further application.

2.3.2 Parallelgurtige Platten

Mit Hilfe der Untersuchung von 36 kleinformatigen, parallelgurtigen, geschichteten Platten konnten sowohl analytische Rechenansätze als auch die erstellten numerischen Modelle bewertet, kalibriert und damit verbessert werden. Bild 4 zeigt beispielhaft für neun geschichtete Elemente aus C20/25 und Porenleichtbeton die analytisch bestimmten Bruchmomente für das Biege-, Schub- und Fugenversagen (M_{u} , $M_{V,u}$, $M_{F,u}$) und die Fließmomente M_y , die rechnerisch bestimmten Momenten-Durchbiegungs-Beziehungen im ungerissenen (Zustand ZI) und im idealen gerissenen Zustand (ZII ideal), [7], sowie die mit dem Finite-Elemente-Modell bestimmten Momenten-Mittendurchbiegungs-Beziehungen.

2.3.2 Layered slabs with constant height

With the help of the investigation of 36 small-sized, layered slabs with constant height, both the analytical calculation approaches and the numerical models created could be evaluated, calibrated and thus improved. Fig. 4 shows, as an example, for nine layered elements made of C20/25 and porous lightweight concrete, the analytically determined moments for the bending, flexural shear and joint failure (M_{u} , $M_{V,u}$, $M_{F,u}$) and the yield moments M_y , the computationally determined moment-deflection relationships in the uncracked (state ZI) and in the ideal cracked state (ZII ideal), [7], as well as the moment-centre deflection relationships determined with the finite element model.

Aus den Untersuchungen konnten weitere Schlussfolgerungen gezogen werden. So waren – ähnlich den Erkenntnissen aus den Schubfugenuntersuchungen – Platten aus konstruktiven Leichtbetonen tragfähiger als die der vergleichbaren Platten aus Normal- und Porenleichtbeton.

Further conclusions could be drawn from the investigations. Thus – similar to the findings from the shear interface investigations – slabs made of structural lightweight concretes were more load-bearing than those of the comparable slabs made of regular and porous lightweight concrete.

Die drei maßgebenden Versagensarten Biegeschub-, Fugen- und Biegezugversagen konnten identifiziert werden. Einige Platten (Nr. 5–8) zeigten auf Bruchlastniveau Merkmale mehre-

The three decisive failure modes, flexural shear, interface and bending tensile failure, could be identified. Some slabs (numbers 5–8) showed characteristics of several failure modes at

rer Versagensarten auf, indem z. B. ein Fugenversagen unter Fließen der Bewehrung eintrat. Damit waren die Bewehrung und die Fugen gleichzeitig stark beansprucht, was auf eine effiziente Querschnittsgestaltung schließen lässt.

Bild 4 zeigt, dass mit dem entwickelten numerischen Modell die experimentellen Momenten-Mittendurchbiegungs-Beziehungen sehr zufriedenstellend wiedergegeben werden können. Bei der Platte der Serie 150-10 stellte sich rechnerisch ein Fugenversagen ein, bei den anderen beiden Serien ein Biegezugversagen mit stark beanspruchter Schubfuge. Auch die Auswertung einzelner Bereiche des Finite-Elemente-Modells zeigten, dass besonders bei den schlanken Platten mit einer Länge von 250 cm sowohl der Stahl unter Zug und Beton unter Druck in Plattenmitte als auch die Fuge und der Beton im stark schubbeanspruchten Bereich in Auflagernähe auf Bruchlastniveau und damit gleichzeitig stark ausgelastet waren. Dies bestätigte die experimentellen Beobachtungen.

Bei der Anwendung der analytischen Berechnungsansätze wird bei allen Plattengeometrien stets das Fugenversagen gegenüber dem Querkraftversagen maßgebend (siehe Bild 4). Dies stimmt mit den Versuchsbeobachtungen überein. Es ist auch ersichtlich, dass mit abnehmender Schlankheit bzw. Plattenlänge die Fugen- und Querkrafttragfähigkeit zunehmend unterschätzt werden. Die Eignung der analytischen Ansätze kann daher (nur) für praxisübliche (Schub-)Schlankheiten > 5 empfohlen werden.

2.3.3 Großformatige Plattenstreifen

Die Prüfungen der großformatigen Plattenstreifen zeigten, dass sich die theoretisch bestimmten, bezogenen Verhältnisse aus Bruchlast zu Trägergewicht von 2,2 beim geschichteten und gevouteten Träger unter Einzellast und von 2,5 beim Träger unter Streckenlast – das Verhältnis beträgt 1,0 beim einschichtigen Referenzträger konstanter Höhe unter gleicher Belastung – experimentell in dieser Höhe nicht bestätigt werden konnten. Das Verhältnis und damit die

the ultimate load level, e.g. interface failure occurred under yielding of the reinforcement. This meant that the reinforcement and the joints were heavily stressed at the same time, suggesting an efficient cross-section design.

Fig. 4 shows that the experimental moment-centre deflection relationships can be reproduced very satisfactorily with the numerical model developed. In the case of the slab 150-10 series, an interface failure occurred computationally. For the other two series, a bending tensile failure with a strongly stressed shear interface was determined. The evaluation of individual areas of the finite element model also showed that, especially for the slender slabs with a length of 250 cm, both the steel under tension and concrete under compression in the centre of the slab as well as the interface and the concrete in the heavily shear-stressed area near the support were stressed at the ultimate load level and thus heavily loaded at the same time. This confirmed the experimental observations.

When applying the analytical calculation approaches, the interface failure is always decisive compared to the shear failure for all slab geometries (see Fig. 4). This is consistent with the test observations. It is also evident that with decreasing slenderness or slab length, the interface and shear load-bearing capacity are increasingly underestimated. The suitability of the analytical approaches can therefore (only) be recommended for common (shear) slendernesses > 5 .

2.3.3 Large format slab strips

The tests of the large-format slab strips showed that the theoretically determined relative ratios of failure load to self-weight of 2.2 for the layered and haunched strip under single load and of 2.5 for the one under line load – the ratio is 1.0 for the mono-layered reference strip of constant height under the same load – could not be confirmed experimentally at this level. The ratio and thus the efficiency of the cross-section and shape optimisation were 1.1 for the beam un-

Effizienz der Querschnitts- und Formoptimierung lagen beim Träger unter Einzellast bei 1,1 und beim Träger unter Streckenlast bei 2,0. Hier zeigte sich, dass die analytischen Rechenansätze nur begrenzt zur Formoptimierung geeignet sind bzw. zu größeren Abweichungen gegenüber dem realen Tragverhalten führen. Dennoch ist die Effizienzsteigerung um den Faktor 2,0 sehr positiv zu bewerten, da Decken-tragwerke üblicherweise unter dem Ansatz von Flächen- bzw. Streckenlasten bemessen werden. Speziell die Formfindung sollte zukünftig noch intensiver mit numerischen Modellen erfolgen – auch wenn dies sehr aufwendig ist – da das Tragverhalten damit genauer prognostiziert werden kann. Auch müssen eventuelle Probleme bei der Herstellung solch schlanker Tragwerke von vornherein Berücksichtigung finden.

2.3.4 Fazit

Mit den generierten und durch Versuche verifizierten Rechenansätzen lassen sich geschichtete Deckenelemente effizienter dimensionieren und ihr Tragverhalten vorausbestimmen. Mit den experimentellen Untersuchungen können die theoretisch erarbeiteten und in den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 vorgestellten Ergebnisse und damit einhergehende Ersparnisse prinzipiell bestätigt werden.

3 Zweiachsig gespannte Decken

3.1 Theoretische Untersuchungen

3.1.1 Gewichtersparnis und Effizienz

Frenzel et al. [8] bestimmten die mögliche Gewichtersparnis bei zweiachsig gespannten Betonplatten infolge von Querschnitts- und Formoptimierungen. Der Fokus lag dabei auf punktgestützten Endlosdurchlaufplatten (Bild 7, links). Für eine praxisübliche Spannweite von 7 m und unter Berücksichtigung der Vorgaben aus dem EC 2 [4] wurden die Querschnittshöhe und der Aufbau in der Art bestimmt, dass sowohl die Nachweise für die Momenten- und die Querkrafttragfähigkeit unter Eigengewicht,

der single load and 2.0 for the beam under line load. Here it was shown that the analytical calculation approaches are only suitable for shape optimisation to a limited extent or lead to greater deviations compared to the real load-bearing behaviour. Nevertheless, the increase in efficiency by a factor of 2.0 is very positive, since slab structures are usually designed using area or line loads. In future, the form-finding in particular should be carried out more intensively with numerical models – even if this is very time-consuming – as the load-bearing behaviour can be predicted more precisely with this. Possible problems in the production of such slender structures must also be taken into account from the outset.

2.3.4 Conclusions

With the computational approaches generated and verified by experiments, layered ceiling slabs can be dimensioned more efficiently and their load-bearing behaviour can be predicted. With the experimental investigations, the theoretically elaborated results and associated savings presented in sections 2.1.1 and 2.1.2 can be confirmed in principle.

3 Two way ceilings

3.1 Theoretical investigations

3.1.1 Weight saving and efficiency

Frenzel et al. [8] presented the possible weight saving for two way concrete slabs as a result of cross-section and shape optimizations. The focus was on point-supported continuous slabs (Fig. 7, left). For a practical span of 7 m and taking into account the specifications from EC 2 [4], the cross-section height and the superstructure were determined in such a way that both the checks for the moment and shear at ultimate limit state under self-weight, an additional dead and imposed load (5 kN/m^2) as well as for the centre deflection at the serviceability limit state (SLS) are fulfilled.

Ausbaulast und einer veränderlicher Last von 5 kN/m² als auch der Mittendurchbiegungsnachweis (GZG) erfüllt sind.

Dazu benötigt eine herkömmliche Stahlbetonplatte aus C25/30 eine Stärke von 30 cm (Nr. 1), eine gevoutete Platte eine Höhe von 10–40 cm (Nr. 2), eine ebene Dreischichtplatte mit Infralichtbeton (ILC) eine Stärke von 52 cm (Nr. 3) und diese gevoutet eine Höhe von 10–48 cm (Nr. 4). Das Eigengewicht lässt sich dabei auf bis zu 50 % reduzieren (Bild 7, rechts). Um gleichzeitig auch eine möglichst schlanke, wenig voluminöse Decke auszubilden, ist es erforderlich, auflagernahe Stützbereiche mit (höherfestem) Normalbeton zu versehen (Nr. 5 und 6). Gegenüber der Referenzplatte können mit einer gevouteten, geschichteten Platte neben dem Eigengewicht auch das Betonvolumen und damit der Ressourcenverbrauch auf ca. 58 % reduziert werden. Dabei liegt der Stahlverbrauch um lediglich 6 % über dem der Referenzplatte (Nr. 1 bzw. 6, Bild 7 rechts). Die Analyse zeigt ebenfalls, dass bei punktgestützten Mehrfeldplatten hinsichtlich der Optimierungspotentiale zwischen dem stark schubbeanspruchten Stütz- und dem vorwiegend momentenbeanspruchten Feldbereich zu unterscheiden ist. Die weiteren Untersuchungen erfolgten daher getrennt für diese beiden Bereiche.

A conventional reinforced concrete slab of the strength class C25/30 requires a thickness of 30 cm (No. 1), a haunched slab a height of 10–40 cm (No. 2), a three-layer flat slab with infralightweight concrete (ILC) a thickness of 52 cm (No. 3) and this slab – if haunched – height of 10–48 cm (No. 4). The self-weight can be reduced by up to 50% (Fig. 7, right). In order to simultaneously shape a slab that is as slender and of low-volume as possible, it is necessary to provide areas with (higher-strength) regular weight concrete close to the supports (numbers 5 and 6). Compared with the reference slab, a haunched, layered slab can reduce not only the self-weight but also the required concrete volume and thus the resource consumption to approx. 58%. At the same time, the steel consumption is only 6% higher than that of the reference slab (No. 1 and 6, Fig. 7 right). The analysis also shows that in the case of point-supported multi-span slabs, a distinction must be made between the support area, which is subject to high shear stresses, and the mid-span area, which is predominantly subject to stresses due to moments, with regard to optimization potential. Further investigations were therefore carried out separately for these two areas.

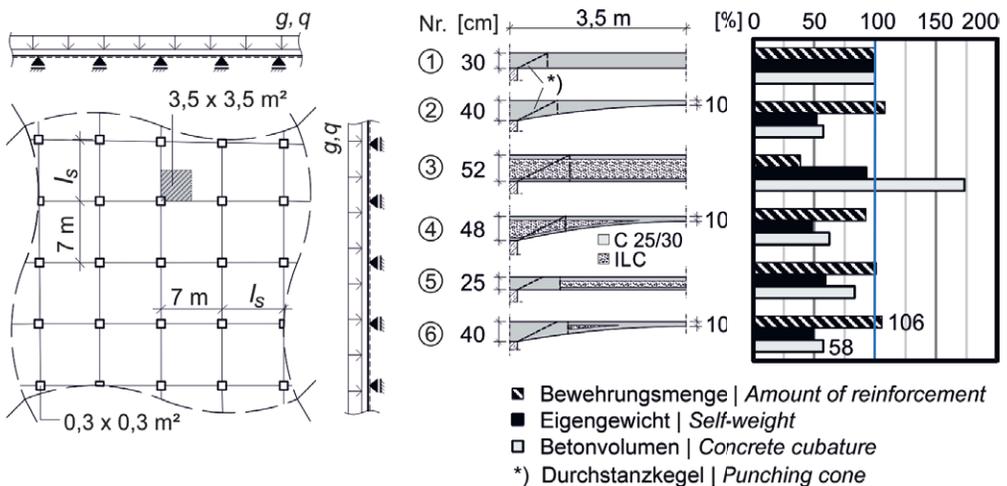


Bild 7: Punktgestützte Durchlaufdecken; links: statisches System, rechts: Massen-/Mengenvergleich verschiedener Deckenausbildungen | Fig. 7: Structural system of a point supported multi-span slab (left) and mass/quantity comparison of different ceiling designs (right)

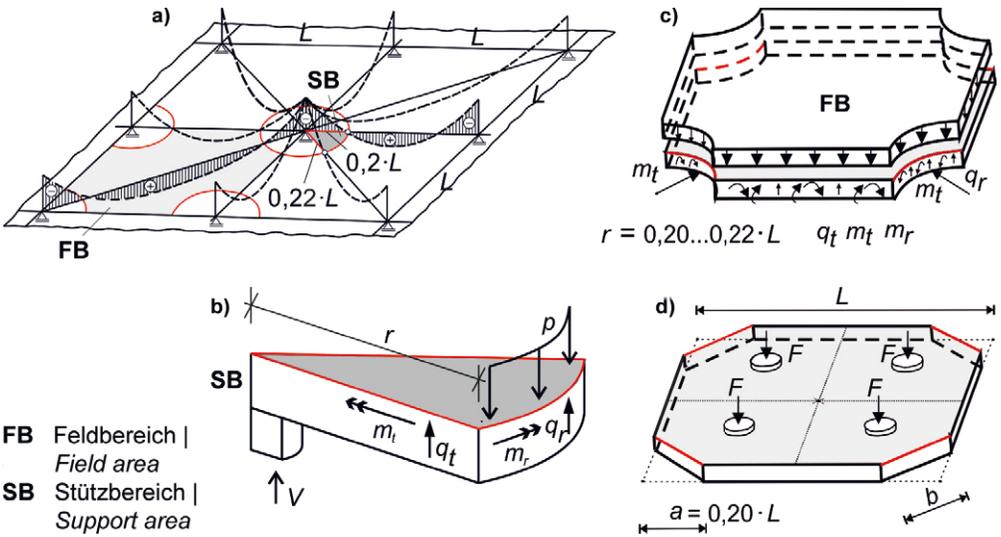


Bild 8: Punktgestützte Platten; a) Radialmomentenverlauf, b) Ausschnitt Stützbereich, c) Ausschnitt Feldbereich, d) vereinfachter Feldbereich | **Fig. 8:** Point supported slabs; a) radial moment distribution, b) cut-out support area, c) cut-out mid area, d) simplified mid area

3.1.2 Analytische und numerische Betrachtung – Feldbereich

Auf zweiachsig gespannte Decken wirken radial und tangential zur Stütze Querkräfte und Biegemomente (q_t , m_t , q_r , m_r). Bild 8 a) zeigt den typischen Verlauf der Radialmomente zwischen zwei Stützen unter einer flächigen Last [9]. Im Feldbereich sind diese positiv, im Stützbereich negativ. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode und dem Programm RFEM der Dlubal Software GmbH ermitteln Frenzel und Curbach [10] die auftretenden Beanspruchungen. Dabei zeigte sich, dass der im Bild 8 c) dargestellte Feldbereich unter Flächenlast gut durch einen achteckigen Ausschnitt mit vier Einzellasten (Bild 8 d)) approximiert werden kann, der zur experimentellen Untersuchung geeignet ist. Zur Berechnung der Widerstände für die verschiedenen Beanspruchungen wurde auf die Formelapparate des EC 2 [4] zurückgegriffen.

3.1.3 Analytische und numerische Betrachtung – Stützbereich

Im Stützbereich ist eine kombinierte Beanspruchung aus – im Vergleich zum Feldbereich – großen Momenten und Querkräften für die

3.1.2 Analytical and numerical analysis – mid-span area

Shear forces and bending moments (q_t , m_t , q_r , m_r) act radially and tangentially to the column on two-way multi-span flat slabs. Fig. 8 a) shows the typical course of the radial moments between two supports under a uniform area load [9]. They are positive in the mid-span and negative in the support region. Using the finite element method and the RFEM program from Dlubal Software GmbH, Frenzel and Curbach [10] determined the acting forces and stresses. They showed that the mid-span region under surface load shown in Fig. 8 c) can be well approximated by an octagonal section with four concentrated loads (Fig. 8 d)), which is suitable for experimental investigation. To calculate the resistances for the different loads, the formula apparatus of EC 2 [4] was used.

3.1.3 Analytical and numerical analysis – support area

In the support area, a combined stress situation resulting from – compared to the field area – large moments and shear forces is decisive for the load-bearing capacity, which usually

Tragfähigkeit ausschlaggebend, die meist zum Durchstanzen des Stützbereiches punktgestützter Platten führt. Zur Untersuchung des Traglastpotentials war gemäß den Ergebnissen von Frenzel et al. [8] dieser Versagensfall nähergehend zu betrachten. Dazu wurde ein Mindestmaß an Biegetragfähigkeit durch eine vorhandene Längsbewehrung vorausgesetzt.

Zur analytischen Bestimmung der Durchstantragfähigkeit von punktgestützten, ebenen Stahlbetonplatten ohne Durchstanzbewehrung kam die von Muttoni [11], [12] entwickelte *Critical Shear Crack Theory* (CSCT) zur Anwendung. Die Durchstantraglast, also die Ausbildung des kritischen Schubrisses, bestimmt sich aus dem Schnittpunkt des von Muttoni entwickelten Bruchkriteriums mit einer Last-Rotations-Beziehung, die sich entweder aus einer analytisch oder einer numerisch ermittelten Momenten-Krümmungs-Beziehung bzw. Last-Rotations-Kurve ergibt. Diese sowie die Modellfindung für die numerischen Untersuchungen des Durchstantragverhaltens sind in Farwig/Curbach [13] näher beschrieben. Ergänzend wurde auch die Durchstantraglast nach EC 2 [4] ermittelt. Die numerische Berechnung erfolgte mit dem Programm ANSYS® WB 17.1 der Ansys Inc. an einem rotationsymmetrischen Plattenausschnitt, s. Bild 8 b). Über die Materialmodellensammlung multiPlas der Fa. Dynardo GmbH [14] wurde für Beton das Materialgesetz nach Menétrey-Willam [15] in ANSYS® eingelesen.

Um das Optimierungspotenzial hinsichtlich des Traglast-Masse-Verhältnisses von punktgestützten Deckentragwerken ohne Durchstanzbewehrung zu ermitteln, führte Farwig [16] eine Studie durch. Dabei wurden insgesamt sechs Varianten (a-f) mit unterschiedlichen Materialanordnungen und Formen hinsichtlich ihrer Durchstantragfähigkeit numerisch untersucht und die Ergebnisse denen eines ebenen Referenzbauteils aus Beton der Klasse C20/25 gegenübergestellt (Bild 9). Die Variation der Form erfolgte unter der Prämisse der Volumengleichheit, so dass ein eindeutiger Vergleich der Traglasten stattfinden konnte. Bild 9 zeigt auch, dass die Traglast gegenüber der Referenzplat-

leads to the punching of the support area of the point-supported ceiling slab. According to the results of Frenzel et al. [8], this failure mode had to be considered in more detail in order to investigate the ultimate load potential. For this purpose, a minimum bending load capacity due to an existing longitudinal reinforcement was assumed.

The *Critical Shear Crack Theory* (CSCT) developed by Muttoni [11], [12] was applied to analytically determine the punching shear capacity of point-supported, flat reinforced concrete slabs without punching shear reinforcement. The punching shear load, i.e., the formation of the critical shear crack, is determined from the intersection of the failure criterion developed by Muttoni with a load-rotation relationship resulting from either an analytically or a numerically determined moment-curvature relationship or load-rotation curve. This as well as the model finding for the numerical investigations of the punching shear bearing behaviour are described in more detail in Farwig and Curbach [13]. In addition, the punching shear load was determined according to EC 2 [4]. The numerical calculation was carried out with the program ANSYS® WB 17.1 from Ansys Inc. on a rotationally symmetrical slab section, see Fig. 8 b). The material law according to Menétrey-Willam [15] was imported into ANSYS® for concrete via the material model collection multiPlas by Dynardo GmbH [14].

In order to determine the optimization potential with regard to the ultimate load-mass ratio of point-supported ceiling structures without punching shear reinforcement, Farwig [16] carried out a study. In this study, a total of six variants (a-f) with different material arrangements and shapes were numerically investigated with respect to their punching shear load capacity. The results were compared with those of a plane reference slab made of concrete of class C20/25 (Fig. 9). The variation of the shape was carried out under the premise of volume equality, so that a clear comparison of the ultimate loads could take place. Fig. 9 also shows that, compared with the reference slab, the ultimate

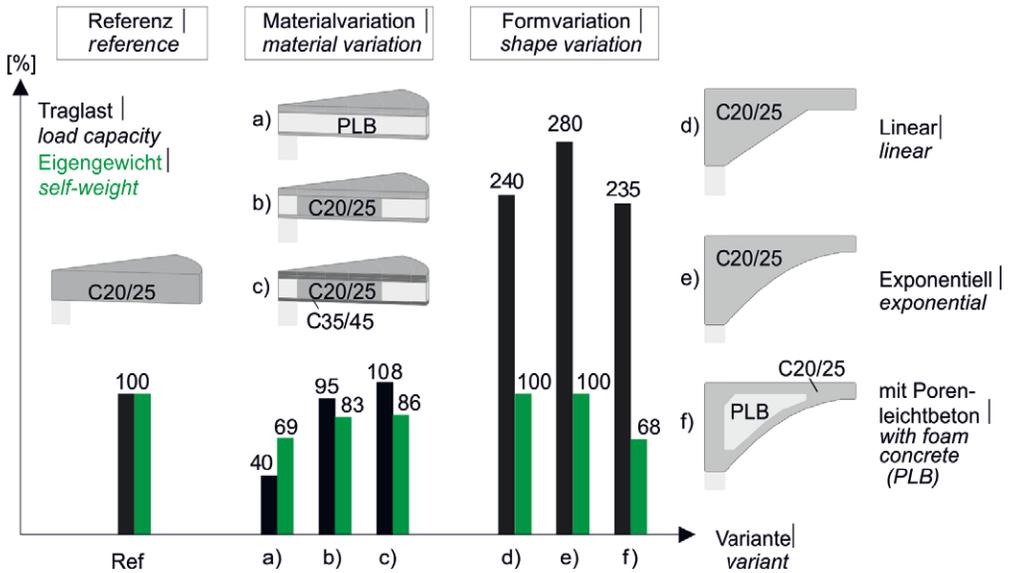


Bild 9: Optimierungspotenzial punktgestützter Deckentragwerke | Fig. 9: Optimization potential of point supported flat slabs

te infolge der Materialvariation auf 108 % (mit 14 % Gewichtsminimierung) und infolge der Formvariation bis auf 280 % (bei identischen Massen) gesteigert werden konnte.

load could be increased to 108% as a result of the material variation (with 14% weight reduction) and up to 280% as a result of the shape variation (with identical masses).

3.2 Experimentelle Untersuchungen

3.2 Experimental investigations

3.2.1 Feldbereich

3.2.1 Mid-span area

Die zuvor ermittelte, theoretisch mögliche Gewichtersparnis bzw. Effizienzsteigerung sollte durch experimentelle Untersuchungen an vier verschiedenen, $2 \times 2 \times 0,1 \text{ m}^3$ großen Plattenkonfigurationen und damit etwa im Maßstab $1 : 2,5$ zu herkömmlichen Deckengrößen verifiziert werden. Serie S-A stellt dabei die Referenzplatte dar, die aus Normalbeton der Festigkeitsklasse C20/25 bestand. Als Bewehrung kam bei allen Platten kreuzweise und zum Rand parallel verlegter Baustahl B500 mit einem Durchmesser von 6 mm und einer Querschnittsfläche von $2,26 \text{ cm}^2/\text{m}$ (Bewehrungsgrad $\rho_s = 0,26 \%$) auf der zugbeanspruchten Plattenunterseite (Betondeckung: 10 mm) zum Einsatz. Die Platten der Serie S-B und S-C bestanden aus zwei bzw. drei Schichten in der Kombination Normalbeton C20/25-Porenleichtbeton (PLB). Dieser wies

The previously determined, theoretically possible weight saving or efficiency increase was to be verified by experimental investigations on four different slab configurations measuring $2 \times 2 \times 0.1 \text{ m}^3$ and thus approximately on a scale of $1 : 2.5$ to conventional slab sizes. Series S-A represents the reference slab, which consisted of regular concrete of strength class C20/25. Steel reinforcement, type B500, with a diameter of 6 mm and a cross-sectional area of $2.26 \text{ cm}^2/\text{m}$ (reinforcement ratio $\rho_s = 0.26\%$) was used on the tensile stressed underside of the slab (concrete cover: 10 mm) for all slabs. The slabs of series S-B and S-C consisted of two and three layers, respectively, in the combination of regular weight concrete C20/25 porous light-weight concrete (PLB). This had a dry bulk density ρ_{cr} of $900 \text{ kg}/\text{m}^3$ and a compressive strength

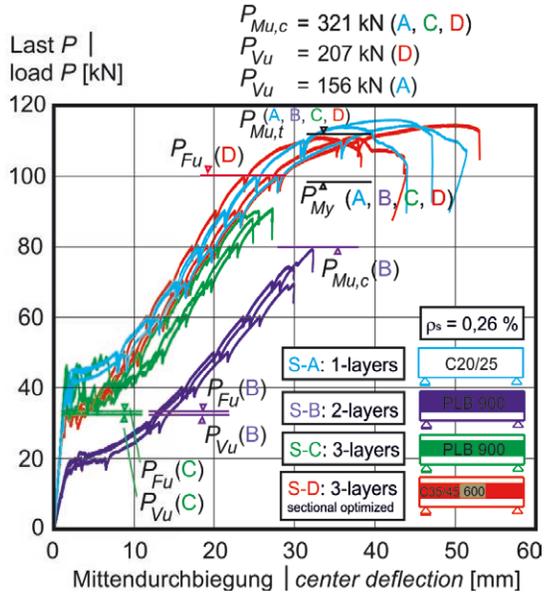
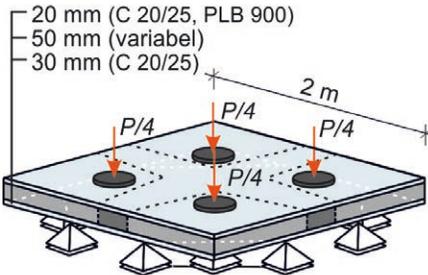


Bild 10: Experimentelle Untersuchung punktgestützter Platten; links oben: Herstellung Kernschicht (hier: Platte S-D), links unten: Belastungssituation, rechts: gemessene Last-Mittendurchbiegungs-Kurven sowie rechnerische Bruchlasten | Fig. 10: Experimental investigation of point-supported plates; top left: casting core layer (here: slab S-D), left bottom: loading of the specimen, right: measured load-center deflection relations and calculated failure loads

eine Trockenrohdichte ρ_{tr} von 900 kg/m^3 und eine Druckfestigkeit f_{cm} von $8,5 \text{ N/mm}^2$ auf. Für die Platte der Serie S-D wurde zudem weiter querschnittsweise optimiert, d. h. in stark beanspruchten Bereichen ein Normalbeton der Klasse C35/45 und in gering belasteten Bereichen ein sehr gering tragfähiger Porenleichtbeton ($f_{cm} = 2,7 \text{ N/mm}^2$) der Dichte $\rho_{tr} = 600 \text{ kg/m}^3$ als Kernschicht sternförmig gemäß Bild 10, oben links, eingebaut. Da jede Serie aus drei identischen Platten bestand, erfolgten insgesamt zwölf Prüfungen.

Bild 10, rechts, zeigt für jede Serie die gemessenen Last-Mittendurchbiegungs-Beziehungen, die rechnerisch ermittelten Bruchlasten für Schubversagen (P_{Vu}), Fugenversagen (P_{Fu}), Biegezugversagen ($P_{Mu,t}$), Biegedruckversagen ($P_{Mu,c}$) und das Lastniveau P_{My} , bei dem das Fließen der Bewehrung einsetzt. Die Referenzplatten versagten infolge Biegezug unter Ausbildung von Schubrisen auf einem Niveau von ca. 112 kN . Davor setzte das Fließen der Bewehrung bei ca. 100 kN ein. Werden die Kern- bzw. obere Deckschicht durch Porenleichtbeton ersetzt

f_{cm} of 8.5 N/mm^2 . For the S-D series slab, further cross-sectional optimization was also carried out, i.e. a concrete of class C35/45 was used in heavily loaded areas and a very low load-bearing porous lightweight concrete ($f_{cm} = 2.7 \text{ N/mm}^2$) of density $\rho_{tr} = 600 \text{ kg/m}^3$ was installed as a core layer in a star-like shape as shown in Fig. 10, top left. Since each series consisted of three identical slabs, a total of twelve tests were carried out.

Fig. 10, right, shows for each series the measured load-deflection relationships, the calculated failure loads for shear failure (P_{Vu}), interface failure (P_{Fu}), bending tensile failure ($P_{Mu,t}$), bending compression failure ($P_{Mu,c}$) and the load level P_{My} at which yielding of the reinforcement starts. The reference slabs failed due to tensile bending with the formation of shear cracks at a level of about 112 kN . Before that, reinforcement yielding started at a level of about 100 kN . If the core or upper surface layer is replaced by porous lightweight concrete (series B, C), shear failure occurred at a lower load level between 70 and 90 kN and thus without yielding of the

(Serien B, C), so stellte sich ein Schubversagen auf niedrigerem Lastniveau zwischen 70 und 90 kN und damit ohne Fließen des Baustahls ein. Das Bruchlastniveau der Referenzplatten konnte mit der Serie D und damit unter Biegezugversagen wieder erreicht werden. Aufgrund des festeren Betons C35/45 traten in den stark beanspruchten Bereichen kaum Schubrisse vor dem Plattenbruch auf.

3.2.2 Stützbereich

Die in Abschnitt 3.1.3 dargelegten Ansätze und Ergebnisse sind durch die Experimente überprüft worden. Dabei wurden die analytischen Methoden zur Bestimmung der Biege- sowie Durchstantraglast von rotationssymmetrischen Plattenausschnitten ohne Durchstanzbewehrung dazu verwendet, die erzeugten numerischen und experimentellen Ergebnisse anhand der Referenzgeometrie einzuordnen. Je nach erreichter Traglast konnte so abgeschätzt werden, welches Versagen im Bauteil eingetreten ist.

Der in Bild 8 b) aufgeführte Ausschnitt einer Ersatzkreisplatte ($r = 1,0\text{ m}$) bildete die Grundlage für die durchgeführten Versuche. Dabei wurde die Belastung über den durch einen massiven Stahlzylinder verkörperten Stützenstumpf ($d = 25\text{ cm}$) von oben in die Platte eingetragen. Die unterseitige Auflagerung der Platte erfolgte über 16 entsprechend des Plattenumfangs angeordnete, gelenkig ausgebildete Stützpunkte unter Berücksichtigung eines 10 cm breiten, überstehenden Plattenrandes (Bild 11).

structural steel. The failure load level of the reference slabs could be reached again with series D and thus under flexural tensile failure. Due to the stronger C35/45 concrete, hardly any shear cracking occurred in the heavily loaded areas before slab failure.

3.2.2 Support area

The approaches and results presented in Section 3.1.3 have been verified by experimental tests. The analytical methods for determining the bending and punching loads of rotationally symmetrical slab sections without punching shear reinforcement were used to classify the numerical and experimental results generated on the basis of the reference geometry. Depending on the ultimate load achieved, it was thus possible to estimate which failure had occurred in the component.

The section of an equivalent circular slab ($r = 1.0\text{ m}$) shown in Fig. 8 b) formed the basis for the tests carried out. The load was applied to the slab from above via the column stub ($d = 25\text{ cm}$) embodied by a solid steel cylinder. The underside of the slab was supported by 16 articulated support points arranged according to the slab circumference, taking into account a 10 cm wide projecting slab edge (Fig. 11).

The test setup shown, consisting of three steel girder levels, has already been successfully used for punching shear tests at the Ruhr University Bochum, e.g. by Bocklenberg et al. [17],

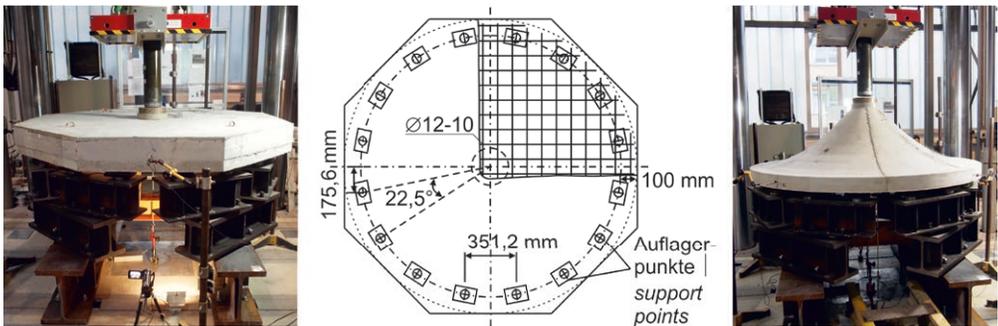


Bild 11: Versuchsaufbau für Durchstanzversuche | Fig. 11: Test setup for punching shear tests

Der dargestellte Versuchsaufbau, bestehend aus drei Stahlträger-Ebenen, wurde bereits erfolgreich für Durchstanzversuche an der Ruhr-Universität Bochum, z. B. von Bocklenberg et al. [17], eingesetzt und der TU Dresden zur Prüfung von insgesamt 3 Serien à 3 Platten zur Verfügung gestellt. Zwei Serien (Referenzplatte und Var. c, s. Bild 9, Dicke: 20 cm) konnten in achteckiger Form hergestellt werden, um den Schalungsaufwand möglichst gering zu halten. Für die drei gevouteten Platten (Var. e, Bild 9, Dicke: 10–58 cm) ließen wir eine Sonderschalung aus hochfestem Polystyrol vom Institut für Tragwerksentwurf der TU Braunschweig anfertigen. Als Bewehrung kam für alle Platten kreuzweise verlegter Baustahl B500 ($\varnothing = 12$ mm, Abstand 10 cm) zum Einsatz. Zudem wurden begleitend zu jeder Betonage Routineprüfkörper zur Ermittlung der Betondruck- und -zugfestigkeit und des E-Moduls hergestellt. Die Kennwerte dienten als Eingabewerte für die numerischen Berechnungen.

Im Versuch zeigte sich bei den Referenzplatten und den geschichteten Platten auf der Zugseite des Plattenausschnitts das für ein Durchstanzversagen typische, sternförmige Rissbild. Zunächst traten radiale Biegerisse und zum Zeitpunkt des Versagens der kritische Schubriss auf. In nachträglich durchgeführten Sägeschnitten war dieser unter einem stark variierenden Winkel von 46° bis 58° zu erkennen [13]. Die gevouteten Platten wiesen ein stärker ausgeprägtes und am Bewehrungsnetz orientiertes, orthogonales Rissbild sowie ein sprödes Versagen am Plattenrand auf. Der mehraxial beanspruchte Druckring konnte durch die veränderte Form entsprechend des Verlaufs der Druckstreben entlastet werden.

3.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

3.3.1 Feldbereich

Die experimentellen Untersuchungen des Feldbereiches einschließlich der Berechnung der Bruchlasten (Bild 10, rechts) haben gezeigt, dass:

and was made available to the TU Dresden for testing a total of 3 series of 3 slabs each. Two series (reference slab and Var. c, see Fig. 9, thickness: 20 cm) could be manufactured in an octagonal shape to keep the formwork effort as low as possible. For the three haunched slabs (Var. e, Fig. 9, thickness: 10–58 cm) we used a special formwork made of high-strength polystyrene produced by the Institute for Structural Design of the Technical University of Braunschweig. Cross-laid B500 steel bars ($\varnothing = 12$ mm, spacing 10 cm) were used as reinforcement for all slabs. In addition, routine test specimens for determining the concrete compressive and tensile strength and the modulus of elasticity were produced to accompany each concreting operation. The determined values served as input data for the numerical calculations.

In the test, the reference and the layered slabs showed the star-shaped crack pattern typical of punching shear failure on the tensile side of the slab cutout. Initially, radial bending cracks occurred and, at the time of failure, the critical shear crack. In subsequently performed saw cuts, this was visible at a strongly varying angle of 46° to 58° [13]. The haunched slabs exhibited a more pronounced orthogonal cracking pattern oriented to the reinforcement mesh and brittle failure at the plate edge. The multi-axially stressed compression ring could be relieved by the modified shape according to the course of the compression struts.

3.3 Results and conclusions

3.3.1 Mid-span area

The experimental investigations of the mid-span area including the calculation of the failure loads (Fig. 10, right) have shown that:

- the calculation approaches for determining the shear force failure are very conservative; finally, the experimental failure loads of the S-B (approx. 75 kN) and S-C (approx. 90 kN) series are significantly higher than the calculated failure loads (35 kN),

- die Rechenansätze zur Bestimmung des Schub- bzw. Querkraftversagens sehr konservativ sind; schließlich liegen die experimentellen Bruchlasten der Serien S-B (ca. 75 kN) und S-C (ca. 90 kN) deutlich über den rechnerischen Bruchlasten (35 kN),
- mit den Rechenansätzen zur Bestimmung des Biegezugversagens und des Beginns des Stahlfließens diese auf etwa $\pm 10\%$ genau vorhergesagt werden können (Serien S-A und S-D),
- neben einer vertikalen Schichtung auch eine horizontale Gradierung, wie sie bei der Serie S-D getätigt wurde, sehr zielführend ist, um leichte, effizient tragende (Feldbereiche von) Platten zu generieren. Schließlich konnten bei gleicher Tragfähigkeit 15 % Gewicht gegenüber der Referenzplatte gespart werden. Diese wies jedoch durch den gewählten Beton der Klasse C20/25 in Kombination mit dem Bewehrungsgrad von 0,25 % sowohl unter Biegezug- als auch unter Schubbeanspruchung bereits einen hohen Ausnutzungsgrad und damit vergleichsweise wenig Optimierungspotential auf.
- the bending tensile failure and the onset of steel yielding can be predicted with the calculation equations to an accuracy of about $\pm 10\%$ (S-A and S-D series),
- in addition to vertical layering, horizontal grading, as it was done with the S-D series, is also very effective in generating lightweight, efficiently load-bearing slab (mid-span) areas. Finally, 15% weight could be saved compared to the reference slab while maintaining the same load-bearing capacity. However, due to the selected concrete of class C20/25 in combination with the reinforcement ratio of 0.25%, the reference slab already showed a high degree of utilisation under both bending tensile and shear loads and thus comparatively little potential for optimisation.

Further investigations of the mid-span area should be carried out with numerical calculation methods, as they were carried out for the support area, due to the better representation of the load-bearing behaviour and under variable cross-section heights.

Weitere Untersuchungen zum Feldbereich sollten mit numerischen Berechnungsmethoden, wie sie für den Stützbereich getätigt wurden, aufgrund der besseren Abbildung des Tragverhaltens und unter veränderlichen Querschnittshöhen durchgeführt werden.

3.3.2 Stützbereich

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse zum Stützbereich und daraus gezogene Schlussfolgerungen zusammengefasst.

Bild 12 zeigt die während der Versuche gemessenen Last-Verformungs-Kurven. Für jede Serie wurde aus den drei Bruchlasten (Maximallasten) der Mittelwert gebildet und mit der jeweils numerisch und analytisch ermittelten Traglast sowie den zugehörigen Verformungen verglichen. Augenscheinlich ist, dass die numerisch ermittelte Traglaststeigerung von ca. 180 % durch die Voutung bzw. Formoptimierung der Platten experimentell bestätigt werden konnte, wobei das errechnete Traglastniveau (1.447 kN)

3.3.2 Support area

In the following, the results obtained for the support area and the conclusions drawn from them are summarised.

Fig. 12 shows the load-deformation curves measured during the tests. For each series, the mean value was calculated from the three failure loads (maximum loads) and compared with the numerically and analytically determined ultimate load and the corresponding deformations. It is obvious that the numerically determined increase in the ultimate load of approx. 180% could be confirmed experimentally by the haunch and shape optimisation of the slabs, whereby the calculated ultimate load level (1,447 kN) was 9% above the mean value (1,327 kN) of the achieved test failure loads. Compared with this, the mean value of the ultimate loads of the layered slabs (392 kN) is about 16.5% below the loads achieved in the reference tests (456 kN). In contrast, the numerical calculation determined a 5.5% higher

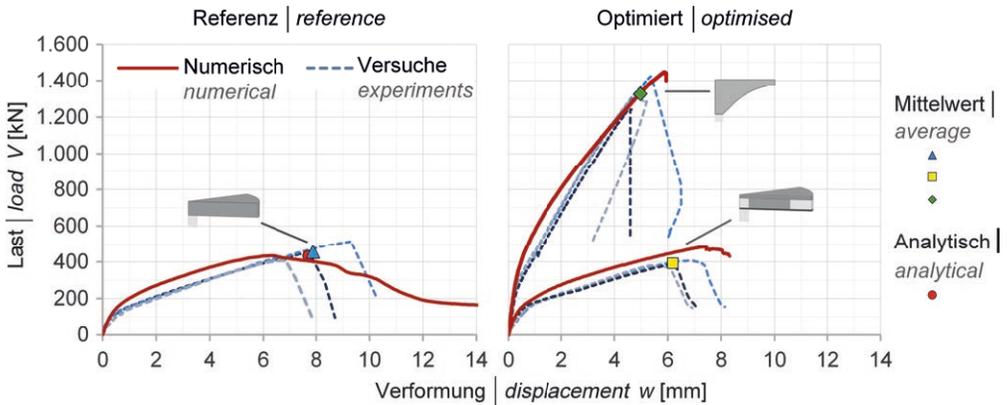


Fig. 12: Durchstanzversuche der Referenzplatten (links) im Vergleich zu den optimierten Platten (rechts) gegenüber den numerischen Kurven und dem analytischen Vergleichswert | **Fig. 12:** Punching shear tests of the reference slabs (left) compared to the optimised slabs (right) in comparison to the numerical curves and the analytical reference value

9 % über dem Mittelwert (1.327 kN) der erreichten Versuchstraglasten lag. Dahingegen liegt der Mittelwert der Traglasten der geschichteten Platten (392 kN) circa 16,5 % unterhalb der erreichten Lasten bei den Referenzversuchen (456 kN). Demgegenüber wurde bei der numerischen Berechnung ein um 5,5 % höherer Durchstanzwiderstand (482 kN) infolge der Materialschichtung ermittelt.

Wie in den Bildern 9 und 12 dargestellt, lässt sich durch die Querschnittsoptimierung, also die partielle Anordnung von Porenleichtbeton, die Traglast nicht steigern, jedoch das Gewicht reduzieren. Mit einer Massensparnis von etwa 14 % ergibt sich bei der in diesem Projekt untersuchten Ausführung ein relatives Traglast-Masse-Verhältnis von 1,25 (Referenz 1,0), das somit 25 % über dem der Referenzplatte liegt und damit eine 25%ige Laststeigerung bei gleicher Masse impliziert.

Eine noch deutlichere Masseinsparung ließe sich erzielen, wenn Querschnitts- und Formoptimierung an einem Bauteil simultan betrachtet werden würden. Theoretische Untersuchungen hierzu sind im Rahmen einer numerischen Studie mit kalibrierten Materialkennwerten in Farwig/Curbach [13] dokumentiert und zeigen, dass mindestens 30 % der Masse im Vergleich zur Referenzplatte eingespart werden kann, während noch ca. 2/3 der Traglast des

punching shear resistance (482 kN) due to the material layering.

As shown in the Figs. 9 and 12, cross-section optimisation, i.e. the partial arrangement of porous lightweight concrete, does not increase the load-bearing capacity, but it does reduce the weight. With a mass saving of about 14%, the design of the slab structure investigated in this project results in a relative load-mass ratio of 1.25 (reference 1.0), which is thus 25% higher than that of the reference slab and thus implies a 25% increase in load for the same mass.

An even more significant mass saving could be achieved if cross-section and shape optimisation were considered simultaneously on one component. Theoretical investigations on this are documented in a numerical study with calibrated material parameters in Farwig and Curbach [13] and show that at least 30% of the mass can be saved compared to the reference slab, while still achieving approx. 2/3 of the ultimate load of the purely shape-optimised slab-column connection.

This corresponds to a relative load-mass ratio of 3.47 (reference 1.0), which could thus be increased by another 6% compared to the load-mass ratio of the purely shape-optimised variant of 3.27. An experimental verification of this variant was no longer carried out within

rein formoptimierten Decken-Stützen-Anschlusses erreicht wird. Dies entspricht einem bezogenen Traglast-Masse-Verhältnis von 3,47 (Referenz 1,0), das sich somit im Vergleich zu dem Traglast-Masse-Verhältnis der rein formoptimierten Variante von 3,27 noch einmal um 6 % steigern lassen würde. Eine experimentelle Überprüfung dieser Variante ist im Rahmen des Forschungsprojekts aus Herstellungsgründen nicht mehr durchgeführt worden.

Die geringen Abweichungen (5–9 %) zwischen den experimentell und rechnerisch ermittelten Traglasten zeigen, dass mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode und analytischer Rechenansätze komplexe Tragmechanismen sowohl für monolithische als auch querschnitts- und formoptimierte Deckenstützbereiche aus Stahlbeton abgebildet werden können. Genauere Vorhersagen der Bruchlasten werden kaum möglich sein, da schließlich die Betonfestigkeiten streuen, Ungenauigkeiten beim Herstellungsprozess entstehen und sowohl der Verbund zwischen Bewehrung und Beton, die damit einhergehende Rissbildung als auch der Verbund zwischen den verschiedenen Betonschichten nur bedingt genau erfasst werden können.

4 Demonstrator

In Zusammenarbeit mit dem weiteren SPP-Projekt an unserem Institut „*Querschnittsadaption für stabförmige Druckbauteile*“ (s. S. 118 ff.) erfolgte zum Abschluss der zweiten Projektphase der Bau eines Demonstrators, s. S. 686 ff.

5 Zusammenfassung

In der ersten Förderphase lag der Fokus auf der Optimierung von einachsigen gespannten Deckenplatten. Bereits bei Einfeldträgersystemen lassen sich durch einen dreischichtigen Querschnittsaufbau mit Normalbeton in den Deckschichten und Leichtbeton im Kern Eigengewicht und Ressourcen sparen. Die Effizienz kann durch eine veränderliche Querschnittshöhe gesteigert werden, so dass die Versagensart

the scope of the research project for manufacturing reasons.

The small deviations (5–9%) between the experimentally and computationally determined failure loads show that complex load-bearing mechanisms for both monolithic and cross-section- and shape-optimised slab support areas made of reinforced concrete can be mapped with the help of the finite element method and analytical calculation approaches. More precise predictions of the failure loads will hardly be possible, since, after all, the concrete strengths are scattered, inaccuracies arise in the manufacturing process and both the bond between reinforcement and concrete, the associated cracking and the bond between the different concrete layers can only be recorded with limited accuracy.

4 Demonstrator

In cooperation with the second SPP project at our institute „*Cross sectional adaption for rod-shaped elements in compression*“ (s. page 118 and following) a demonstrator was realized at the end of the second project phase, see page 686 et seq.

5 Summary

In the first funding phase, the focus was on optimising one way ceiling slabs. Even with single-span systems, dead weight and resources can be saved by a three-layer cross-sectional design with regular concrete in the face layers and lightweight concrete in the core area. Efficiency can be increased by varying the cross-section height so that the mode and location of failure – in a positive sense – can no longer be predicted.

In the 2nd phase, two way spanned, point-supported slabs with a three-layer cross-sectional structure and different shapes in the support area were investigated. Especially the shaping in the support area leads to a high increase

und der Versagensort – im positiven Sinne – nicht mehr vorhergesagt werden können.

In der zweiten Phase wurden zweiachsig gespannte, punktgestützte Decken mit dreischichtigem Querschnittsaufbau und verschiedenen Formen im Stützbereich untersucht. Besonders die Formgestaltung im Stützbereich führt zu einer hohen Traglast- und damit Effizienzsteigerung. Leichte und gering tragfähige Betone sind vor allem für den Feldbereich bzw. in Bereichen mit geringer Schubbeanspruchung geeignet.

Die Versuchsnachrechnungen in beiden Phasen haben gezeigt, dass das Tragverhalten leichter Deckentragwerke vor allem mit Hilfe von Finite-Elemente-Modellen sehr gut beschrieben werden kann. Diese eignen sich potentiell auch für automatisierte Querschnitts- und Formfindungsprozesse, die in künftigen Forschungsprojekten (weiter-)entwickelt werden sollten. Um die optimierten Bauteile in Zukunft fertigen zu können, benötigt es zudem geeignete, wirtschaftlich umsetzbare Herstellungsverfahren sowohl für den Schalungsbau als auch für die dreidimensionale Betongradierung.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198117966 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

in load-bearing capacity and thus efficiency. Lightweight and low load-bearing concretes are particularly suitable for the mid-span area or in areas with low shear loads.

The test recalculations in both phases have shown that the load-bearing behaviour of lightweight ceiling structures can be described very well, especially with the help of finite element models. These are also potentially suitable for automated cross-section and form-finding processes, which should be (further) developed in ongoing research projects. In order to be able to manufacture the optimised components in the future, it also requires suitable, economically feasible manufacturing processes for both formwork construction and three-dimensional concrete grading.

Acknowledgement

The authors thank the German Research Foundation (DFG) for funding project no. 198117966 within the priority program SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Frenzel, M.; Curbach, M.: Deckentragwerke aus geschichteten Betonen – leicht und effizient. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 70–81
- [2] Frenzel, M.: Numerical simulation of single-span lightweight concrete sandwich slabs. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 309–315
- [3] Frenzel, M.; Kahnt, A.: Ökobilanzielle Betrachtung von leichten Sandwichelementen aus Beton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07./08.11.2013 in Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 23–28
- [4] DIN EN 1992-1-1:2010-12: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [5] PE International GmbH (Hrsg.): GaBi Software Systems and Life Cycle Databases for Engineering. LBP und PE, Stuttgart und Leinefelde Echerdingen, 2011
- [6] Frenzel, M.; Curbach M.: Shear strength of concrete interfaces with infra-lightweight and foam concrete. *Structural Concrete* 19 (2018) 1, S. 269–283
- [7] Frenzel, M.; Curbach, M.: Tragverhalten von geschichteten Deckenelementen aus Normal- und Porenleichtbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 12, S. 828–838
- [8] Frenzel, M.; Eger, T.; Curbach, M.: Numerical investigation of two-way layered lightweight concrete slabs. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-521562, publ. auf USB stick, 12 S.
- [9] Staller, M.: Analytische und numerische Untersuchungen des Durchstanzverhaltens punktgestützter Stahlbetonplatten. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb, Heft Nr. 515, Berlin: Beuth, 2001
- [10] Frenzel, M.; Curbach, M.: Load-bearing behavior and efficiency of layered two-way slabs. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture. engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9868, Book of Abstracts: S. 153, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.
- [11] Muttoni, A.: Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs with Tranverse Reinforcement. *ACI Structural Journal* 105 (2008) 4, S. 440–450
- [12] Muttoni, A.: Schubfestigkeit und Durchstanzen von Platten ohne Querkraftbewehrung. *Beton- und Stahlbetonbau* 98 (2003) 2, S. 74–84
- [13] Farwig, K.; Curbach, M.: Durchstanzen von punktgestützten Deckenplatten – Optimierungspotenzial bei ebenen Flachdecken nach dem Ansatz form follows force. *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019) 5, S. 286–295 – DOI: 10.1002/best.201800110
- [14] Dynardo (Hrsg.): Elastoplastic Material Models for ANSYS – General Multisurface Plasticity. Dynardo GmbH, Mai 2016
- [15] Menetrey, P.: Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures. Diss., École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1994
- [16] Farwig, K.: Querschnitts- und Formoptimierung des Auflagerbereiches punktgestützter Betondecken ohne Durchstanzbewehrung. Diplomarbeit, Institut für Massivbau der TU Dresden, 2017
- [17] Bocklenberg, L.; Winkler, K.; Mark, P.: Durchstanzexperimente an Plattenvierteln – Optimierung der Symmetrielage und Verifikation gegenüber Vollplatten. *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017) 3, S. 167–177

Bildnachweise | Picture credits

- Die Bilder 1–7, 8 (oben links und rechts) sowie 9 wurden von Michael Frenzel, die Bilder 8 (links unten), 9, 11, 12 von Kristina Farwig erstellt. Sie wurden wie folgt bereits in modifizierter Form publiziert: Bilder 1, 2 aus [3], 3 aus [1], 4 basierend auf [7], 5 aus [7], 7 in Anlehnung an [8], 8 in Anlehnung an [9], [10], [16], 10 auf Basis von [10], 11 modifiziert nach [13].
- Pictures 1–7, 8 (top left and right) and 9 were made by Michael Frenzel, pictures 8 (bottom left), 9, 11, 12 by Kristina Farwig. They have already been published in modified form as follows: images 1, 2 from [3], 3 from [1], 4 based on [7], 5 from [7], 7 based on [8], 8 based on [9], [10], [16], 10 based on [10], 11 modified after [13].

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Leichte Deckentragwerke aus geschichteten Hochleistungsbetonen

Lightweight ceiling structures made of layered high-performance concrete

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach Institutsdirektor und Direktor des Otto-Mohr-Laboratoriums Institute's director and director of the Otto Mohr Laboratory
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	CU 37/16-1/2 (Projektnummer Project number: 198117966)
Adresse Address:	TU Dresden, Institut für Massivbau, 01062 Dresden
Kontakt Contact:	+49 351 463 37660 Manfred.Curbach@tu-dresden.de https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Förderphase I Funding period I: 01.10.2011–30.09.2014 Förderphase II Funding period II: 01.11.2014–30.09.2018 (inklusive kosten- neutraler Verlängerung inclusive cost-neutral extension)
Team Team:	Michael Frenzel (10/2011–12/2017) Kristina Farwig (05/2017–Projektende End of project)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Frenzel, M.: Numerical simulation of single-span lightweight concrete sandwich slabs. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 309–315
- Frenzel, M.; Kahnt, A.: Ökobilanzielle Betrachtung von leichten Sandwichelementen aus Beton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07./08.11.2013 in Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 23–28
- Frenzel, M.; Curbach, M.: Deckentragwerke aus geschichteten Betonen – leicht und effizient. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 70–81
- Frenzel, M.; Eger, T.; Curbach, M.: Numerical investigation of two-way layered lightweight concrete slabs. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-521562, publ. auf USB stick, 12 S.
- Frenzel, M.; Curbach, M.: Tragverhalten von geschichteten Deckenelementen aus Normal- und Porenleichtbeton. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 828–838
- Frenzel, M.; Curbach, M.: Load-bearing behavior and efficiency of layered two-way slabs. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9868, , Book of Abstracts: S. 153, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.
- Frenzel, M.; Curbach M.: Shear strength of concrete interfaces with infra-lightweight and foam concrete. Structural Concrete 19 (2018) 1, S. 269–283
- Frenzel, M.: Decken aus geschichteten Betonen - leicht und effizient. In: Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E. V. (Hrsg.): Vorträge zum Deutschen Bautechnik-Tag am 07./08.03.2019 in Stuttgart, DBV-Heft 45, 2019, S. 29–30 – DOI: 10.5445/KSP/1000028287
- Farwig, K.; Curbach, M.: Durchstanzen von punktgestützten Deckenplatten – Optimierungspotenzial bei ebenen Flachdecken nach dem Ansatz form follows force. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019) 5, S. 286–295 – DOI: 10.1002/best.201800110

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Frenzel, M.: Zum Tragverhalten von leichten, geschichteten und gevouteten Betondecken. 2021

Studienarbeiten | Student's research projects

- Mavromatis, A.: Numerical Analysis of reinforced concrete sandwich elements and columns with changing cross-section. Project Work, 2012
- Dhungana, P. T.: Numerical analysis of reinforced concrete sandwich elements with foamed concrete core. Master's Thesis, 2013
- Rödel, S.: Untersuchung von geschichteten Stahlbetonplatten mit Schaumbetonkern. Projektarbeit, 2014
- Schuler, R.: Entwicklung eines numerischen Modells zur Analyse des Tragverhaltens geschichteter Stahlbetonelemente mit veränderlicher Querschnittshöhe. Projektarbeit, 2014
- Weinert, D.: Untersuchung des Tragverhaltens von Schubfugen zwischen Normal- und Leichtbetonen. Diplomarbeit, 2014
- Eger, T.: Untersuchung von leichten Deckentragwerken aus Beton. Projektarbeit, 2015
- Bai, H.: Untersuchung von leichten geschichteten Stahlbetonplatten. Projektarbeit, 2015
- Richter, S.: Numerische Formoptimierung geschichteter Stahlbetonelemente. Projektarbeit, 2015
- Farwig, K.: Querschnitts- und Formoptimierung des Auflagerbereiches punktgestützter Betondecken ohne Durchstanzbewehrung. Diplomarbeit, 2017
- Bai, H.: Untersuchung von leichten, effizient tragenden Betonfertigteildecken. Diplomarbeit, 2017
- Zavadski, V.: Design and calculation of a shape-optimizied bicycle shelter. Master's Thesis, 2017
- Bina, F.: Bearing capacity of layered concrete beams. Master's Thesis, 2019

Folgeprojekt | Follow-up project

- SFB/Transregio 280: Konstruktionsstrategien für materialminimierte Carbonbetonstrukturen – Grundlagen für eine neue Art zu bauen | CRC/Transregio 280: Design strategies for material-minimised carbon reinforced concrete structures – principles of a new approach to construction

Sprecher Speaker:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 280
Förderzeitraum Funding period:	seit since: 01.07.2020
Partner Partners:	25 Forschende der TU Dresden, der RWTH Aachen University und des ipf Dresden e.V. 25 researchers of TU Dresden, RWTH Aachen University and ipf Dresden e.V.

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- 2012: Teilnahme am SPP-internen Hornbach-Wettbewerb | Participation on the SPP 1542 Hornbach Competition
- 2019, Michael Frenzel: Innovationspreis Bautechnik, verliehen vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein. E. V. (DBV) am 08.03.2019 zum Thema „Deckentragwerke aus geschichteten Betonen – leicht und effizient“ | Innovation Award for Construction Technology, awarded by the Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein. E. V. (DBV) on 08.03.2019 on the topic "Slab structures made of layered concretes – light and efficient".
- 2019–2021: Realisierung eines Demonstrators, ausgestellt im Deutschen Museum München | Realisation of a demonstrator for long-term use in the Deutsches Museum in Munich

Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisions-Schalungen aus 100 % recycelbaren Industrie-Wachsen zur Herstellung von geometrisch komplexen Beton-Bauteilen | Non-Waste-Wax-Formwork: Novel precise formwork-technology on basis of 100% recyclable industrial wax for the fabrication of geometrically complex concrete elements

- ▶ Sarah Baron¹, Jeldrik Mainka², Hans Werner Hoffmeister¹, Klaus Dröder¹, Harald Kloft²
- ▶ ¹ Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), TU Braunschweig
- ▶ ² Institut für Tragwerksentwurf (ITE), TU Braunschweig

1 Einleitung

Die neuen 3D-Entwurfs-, Berechnungs- und Fertigungsverfahren in Kombination mit dem Werkstoff ultrahochfester Beton (UHPC) bieten das Potenzial, den Beton-Leichtbau zu revolutionieren [1]. Die Herausforderung bei der Herstellung von geometrisch komplexen und hochpräzisen UHPC-Bauteilen liegt dabei im Schalungsbau. Da bisher keine verfügbaren abfallfreien und somit nachhaltigen alternativen Schalungsmaterialien bzw. -systeme identifiziert werden konnten, wurde der Forschungsansatz entwickelt, frei geformte Schalungen für Betonbauteile unter Verwendung von CNC-gefrästen recycelbaren Industriegewachsen zu verwenden. Die Erforschung dieses Ansatzes hin zu einer anwendbaren *Non-Waste*-Schalungstechnologie wurde in einem gemeinsamen Forschungsprojekt des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) und des Instituts für Tragwerksentwurf (ITE) der TU Braunschweig durchgeführt.

Im Folgenden werden die wesentlichen Inhalte des Vorhabens, ausgehend von der Auswahl

1 Introduction

The new 3D design, calculation and manufacturing methods in combination with ultra-high strength concrete (UHPC) offer the potential to revolutionise lightweight concrete construction [1]. The challenge in the production of geometrically complex and high-precision UHPC components lies in formwork construction. As no available waste-free and thus sustainable alternative formwork materials or systems have been identified so far, the research approach was developed to use freely shaped formwork for concrete components using CNC-milled recyclable industrial waxes. The research of this approach towards an applicable non-waste formwork technology was carried out in a joint research project of the Institute for Machine Tools and Production Engineering (IWF) and the Institute of Structural Design (ITE) of the Technical University of Braunschweig.

In the following, the main contents of the project, starting with the selection of suitable waxes, the investigation of machinability up to

geeigneter Wachse, über die Untersuchung der Zerspanbarkeit bis hin zur Betonierung und anschließenden Analyse der Schalungen und Abgüsse, vorgestellt und diskutiert. Grundlegende Erkenntnisse wurden u. a. bereits 2016 in [2]–[5] veröffentlicht. Diese werden hier teilweise wiedergegeben und zudem mit zusätzlichen Informationen ergänzt. Die wesentlichen Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben werden zusammengefasst. Ausführliche Informationen zur Entwicklung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie finden sich in der 2019 veröffentlichten Dissertation von Jeldrik Mainka [6].

2 Physikalisch-technische Eigenschaften des ausgewählten ConFormWax

Zur Auswahl eines geeigneten Waxes für die Non-Waste-Schalungstechnologie wurden in Vorversuchen am ITE insgesamt 28 verschiedene technische Wachse hinsichtlich ihrer Zerspanbarkeit untersucht. Die Zerspanversuche wurden auf einer dreiachsigen CNC-Fräsmaschine durchgeführt und ergaben eine Einordnung der Wachse in drei Kategorien: spröde, ölig/klebrig und gut zerspanbar. Für die zehn Wachse mit guter Zerspanbarkeit und einem Schmelzpunkt von 60 °C bis 120 °C wurden weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der folgenden physikalisch-technischen Eigenschaften durchgeführt:

- Druck-, Biege- und Zugfestigkeit,
- E-Modul,
- Zeitstandfestigkeit / Kriechen,
- temperaturabhängiges Dehnungsverhalten bzw. Volumenänderung,
- Differenzkalorimetrie (DSC, Messung der aufgenommenen Wärmemenge),
- Dynamisch-mechanische Analyse (DMA, temperaturabhängige Änderung des E-Moduls),
- Wärmeleitfähigkeit.

Als Ergebnis der Voruntersuchungen wurden zwei Wachse mit vergleichbarem Schmelzpunkt ($T_S \approx 60$ °C) für die weiterführenden Untersuchungen zur Zerspanbarkeit von Industriewa-

the concreting and subsequent analysis of the formwork and castings are presented and discussed. Basic findings have already been published in 2016 in [2]–[5]. These are partly reproduced here and supplemented with additional information. The main findings of the research project are summarised. Detailed information on the development of non-waste wax formwork technology can be found in the dissertation by Jeldrik Mainka [6], published in 2019.

2 Physical and technical properties of the selected ConFormWax

Based on these requirements 28 different waxes were chosen and tested in preliminary tests regarding their machinability (millability) using a triaxial CNC-milling machine. By this, the waxes could be classified in three categories: brittle, soft/sticky and excellent milling ability. The following experiments, in parts already published in Mainka et al. [3], were conducted with the 10 waxes with an excellent milling ability and a fusion point between 60 and 120 °C:

- Compressive, bending and tensile strength,
- Elastic modulus,
- Creep rupture strength/creep,
- Temperature-dependent expansion behaviour or volume change,
- Differential calorimetry (DSC, measurement of the amount of heat absorbed),
- Dynamic mechanical analysis (dependency of the elastic modulus on the temperature),
- Thermal conductivity.

As a result of the preliminary investigations, two waxes with comparable melting points ($T_S \approx 60$ °C) were selected for further investigations into the machinability of industrial waxes. The wax ConFormWax (CFW) from Wachs- & Ceresin-Fabriken Th. C. Tromm GmbH, Cologne, was found to be more suitable for use as a formwork material due to its higher elasticity than the wax with the designation PW 3146 from ROMONTA GmbH, Arnsdorf. The physical and technical properties of CFW are explained below.

chen ausgewählt. Das Wachs ConFormWax (CFW) der Firma Wachs- & Ceresin-Fabriken Th. C. Tromm GmbH, Köln, zeigte auf Grund seiner höheren Elastizität gegenüber dem Wachs mit der Bezeichnung PW 3146 der ROMONTA GmbH, Arnsdorf, die insgesamt bessere Eignung als Schalungsmaterial. Im Folgenden werden die physikalisch-technischen Eigenschaften von CFW erläutert.

In Bezug auf den hypothetischen hydrostatischen Frischbetondruck am Fußpunkt einer 10 m hohen Betonsäule von etwa 0,25 N/mm² wird die in den Versuchen ermittelte Druckfestigkeit von CFW für die Anwendung als Schalungsmaterial auch bei hohen Bauteilen bis zu einer Gebrauchstemperatur von 40 °C als ausreichend erachtet. Wie in Bild 1 dargestellt, zeigt CFW unter Druckbeanspruchung ein elasto-plastisches Verhalten. Bei der angenommenen standardmäßigen Gebrauchstemperatur von 20 °C erreicht CFW eine Druckfestigkeit von etwa 2,3 N/mm² bei 1 % Stauchung und einen E-Modul von etwa 2000 N/mm² (E-Module ermittelt zwischen 0,15 N/mm² und 1,05 N/mm²). Obwohl die Festigkeit des Wachses stark von der Temperatur abhängig ist und bei Zunahme der Temperatur über 20 °C, beispielsweise aufgrund von Sonneneinstrahlung oder Hydratationswärme, abnimmt, erreicht CFW bei 40 °C immer noch eine als ausreichend anzusehende Druckfestigkeit von etwa 0,5 N/mm² bei 1 % Stauchung.

Bei dem im Forschungsprojekt verwendeten UHPC (Typ Dyckerhoff Nanodur) ist die Entwicklung der Hydratationswärme quantitativ zwar entsprechend hoch, beginnt aber erst 18 h nach dem Guss mit einem Temperaturpeak nach etwa 26 h. Da UHPC zu diesem Zeitpunkt bereits eine Grünstandfestigkeit (Reduzierung des horizontalen Frischbetondrucks) aufweist, ist ein Erweichen des Wachses aufgrund der Hydratationswärme und somit eine Beeinflussung der Form des Betonbauteils nicht zu erwarten.

Weitere relevante Einflussgrößen sind die thermischen Eigenschaften der Wachse. Insbesondere die temperaturabhängige Volumenänderung (Phasenübergang vom flüssigen zum festen Zu-

With regard to the hypothetical hydrostatic fresh concrete pressure at the base of a 10 m high concrete column of approximately 0.25 N/mm², the compressive strength of CFW determined in the tests is considered sufficient for use as a formwork material, even with high components up to a service temperature of 40 °C. As shown in Fig. 1, CFW shows elasto-plastic behaviour under compressive stress. At the assumed standard service temperature of 20 °C, CFW achieves a compressive strength of about 2.3 N/mm² at 1% compression and a modulus of elasticity of about 2,000 N/mm² (moduli of elasticity determined between 0.15 N/mm² and 1.05 N/mm²). Although the strength of the wax is strongly dependent on temperature and decreases with an increase in temperature above 20 °C, for example due to solar radiation or heat of hydration, CFW still achieves a compressive strength of about 0.5 N/mm² at 1% compression at 40 °C, which can be regarded as sufficient.

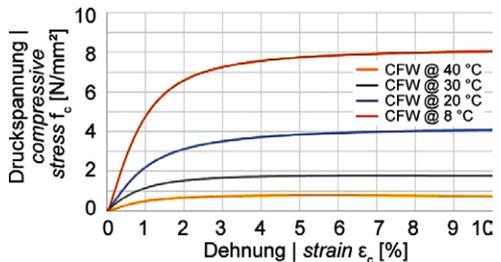


Bild 1: Einachsige Zylinderdruckfestigkeit von CFW-Wachs bei 8, 20, 30 und 40 °C | Fig. 1: Uniaxial cylinder compressive strength of CFW wax at 8, 20, 30 and 40 °C

In the UHPC (type Dyckerhoff Nanodur) used in the research project, the development of the heat of hydration is quantitatively correspondingly high, but does not begin until 18 h after casting with a temperature peak after about 26 h. Since UHPC already exhibits green strength at this point (reduction of the horizontal fresh concrete pressure), a softening of the wax due to the heat of hydration and thus an influence on the shape of the concrete component is not to be expected.

Further relevant influencing factors are the thermal properties of the waxes. In particular,

stand) sollte möglichst gering sein, da sonst während der Abkühlung und Erstarrung des Wachses Verformungen, innere Spannungen oder Risse entstehen. Das Wachs CFW zeigt hier zwischen seinem festen Zustand bei einer Temperatur von 20 °C und dem geschmolzenen Zustand bei etwa 80 °C eine Volumenänderung von rund 12 Vol.-%. Da diese temperaturabhängige Volumenänderung zu hoch ist, um große Wachsböcke in einem Stück zu gießen, hat es sich als zielführend herausgestellt, beim Heißguss bereits erkaltete Wachs-Füllkörper aus CFW in den zu gießenden Wachsböck zu integrieren. Hierzu werden, wie in Bild 2 dargestellt, kalte Wachstafeln in regelmäßigen Abständen in der Form positioniert und mit heißem Wachs zu nahezu beliebig großen Wachsböcken vergossen. Es konnten somit große und homogene Wachsböcke aus CFW gefertigt werden, ohne dass die Vergussflächen eine Schwächung des Materials darstellen.

Damit die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie nicht nur ökologisch sinnvoll, sondern auch aus ökonomischen Gesichtspunkten erfolgreich ist, müssen die Materialkosten des Wachses je Einsatz WAX_{JE} nach Gl. (1) mindestens unter den Einweg-Schalungsmaterialkosten von EPS (40 kg/m³) von etwa 130 €/m³ (brutto) liegen.

$$WAX_{JE} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = \frac{WAX_{inv}}{WAX_{wvr}} + E_{Schm} \quad (1)$$

Die Schmelzenergiekosten E_{Schm} je m³ CFW-Wachs und Aufschmelzvorgang wurden dabei auf Basis der in den dynamischen Differenzkalorimetriemessungen ermittelten Schmelzenergie von 120 J/g zu etwa 13,78 €/m³ (brutto) berechnet. Die Materialkosten WAX_{inv} des CFW-Wachses sind rohstoffabhängig und lagen laut Hersteller Anfang 2018 bei 4.951 €/m³ (brutto). Hieraus berechnet sich eine Nutzenschwelle (*break-even point*) des CFW-Wachses gegenüber EPS bei einer Wiederverwendungsrate WAX_{wvr} von mindestens 75 Zyklen.

Zusammenfassend lässt sich zum Wachs CFW festhalten, dass dieses den physikalisch-technischen Anforderungen an ein Schalungs-

the temperature-dependent change in volume (phase transition from liquid to solid state) should be as low as possible, otherwise deformations, internal stresses or cracks will occur during cooling and solidification of the wax. The CFW wax shows a volume change of about 12% by volume between its solid state at a temperature of 20 °C and the molten state at about 80 °C. Since this temperature-dependent change in volume is too high to cast large wax blocks in one piece, it has proved to be expedient to integrate wax fillers of CFW, which have already cooled during hot casting, into the wax block to be cast. For this purpose, as shown in Fig. 2, cold wax slabs are positioned in the mould at regular intervals and cast with hot wax to form wax blocks of almost any size. Thus large and homogeneous wax blocks could be produced from CFW without the casting surfaces weakening the material.



Bild 2: Vergießen von Kaltwachs-Tabletten mit Heißwachs zu Wachsböcken (links), abgekühlter Wachsböck (rechts) | **Fig. 2:** Grouting of cold wax tablets with hot wax to wax blocks (left), cooled off wax block (right)

To ensure that the non-waste wax formwork technology is not only ecologically sensible but also successful from an economic point of view, the material costs of the wax per WAX_{JE} application must be at least below the disposable formwork material costs of EPS (40 kg/m³) of about 130 €/m³ (gross) according to Equation (1).

$$WAX_{JE} \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right] = \frac{WAX_{inv}}{WAX_{wvr}} + E_{Schm} \quad (1)$$

The melting energy costs E_{Schm} per m³ CFW wax and melting process were calculated on the basis of the melting energy of 120 J/g determined in the dynamic differential calorimetry meas-

material für frei geformte Betonbauteile genügt und gegenüber den bisher verwendeten Einweg-Schalungsmaterialien wie EPS und XPS nicht nur hinsichtlich der Festigkeit bei 20 °C, sondern auch hinsichtlich seiner Materialkosten eine sinnvolle Alternative darstellt.

3 Zerspanung von Industrieglaxen

Die Untersuchungen zur spanenden Bearbeitbarkeit der ausgewählten Industrieglaxe CFW und PW 3416 erfolgten an Wachsblöcken mit den Abmessungen 300 mm × 300 mm × 80 mm, die zur besseren Positionierbarkeit auf den Bearbeitungsmaschinen auf einer Holzplatte fixiert wurden. Diese Geometrie stellt sowohl eine gute Handhabbarkeit als auch die Möglichkeit des modularen Aufbaus größerer Geometrien sicher. Die von ITE bereitgestellten direkt gegossenen Wachsblöcke besitzen im Anlieferungszustand eine gussraue konkave Oberfläche mit zum Teil auftretenden Schwundrissen (CFW) bzw. Poren (PW 3416). Dies ist auf das Verfestigen des Wachses zurückzuführen bzw. beim Werkstoff PW 3416 auf Luftpneinschlüsse beim schmelzflüssigen Mischen der Bestandteile. Zur Sicherstellung einer definierten Ausgangsoberfläche wurden alle Wachsblöcke vor Beginn der eigentlichen Untersuchungen plangefäst.

3.1 Voruntersuchungen auf einem 3-Achs-Bearbeitungszentrum

Zunächst wurden grundlegende Untersuchungen auf einem 3-Achs-Bearbeitungszentrum der Fa. IMA (Typ: bima 280 quadroform) durchgeführt. Die vertikale Bohr- und Fräsmaschine ist ein CNC-gesteuertes Bearbeitungszentrum für die Bearbeitung von Plattenwerkstoffen und verfügt über eine Vakuumspanvorrichtung. Die Führungsbahnen und Antriebe sind in offener Bauweise ausgeführt. Die maximale Drehzahl der Werkzeugspindel beträgt $n = 18.000 \text{ 1/min}$.

Für die endkonturnahe Fertigung mit hohen Zerspanvolumen wurde das Planfräsen mit drei Messerkopffräsen untersucht. Diese un-

urements at about 13.78 €/m³ (gross). The material costs WAX_{inv} of the CFW wax depend on the raw material and, according to the manufacturer, were 4,951 €/m³ (gross) at the beginning of 2018. This results in a break-even point of the CFW wax compared to EPS at a reuse rate WAX_{wvr} of at least 75 cycles.

In summary, it can be said that CFW wax meets the physical-technical requirements for a formwork material for freely formed concrete components and is a sensible alternative to the disposable formwork materials used up to now, such as EPS and XPS, not only in terms of strength at 20 °C, but also in terms of material costs.

3 Machining of industrial waxes

The investigations into the machinability of the selected industrial waxes CFW and PW 3416 were carried out on wax blocks measuring 300 mm × 300 mm × 80 mm, which were fixed to a wooden plate for better positioning on the processing machines. This geometry ensures both good handling and the possibility of modular construction of larger geometries. The directly cast wax blocks provided by ITE have a cast-rough concave surface in the as-delivered condition with partially occurring shrinkage cracks (CFW) or pores (PW 3416). This is due to the hardening of the wax or, in the case of PW 3416, to air inclusions during the molten mixing of the components. In order to ensure a defined initial surface, all wax blocks were face milled before starting the actual investigations.

3.1 Preliminary investigations on a 3-axis machining centre

First of all, fundamental investigations were carried out on a 3-axis machining centre from IMA (type: bima 280 quadroform). The vertical drilling and milling machine is a CNC-controlled machining centre for the machining of panel materials and is equipped with a vacuum clamping device. The guideways and drives are

terscheiden sich sowohl im Durchmesser, der Schneidenanstellung und der Schneidenanzahl als auch in der maximal möglichen Zustelltiefe a_p . Die Voruntersuchungen zum Planfräsen haben gezeigt, dass:

- hohe Zeitspanvolumen erreicht werden können,
- angestellte Schneiden zu geringeren Kantenausbrüchen und besseren Oberflächen führen,
- Gleich- und Gegenlaufräsen keine signifikanten Unterschiede zeigen,
- kein Verschleiß an den Fräsern festgestellt werden konnte.

Das definierte Einbringen von Formen mit hoher Maß- und Formhaltigkeit wurde durch das Schafftfräsen von Nuten untersucht. Hierbei wurden Schafftfräser mit unterschiedlichen Schneidstoffen (Vollhartmetall beschichtet und unbeschichtet) untersucht. Zudem wurde die Stegbreite zwischen den gefertigten Nuten variiert, um die Grenzen der Strukturstabilität herauszuarbeiten. Die erzeugten Nutenarrays zeichnen sich durch saubere Bearbeitungsspuren aus, es traten keine Spananhaftungen oder Aufschmelzungen auf. Die Nutwände sind rillenfrei und optisch glatt, im Nutgrund sind die zu erwartenden Bearbeitungsspuren vorhanden. Die Voruntersuchungen zum Schafftfräsen haben gezeigt, dass:

- definierte Formen mit hoher Maß- und Formhaltigkeit erreicht werden können,
- Stegbreiten von 5 mm nicht unterschritten werden sollten,
- hohe Aspektverhältnisse erreicht werden können,
- kein Verschleiß an den Fräsern auftritt.

3.2 Weiterführende Untersuchungen auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum

Die weiterführenden Untersuchungen zur Zerspanbarkeit der beiden Wachse, auch im Bereich deutlich höherer Vorschubgeschwindigkeiten und Zeitspanvolumen, wurden auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum (DMU-100-Monoblock) durchgeführt. Hierbei wurden neben den Prozessparametern und Einstellgrößen

of open construction. The maximum speed of the tool spindle is $n = 18,000$ 1/min.

For near-net-shape production with high chip removal rates, face milling with three cutter head milling machines was investigated. These differ in diameter, cutting edge position and number of cutting edges as well as in the maximum possible infeed depth a_p . The preliminary investigations for face milling have shown that:

- high metal removal rates can be achieved,
- the use of angled cutting edges results in less edge chipping and better surfaces,
- co-milling and up-cut milling do not show significant differences,
- no wear on the milling cutters could be detected.

The defined insertion of moulds with high dimensional and shape accuracy was investigated by end milling of grooves. Here, end mills with different cutting materials (solid carbide coated and uncoated) were investigated. In addition, the web width between the machined grooves was varied in order to work out the limits of structural stability. The generated groove arrays are characterised by clean machining marks, no chip build-up or melting occurred. The groove walls are free of grooves and optically smooth, the expected machining marks are present in the groove base. The preliminary investigations for end milling have shown that:

- defined shapes with high dimensional and shape accuracy can be achieved,
- web widths should not be less than 5 mm,
- high aspect ratios can be achieved,
- there is no wear on the milling cutters.

3.2 Further investigations on a 5-axis machining centre

Further investigations into the machinability of the two waxes, also in the area of significantly higher feed rates and metal removal rates, were carried out on a 5-axis machining centre (DMU-100 monoblock). In addition to the process parameters and setting variables, the cool-

auch die Kühlschmierbedingungen systematisch variiert. Die Untersuchungen zur Fertigung von einfachen Nutgeometrien wurden um die Fertigung von Nutgeometrien mit Entformungswinkeln sowie Freiformen erweitert. Es wurden jeweils unterschiedliche Werkzeuge und Schneidstoffe, Kühlschmierbedingungen (trocken, Druckluft, Polymerlösung) und Prozessparameter (Eingriff, Zustellung, Vorschubgeschwindigkeit) untersucht. Bild 3 zeigt eine Auswahl der eingesetzten Werkzeuge je nach zu fertigender Geometrie:

- Messerkopf- und Walzenstirnfräser: ebene Flächen, leichte Krümmungen,
- Schafffräser: Konturen, Nuten, beliebige Geometrien,
- Vollradiusfräser: durchmesserabhängig – hohe oder geringe Aspektverhältnisse, Krümmungswechsel.

3.2.1 Planfräsen

In den weiterführenden Versuchsreihen zur Fertigung endkonturnaher Oberflächen durch Planfräsen wurden drei Fräswerkzeuge eingesetzt (Tabelle 1).

In den Tests wurden die Vorschubgeschwindigkeiten variiert, die Schnittgeschwindigkeiten v_c und Zustellungen a_p (Schnitttiefe des Fräasers im Werkstück) blieben innerhalb der Versuchsreihen konstant. Die Schnittbreite entsprach jeweils dem halben Fräskopfdurchmesser.

Für die Messerkopffräser konnte ein deutlicher Einfluss der Vorschubgeschwindigkeiten auf die entstehende Oberflächenrauheit festgestellt

ing lubricant conditions were also systematically varied. The investigations on the production of simple groove geometries were extended by the production of groove geometries with demoulding angles as well as free forms. Different tools and cutting materials, cooling-lubrication conditions (dry, compressed air, polymer solution) and process parameters (engagement, in-feed, feed rate) were investigated. Fig. 3 shows a selection of the tools used depending on the geometry to be produced:

- face mill: planar surfaces, small curvatures,
- end mill cutter: contours, grooves, variable geometries,
- ball nose cutter depending on the diameter – high and small aspect ratios, changes in curvature.



Bild 3: Werkzeugauswahl in den weiterführenden Untersuchungen; von links nach rechts: Walzenstirn-, Messerkopf-, Schaft- und Vollradiusfräser | **Fig. 3:** Tool selection in the further investigations; from left to right: helical- and knife cutter head, shank and full radius cutters

3.2.1 Face milling

Three milling tools were used in the further test series for the production of near-net-shape surfaces by face milling (Table 1).

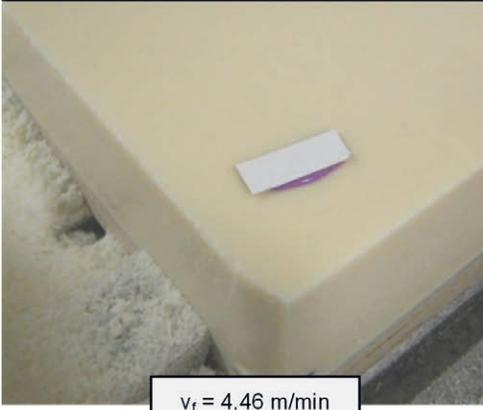
In the tests the feed rates were varied, the cutting speeds v_c and infeeds a_p (cutting depth of the cutter in the workpiece) remained constant

Serie Series	Messerkopfräser Inserted tooth milling cutter		Walzenstirnfräser End face mill
	Ø = 100 mm	Ø = 90 mm	Ø = 50 mm
Schneidenanzahl Number of cutting edges z	8	2	3
Schneidstoff Cutting material	Hartmetall beschichtet Hard metal coated	Hartmetall unbeschichtet Hard metal uncoated	HSS Co5

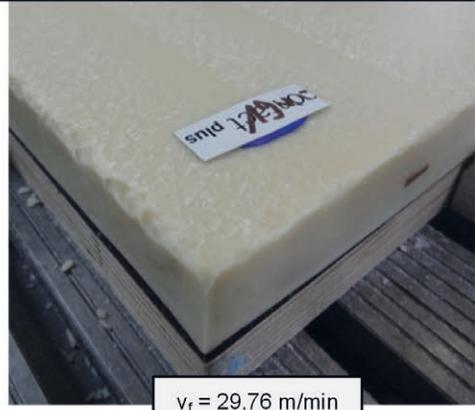
Tabelle 1: Werkzeugkenngrößen in den weiterführenden Untersuchungen | **Table 1:** Tool characteristics in the further investigations

Werkzeug | Tool: Messerkopfräser | Milling head
 Wachs | Wax :
 Schneidstoff | Cutting material : Hartmetall beschichtet | coated hard metal
 Bearbeitung | Machining :
 $n = 3100 \text{ 1/min}$
 $v_c = 974 \text{ m/min}$

$\varnothing = 100 \text{ mm}$, $z = 8$
 I-Paraffin
 trocken | dry
 $a_p = 7 \text{ mm}$
 $v_f = \text{variiert}$



$v_f = 4,46 \text{ m/min}$



$v_f = 29,76 \text{ m/min}$

Bild 4: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Oberflächenausbildung bei CFW-Wachs (I-Paraffin) | Fig. 4: Influence of the feed speed on the surface formation of CFW wax (I-paraffin)

werden. Bild 4 zeigt exemplarisch plangefräste Oberflächen im Wachs CFW (I-Paraffin).

Die maximale Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer sichtbar schlechteren Oberfläche. Bereits ab einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 14,88 \text{ m/min}$ treten erste Kantenausbrüche und Aufschmelzungen auf. Für den Messerkopfräser mit $\varnothing = 90 \text{ mm}$ ließen sich selbst bei Vorschubgeschwindigkeiten kleiner als 10 m/min nur visuell schlechtere Oberflächen fertigen. Der Walzenstirnfräser führte hingegen bei moderaten Vorschubgeschwindigkeiten ($v_f = 1,30 \text{ m/min} - 3,91 \text{ m/min}$) und vergleichsweise hohen Zustellungen ($a_p = 10 \text{ mm}$ und 20 mm) zu sehr guten, visuell glatten Oberflächen.

Der Einsatz von Druckluft oder Polymerlösung als Kühlmedium führte bei den untersuchten Planfräs Werkzeugen zu visuell vergleichbaren Oberflächen. Dies wird durch die Auswertung der erreichten Oberflächenrauheiten, hier dargestellt durch R_z , unterstützt. Die Rauheiten wurden an Abdrücken der Wachs Oberfläche ermittelt. Die Auswertung anhand von Negati-

within the test series. The cutting width corresponded in each case to half the milling head diameter.

For the cutter head cutters, a clear influence of the feed rates on the resulting surface roughness could be determined. Fig. 4 shows an example of a surface milled in CFW (I-paraffin) wax.

The maximum feed rate leads to a visibly worse surface. Already from a feed speed of $v_f = 14.88 \text{ m/min}$ the first edge chipping and melting occurs. For the cutter head cutter with $\varnothing = 90 \text{ mm}$, only visually poorer surfaces could be produced even at feed speeds $< 10 \text{ m/min}$. In contrast, the shell end mill produced very good, visually smooth surfaces at moderate feed rates ($v_f = 1.30 \text{ m/min} - 3.91 \text{ m/min}$) and comparatively high infeeds ($a_p = 10 \text{ mm}$ and 20 mm).

The use of compressed air or polymer solution as a coolant led to visually comparable surfaces on the face milling tools investigated. This is supported by the evaluation of the achieved surface roughness, here represented by R_z . The roughnesses were de-

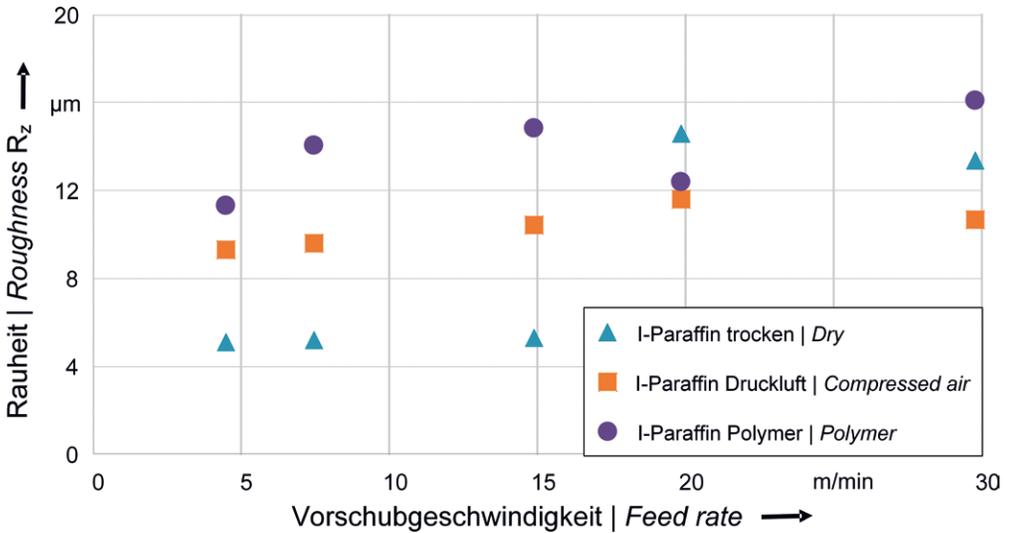


Bild 5: Rauheit R_z über der Vorschubgeschwindigkeit (Messerkopfräser $\varnothing = 100$ mm) beim Planfräsen von CFW-Wachs (I-Paraffin) | Fig. 5: Roughness R_z above the feed speed (cutter head cutter $\varnothing = 100$ mm) during face milling of CFW wax (I-paraffin)

ven der Wachs Oberfläche ist darin begründet, dass die Wachsblöcke wegen ihrer Größe nicht mit dem Konfokalmikroskop PL μ (ATOS GmbH) vermessen werden können.

Bild 5 zeigt exemplarisch die Rauheit, aufgetragen über der Vorschubgeschwindigkeit, für den Messerkopfräser $\varnothing = 100$ mm bei verschiedenen Kühlschmierbedingungen beim Fräsen von CFW-Wachs. Bis zur Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 14,88$ m/min kann deutlich zwischen den einzelnen Kühlschmierbedingungen (trocken, Druckluft, Polymerlösung) unterschieden werden. Die trocken gefertigte Oberfläche hat einen vergleichsweise niedrigen R_z -Wert. Der Einsatz von Druckluft führt zu einer Erhöhung der Oberflächenrauheit, welche unter Einsatz der Polymerlösung nochmals ansteigt. Bei Vorschubgeschwindigkeiten v_f größer 14,88 m/min steigt der R_z -Wert bei der Trockenbearbeitung sprunghaft und nähert sich den Werten der unter Druckluft und Polymerlösung gefertigten Oberflächen an. Es zeigt sich hierin, dass mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit und damit mit zunehmendem Zeitspannvolumen der Einfluss der Kühlschmierung durch den Einfluss der deutlich raueren Frässpuren überlagert wird. Das gleiche Verhalten zeigt

termined on impressions of the wax surface. The evaluation on the basis of negatives of the wax surface is based on the fact that the wax blocks cannot be measured with the confocal microscope PL μ (ATOS GmbH) due to their size.

Fig. 5 shows an example of the roughness, plotted against the feed rate, for the cutter head cutter $\varnothing = 100$ mm under different cooling lubricant conditions when milling CFW wax. Up to a feed rate of $v_f = 14,88$ m/min, a clear distinction can be made between the individual cooling lubrication conditions (dry, compressed air, polymer solution). The dry machined surface has a comparatively low R_z -value. The use of compressed air leads to an increase in surface roughness, which increases again when using the polymer solution. At feed speeds v_f greater than 14,88 m/min, the R_z -value increases abruptly during dry machining and approaches the values of surfaces produced under compressed air and polymer solution. This shows that with increasing feed rate and thus with increasing metal removal rate, the influence of cooling lubrication is superimposed by the influence of the significantly rougher milling marks. The same behaviour is shown with wax PW 3416 during dry machining and under compressed air. Ma-

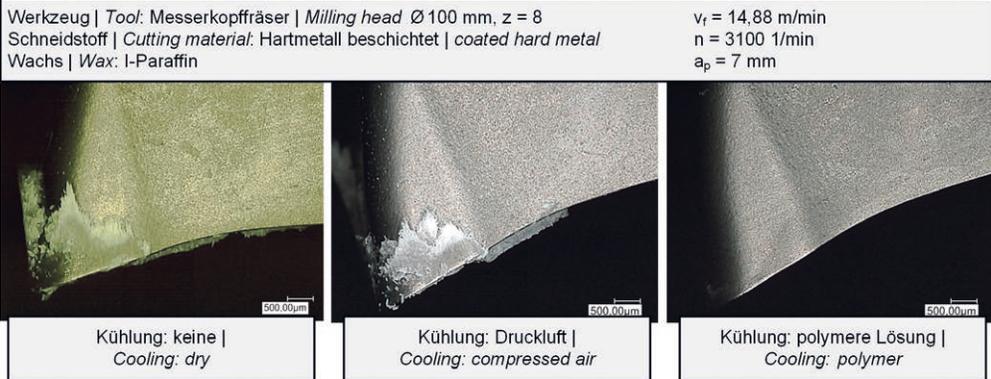


Bild 6: Anhaftungen von CFW-Wachs (I-Paraffin) an der Schneide | Fig. 6: Adhesion of CFW wax (I-paraffin) to the cutting edge

sich beim Wachs PW 3416 bei trockener Bearbeitung und unter Druckluft. Auf eine Bearbeitung unter Polymerlösung wurde verzichtet, da keine wesentlichen Vorteile bei der Bearbeitung des Wachses CFW auftraten. Der Einsatz des Messerkopfräasers $\varnothing = 90$ mm und des Walzenstirnfräasers führt zu ähnlichen Ergebnissen. Mit Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit nimmt der R_z -Wert zu, der Einfluss der Kühlschmierbedingungen ist wiederum gering.

Die Bearbeitung der Wachse ohne Kühlschmierstoff oder Druckluft führt zu Anhaftungen von Wachs an der Schneide und zu Zusetzungen der Kühlkanäle des Werkzeugs. Es besteht die Gefahr, dass die anhaftenden Späne an der Werkzeugschneide wieder in den Schnitt gezogen werden und es somit zum Einglätten beziehungsweise zur Beeinflussung der Oberfläche kommt. Die Zusetzung der Kühlkanäle tritt nicht auf, wenn Druckluft oder Polymerlösung eingesetzt werden, da es hier die Späne stetig entfernt werden. Sie werden sofort von der Zerspanstelle transportiert, sodass ein Zusetzen der Werkzeuge und Anhaftungen größtenteils vermieden wird (Bild 6). Die Bearbeitung unter Polymerlösung zeigt, dass die Wachspäne zwar von der Zerspanstelle weggespült werden, sich aber in den kühlmittelfördernden Leitungen des Bearbeitungszentrums agglomerieren und zu starken Verschmutzungen in den Ablaufkanälen und Spaltsieben führen können (Bild 7). Abhilfe können hier die trockene bzw. Druckluft-Zerspannung oder ein angepasstes Maschinensystem

chining under polymer solution was dispensed with, since no significant advantages were found when machining the CFW wax. The use of the cutter head cutter $\varnothing = 90$ mm and the shell end mill leads to similar results. As the feed rate increases, the R_z -value increases, the influence of the cooling lubricant conditions is again low.

Processing the waxes without cooling lubricant or compressed air causes wax to adhere to the cutting edge and clog the cooling channels of the tool. There is a risk that the chips adhering to the cutting edge will be drawn back into the cut, thus smoothing or influencing the surface. Clogging of the cooling channels does not occur when compressed air or polymer solution is used, as the chips are continuously removed. They are transported immediately from the cutting point, so that clogging of the tools and build-up is largely avoided (Fig. 6). Machining under polymer solution shows that although the wax chips are flushed away from the cutting point, they agglomerate in the coolant-conveying lines of the machining centre and can lead to heavy soiling in the drainage channels and slotted screens (Fig. 7). This can be remedied by dry or compressed air machining or by an adapted machine system. A modified chip collection and filter design also allows machining under polymer solution in principle.

The wear behaviour of the tools used depends on the cutting materials and the wax specifications machined. During the processing of the

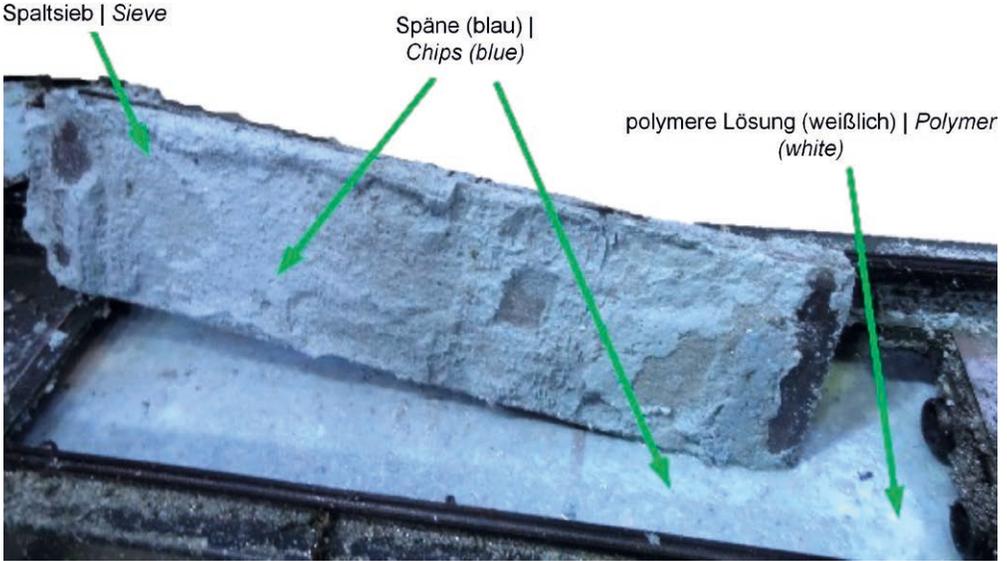


Bild 7: Schmiermittelleitung mit zugesetztem Spaltsieb und aufgeschwemmten Spänen, Wachs PW 3146 (blau = Wachs P-Montan) | **Fig. 7:** Lubricant line with added slotted sieve and suspended chips of wax PW 3146 (blue = wax P-Montan)

schaffen. Eine modifizierte Späneerfassung und Filterkonstruktion ermöglicht prinzipiell auch die Zerspanung unter Polymerlösung.

Das Verschleißverhalten der eingesetzten Werkzeuge ist abhängig von den Schneidstoffen und den bearbeiteten Wachsspezifikationen. Bei der Bearbeitung des homogenen Wachses CFW wurde über alle Versuche kein Verschleiß an den Schneiden detektiert. Gleiches gilt für die Bearbeitung des Wachses PW 3146 mit den Schneidstoffen Hartmetall beschichtet und unbeschichtet. Demgegenüber führte die Bearbeitung des Wachses PW 3146 mit dem Schneidstoff HSS Co5 bereits nach einem sehr kleinen Zerspanvolumen von $V_w = 900 \text{ cm}^3$ zum Verschleiß der Schneiden (Bild 8) auf Grund des im Wachs PW 3146 enthaltenen Füllstoffs Terephthalsäure. Es wurden eine Verschleißmarkenbreite von ca. $100 \mu\text{m}$ und ein Schneidkantenversatz von ca. $281 \mu\text{m}$ detektiert. Dies führt zu einer deutlich sichtbaren, unsauberen Schnittkante im Wachs.

Zusammenfassend lässt sich für das Planfräsen der Wachse herausstellen, dass die Bearbeitung mit dem Messerkopfräser $\varnothing = 100 \text{ mm}$,

homogeneous wax CFW no wear of the cutting edges was detected during all tests. The same applies to the machining of PW 3146 wax with the cutting materials carbide coated and uncoated. In contrast, machining the wax PW 3146 with the cutting material HSS Co5 resulted in wear of the cutting edges (Fig. 8) after a very small cutting volume of $V_w = 900 \text{ cm}^3$ due to the filler terephthalic acid contained in the wax PW 3146. A wear mark width of approx. $100 \mu\text{m}$ and a cutting edge offset of approx. $281 \mu\text{m}$ were detected. This leads to a clearly visible, unclean cutting edge in the wax.

In summary, for face milling of the waxes, it can be stated that machining with the cutter head cutter $\varnothing = 100 \text{ mm}$, $z = 8$, cutting material: carbide, for a feed rate lower $v_f = 14.88 \text{ m/min}$ is useful with regard to surface formation ($a_p = 7 \text{ mm}$, speed $n = 3,100 \text{ rpm}$). The resulting metal removal rate is $5,208 \text{ cm}^3/\text{min}$ per milling path ($50 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$). Similarly, the machining time for 1 m^2 is 1.34 min and for 1 m^3 thus approx. 192 min with an infeed $a_p = 7 \text{ mm}$. The cutter head cutter $\varnothing = 90 \text{ mm}$ led to visually much worse surfaces ($a_p = 10$ or 20 mm) even at lower feed rates. In contrast, the shell end mill

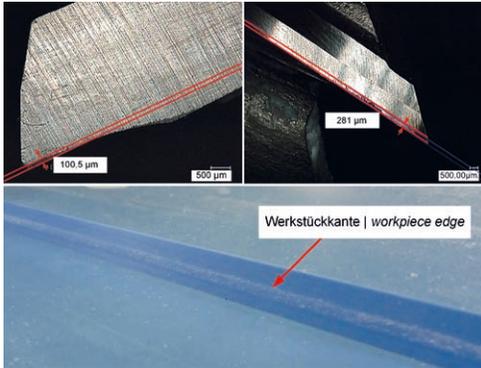


Bild 8: Verschleißmarkenbreite der Schneide (oben links), Schneidkantenversatz an der Freifläche (oben rechts) und resultierende Schnittkante im Wachs PW 3146 (unten) | **Fig. 8:** Wear mark width of the cutting edge (top left), cutting edge offset on the free surface (top right) and resulting cutting edge in the wax PW 3146 (below) and corresponding FE results

$z = 8$, Schneidstoff: Hartmetall, für eine Vorschubgeschwindigkeit kleiner $v_f = 14,88$ m/min sinnvoll hinsichtlich der Oberflächenausbildung ist ($a_p = 7$ mm, Drehzahl $n = 3.100$ 1/min). Das damit erreichte Zeitspanvolumen beträgt 5.208 cm³/min je Fräsbahn (50 mm × 7 mm × 300 mm). Die Bearbeitungszeit für 1 m² beträgt analog dazu 1,34 min und für 1 m³ somit ca. 192 min bei einer Zustellung $a_p = 7$ mm. Der Messerkopfräser $\varnothing = 90$ mm führte auch bei geringeren Vorschubgeschwindigkeiten zu visuell deutlich schlechteren Oberflächen ($a_p = 10$ bzw. 20 mm). Demgegenüber konnten mit dem Walzenstirnfräser bei ebenso gleichhohen Zustellungen und moderaten Vorschubgeschwindigkeiten sehr gute Oberflächen gefertigt werden. Für die Zerspanung des Wachses CFW wird somit der Einsatz des Walzenstirnfräasers empfohlen.

3.2.2 Schaftfräsen

In den weiterführenden Versuchen zur Fertigung von Strukturen mit hoher Maß- und Formgenauigkeit wurde, neben der Fertigung einfacher Nutgeometrien, die Fertigung von Nuten mit Entformungswinkeln untersucht. Hierbei wurde die aus den Vorversuchen ermittelte stabile Stegbreite von 5 mm nicht unterschritten. Zum Einsatz kamen zwei Schaftwerkzeuge mit 16 mm Durchmesser, Zähnezahl $z = 2$ aus Hart-

metall, die in der Lage waren, sehr gute Oberflächen zu erzeugen, die bei den gleichen Infeeds und moderaten Vorschubgeschwindigkeiten herstellbar waren. Die Verwendung des Shell-Endmills wird daher für die Bearbeitung von CFW-Wachs empfohlen.

3.2.2 Endmilling

In den weiteren Tests für die Produktion von Strukturen mit hoher Dimensional- und Formgenauigkeit, wurde die Produktion von Nuten mit demoulding angles untersucht. In addition to the production of simple groove geometries, here, the stable web width of 5 mm determined from the preliminary tests was not undercut. Two shank tools with a diameter of 16 mm and a number of teeth $z = 2$ made of carbide with and without an additional DLC coating (DLC: amorphous carbon layer) were used. The latter was investigated with regard to improved chip removal and thus reduced adhesion of chips to the tool.

The production of the grooves without a demoulding angle was carried out by varying the feed rate and the infeed depth as well as the cooling lubricant conditions. It could again be shown that with increasing feed rate the roughness in the grooves increases from $R_z = 9.9$ µm to $R_z = 18.0$ µm. With regard to the demoulding of the later concrete casting, no influence of roughness was found. The material adherence decreased significantly when using polymer solution (Fig. 9). No mould wear was detected. Furthermore, no influence of the DLC coating could be determined with regard to the resulting chip adhesion.

Furthermore, grooves with demoulding angles of 1°, 2°, 3° and 4° were produced in two different depths ($a_p = 10$ and 20 mm) and with variation of the feed speed ($v_f = 2.08$ m/min and 8.32 m/min) (Fig. 10).

The manufacturing accuracy of the angles introduced was measured and is sufficiently high with a maximum deviation of 2.55% between the actual and target values. The groove depths were manufactured with a repeat accuracy of ± 10 µm.

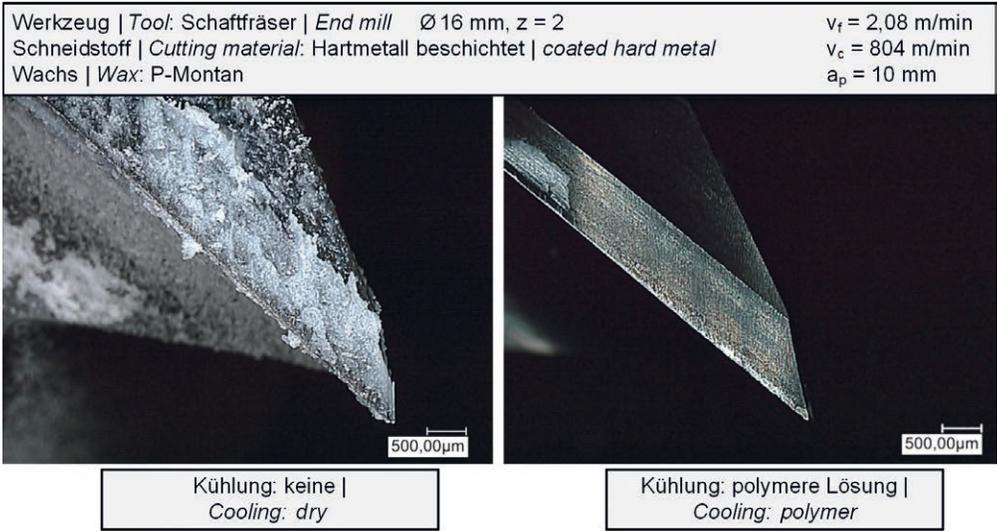


Bild 9: Werkstoffanhaftungen an der Schneide unter verschiedenen Kühlschmierbedingungen beim Fräsen vom Wachs PW 3146 (P-Montan) | **Fig. 9:** Material buildup on the cutting edge under various cooling lubricant conditions during milling of PW 3146 wax (P-Montan)

metall mit und ohne einer zusätzlichen DLC-Beschichtung (DLC: amorphe Kohlenstoffschicht, englisch: *diamond-like carbon*). Letztere wurde im Hinblick auf eine verbesserte Spanabfuhr und damit geringere Anhaftungen von Spänen am Werkzeug untersucht.

Die Fertigung der Nuten ohne Entformungswinkel erfolgte unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit und der Zustelltiefe sowie der Kühlschmierbedingungen. Es konnte wiederum gezeigt werden, dass mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit die Rauheit in den Nuten von $R_z = 9,9 \mu\text{m}$ auf $R_z = 18,0 \mu\text{m}$ zunimmt. Im Hinblick auf die Entformung des späteren Betonabgusses wurde kein Einfluss der Rauheit festgestellt. Die Werkstoffanhaftungen nahmen unter Nutzung von Polymerlösung deutlich ab (Bild 9). Es wurde kein Werkzeugverschleiß festgestellt. Zudem konnte kein Einfluss der DLC-Beschichtung bezüglich der resultierenden Spananhaftungen festgestellt werden.

Des Weiteren wurden Nuten mit Entformungswinkeln von 1° , 2° , 3° und 4° in zwei verschiedenen Tiefen ($a_p = 10$ und 20 mm) und unter Variation der Vorschubgeschwindigkeit ($v_f = 2,08$ und $8,32 \text{ m/min}$) gefertigt (Bild 10).

3.2.3 Free form milling

Free forms were produced in further test series. These generally have more complex geometries due to curvatures. In initial tests, uniaxially curved surfaces with different tool path distances were manufactured. Full radius milling cutters with diameters of $\varnothing = 10$ and 20 mm were used here. The machining took place without cooling lubricant. The milling path distance was selected with $x = 1, 0, 5$ and 0.1 mm in order to be able to evaluate the resulting structure on the later concrete casting.

It could be shown that the use of a full radius milling cutter with a diameter $\varnothing = 20 \text{ mm}$ and

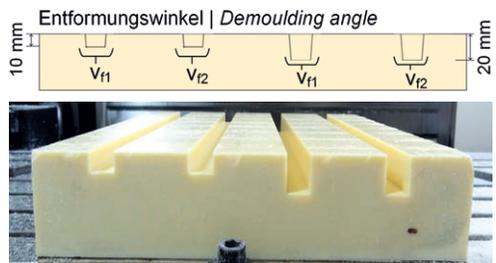


Bild 10: Fertigung von Nuten mit Entformungswinkeln | **Fig. 10:** Manufacture of grooves with demoulding angles

Die Fertigungsgenauigkeit der eingebrachten Winkel wurde vermessen und ist mit einer maximalen Abweichung von IST- zu SOLL-Wert mit 2,55 % ausreichend hoch. Die Nuttiefen wurden mit einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ gefertigt.

3.2.3 Freiformfräsen

In weiteren Versuchsreihen wurden Freiformen gefertigt. Diese weisen im Allgemeinen durch Krümmungen und insgesamt komplexe Geometrien auf. In ersten Untersuchungen wurden einachsig gekrümmte Flächen mit unterschiedlichen Fräsbahnabständen gefertigt. Zum Einsatz kamen hier Vollradiusfräser mit den Durchmessern $\varnothing = 10$ und 20 mm . Die Bearbeitung fand ohne Kühlschmierstoff statt. Der Fräsbahnabstand wurde mit $x = 1, 0,5$ und $0,1 \text{ mm}$ gewählt, um so die resultierende Struktur auf dem späteren Betonabguss auswerten zu können.

Es konnte gezeigt werden, dass bei Verwendung eines Vollradiusfräasers mit dem Durchmesser $\varnothing = 20 \text{ mm}$ und einem Fräsbahnabstand von $x = 1 \text{ mm}$ sichtbare Rillen entstehen. Bei dem Fräsbahnabstand $x = 0,5 \text{ mm}$ sind die Rillen auf dem Wachs ebenfalls noch zu erkennen, jedoch deutlich weniger ausgeprägt. Bei einem Bahnabstand von $x = 0,1 \text{ mm}$ ist kaum noch eine Struktur zu erkennen und die Oberfläche wirkt optisch glatt. Bild 11 zeigt die Oberflächen des Betonabgusses der Freiform-Wachsschalung unter Verwendung von UHPC.

Zum Erreichen einer im Sinne der Architektur optisch glatten Sichtbetonoberfläche, wie diese z. B. von Bauherren bei Fassadenelementen oft verlangt wird, ist die Verwendung eines Fräsbahnabstandes von $x = 0,5 \text{ mm}$ zu empfehlen. Dieser Fräsbahnabstand stellt bei den verwendeten Vollradiusfräsern und unter Verwendung des in geringen Maßen nivellierenden Trennmittels (Schalwachs: GRACE Ciri LM-33) eine geeignete Prozesskonstellation im Hinblick auf die Oberflächengüte und die Bearbeitungszeit dar.

a milling path distance of $x = 1 \text{ mm}$ produces visible grooves. With a milling path distance of $x = 0.5 \text{ mm}$, the grooves on the wax are also still visible, but much less pronounced. At a tool-path distance of $x = 0.1 \text{ mm}$, hardly any structure is visible and the surface appears optically smooth. Fig. 11 shows the surfaces of the concrete cast of the freeform wax formwork using UHPC.

In order to achieve an optically smooth exposed concrete surface in terms of architecture, as is often required by clients for façade elements, for example, it is recommended to use a milling path distance of $x = 0.5 \text{ mm}$. This milling path distance represents a suitable process constellation in terms of surface quality and machining time with the full radius milling cutters used and with the use of a release agent that levels to a small extent (formwork wax: GRACE Ciri LM-33).

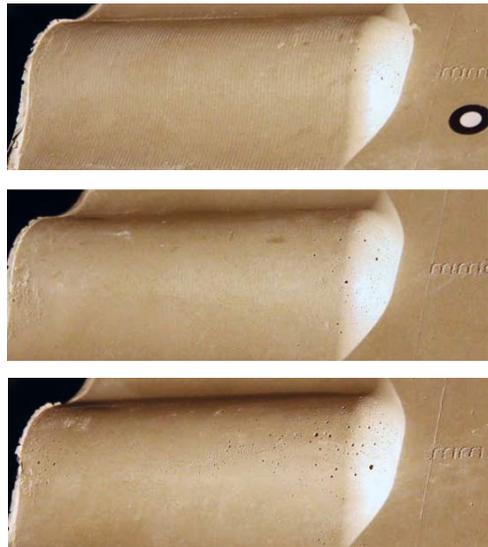


Bild 11: Oberflächen von Abgüssen der Freiformen mit UHPC; von oben nach unten: $x = 1 \text{ mm}$ – Rillen optisch und haptisch zu erkennen, $x = 0,5 \text{ mm}$ – Rillen nur optisch feststellbar, $x = 0,1 \text{ mm}$ – optisch und haptisch glatt | **Fig. 11:** Surfaces of the UHPC freeform cast; from top to bottom: $x = 1 \text{ mm}$ – grooves noticeable visual and haptic, $x = 0.5 \text{ mm}$ – grooves only visual noticeable, $x = 0.1 \text{ mm}$ – look and feel smooth

4 Entwurf und Herstellung von Schalungselementen aus Wachs durch subtraktive Bearbeitung und Betonierung der Referenzprobekörper

4 Design and manufacture of formwork elements made of wax by subtractive machining and concreting of reference specimens

4.1 Geometrie

4.1 Geometry

Die bisherigen Erkenntnisse wurden im nächsten Schritt verwendet, um formstabile Außen-Wachsschalungen aus CFW-Wachs zu fertigen. Hierzu wurden vom ITE aus vergossenen Wachstafeln hergestellte Wachsböcke mit den Abmessungen 500 mm × 500 mm × 120 mm bereitgestellt. Als Wachs für diese Untersuchungen wurde ausschließlich das CFW-Wachs verwendet. Obwohl das Wachs PW 3416 bessere physikalisch-technische Eigenschaften (u. a. höherer E-Modul, größere Festigkeit und geringere thermische Dehnung) aufweist, führte der im Wachs PW 3416 enthaltene Füllstoff Terephthalsäure zu einem höheren Verschleiß an einigen Werkzeugen sowie zu einem Ansäuern der finalen Betonoberfläche.

The previous findings were used in the next step to produce dimensionally stable exterior wax formwork from CFW wax. For this purpose, wax blocks measuring 500 mm × 500 mm × 120 mm were provided by ITE from cast wax sheets. Only CFW wax was used as the wax for these investigations. Although the wax PW 3416 has better physical-technical properties (including higher modulus of elasticity, higher strength and lower thermal expansion), the filler terephthalic acid contained in the wax PW 3416 led to higher wear on some tools and to acidification of the final concrete surface.

Zur Herstellung repräsentativer geometrischer Formen wurden durch das ITE sogenannte Formenbausteine konstruiert und im CAD zu Wachsschaltafeln zusammengesetzt (Bild 12). Zudem wurde eine Wachsschaltafel mit einer parametrisch strukturierten Oberfläche und

In order to produce representative geometric shapes, the ITE designed so-called mold blocks and assembled them in CAD to form wax formwork panels (Fig. 12). In addition, a wax formwork panel with a parametrically structured surface and a further wax formwork panel were constructed to investigate the aspect ratio ($b : h = 2 : 1$ to $1 : 5$) and thus the demoldability of the subsequent casting.

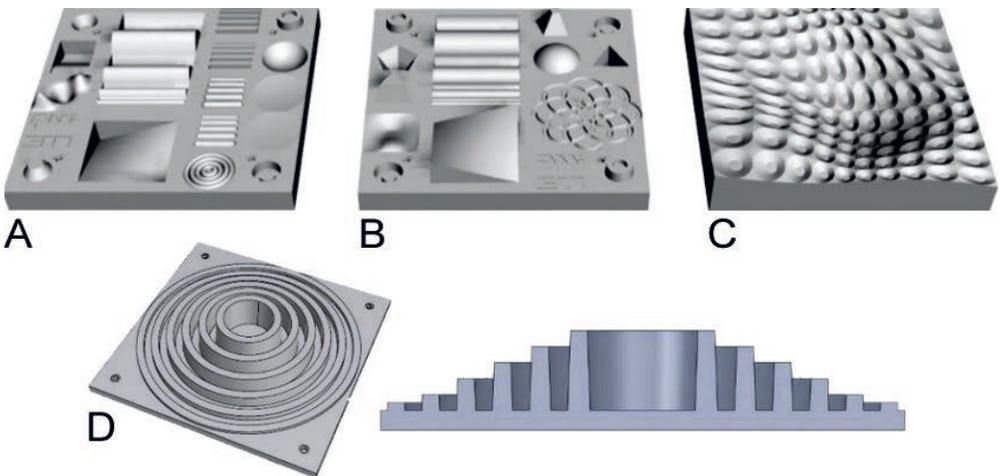


Bild 12: Digitale CAD-Modelle der Wachsschaltafeln | Fig. 12: Digital CAD models of the wax formwork panels

eine weitere Wachsschalttafel zur Untersuchung des Aspektverhältnisses ($b : h = 2 : 1$ bis $1 : 5$) und somit der Entformbarkeit des späteren Abgusses konstruiert.

4.2 Fertigung

Zur Fertigung der Wachsschalttafeln wurden die CAD-Daten des ITE an das IWF übergeben und im CAM-System Solid CAM 2015 der NC-Code erstellt. Am Beispiel der Wachsschalttafel A wird die Bearbeitungsabfolge erläutert. Zum Einsatz kamen insgesamt neun Werkzeuge (Schaft- und Kopierfräser) mit Durchmessern von 16 mm bis 1,5 mm.

Zunächst wurde der angelieferte Wachsblock auf dem Bearbeitungszentrum DMU-100-Monoblock fixiert und die Position eingemessen. Im sogenannten *IMachining* erfolgt die erste Schruppbearbeitung des gesamten Wachsblocks (Schaftfräser $\varnothing = 16$ mm). Hierbei wird unter den optimalen Schnittbedingungen möglichst viel Werkstoff zerspannt. Beim *IMachining* werden Trochoidalfräser eingesetzt, wobei mit der gesamten Schneidenlänge a_p bei geringem Schneideneingriff a_e eine recht hohe Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 5$ m/min gefahren wird. Nach dem *IMachining* werden die ersten Konturen mit einem Schaftfräser $\varnothing = 10$ mm schruppend bearbeitet ($n = 17.492$ 1/min, $v_f = 12,94$ m/min). Mit dem Modus „I3D Rough“ werden anschließend ausgewählte, kleine Strukturen bearbeitet (Schaftfräser $\varnothing = 6$ mm, $n = 18.000$ 1/min, $v_f = 5,9$ m/min) ebenso wie tieferliegende Bohrungen vorbearbeitet (Schaftfräser $\varnothing = 6$ mm, $n = 10.610$ 1/min, $v_f = 0,954$ m/min). Mit einem Schaftfräser $\varnothing = 10$ mm wird nachfolgend die gesamte Wachs Oberfläche zwischen den For-

4.2 Manufacturing

For the production of the wax formwork panels, the CAD data from ITE were transferred to IWF and the NC code was created in the CAM system Solid CAM 2015. The machining sequence is explained using the example of wax board A. A total of nine tools (end mills and copy mills) with diameters from 16 mm to 1.5 mm were used.

First the delivered wax block was fixed on the machining center DMU-100-Monoblock and the position was measured. In the so-called *IMachining* the first roughing of the entire wax block (end mill $\varnothing = 16$ mm) is carried out. During this process, as much material as possible is machined under optimum cutting conditions. Trochoidal milling cutters are used in the *IMachining* process, whereby the entire cutting edge length a_p is machined at a rather high feed rate $v_f = 5$ m/min with a low cutting edge engagement a_e . After *IMachining*, the first contours are rough-machined with an end mill $\varnothing = 10$ mm ($n = 17,492$ 1/min, $v_f = 12.94$ m/min). The “I3D Rough” mode is then used to machine selected, small structures (end mill $\varnothing = 6$ mm, $n = 18,000$ rpm, $v_f = 5.9$ m/min) as well as pre-machining deeper holes (end mill $\varnothing = 6$ mm, $n = 10,610$ rpm, $v_f = 0.954$ m/min). With an end mill $\varnothing = 10$ mm, the entire wax surface between the mould modules is then finished ($n = 16,000$ rpm, $v_f = 2.88$ m/min). The finishing of the individual mould modules takes place at comparatively low feed rates.

Fig. 13 shows an example of the machining of the curved, back surfaces (brownish-green surfaces). Here the pre-machined surface is

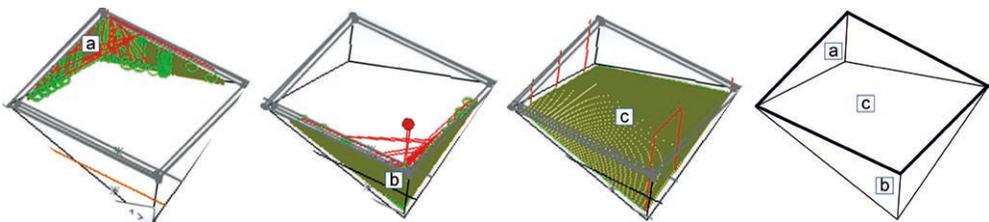


Bild 13: Ablauf Schlichtbearbeitung des Formenbausteins „gekrümmte Fläche“ | Fig. 13: Finishing process 'curved surface'

menbausteinen geschichtet ($n = 16.000$ 1/min, $v_f = 2,88$ m/min). Die Schlichtbearbeitung der einzelnen Formenbausteine findet bei vergleichsweise geringen Vorschubgeschwindigkeiten statt.

Bild 13 zeigt exemplarisch die Bearbeitung der gekrümmten, zurückliegenden Flächen (bräunlich-grüne Flächen). Hierbei wird die vorbereitete Fläche mit einem Kopierfräser ($\varnothing = 10$ mm, $n = 7.000$ 1/min, $v_f = 0,78$ m/min) geschichtet. Es werden zunächst die senkrechten Außenkanten (a, b) und die Kantengeometrie in den Ecken des Formenbausteins bearbeitet. Anschließend erfolgt die Schlichtbearbeitung der mehrfach gekrümmten Oberfläche (c). Die roten Striche zeigen die Anfahrbewegungen des eingesetzten Fräsers im Eilgang ($v_f = 30$ m/min) an, wohingegen die grünen Markierungen die eigentlichen Vorschubbewegungen aufzeigen.

Jeder weitere Formenbaustein wurde ebenfalls individuell und je nach Strukturfeinheit mit den benötigten Werkzeugdurchmessern bearbeitet. Besonders filigrane Strukturen wie die Stege und Nuten (Breiten: 10 bis 2 mm, Höhen bzw. Tiefen: 10 mm) wurden mit einem Kopierfräser ($\varnothing = 1,5$ mm, $n = 16.000$ 1/min, $v_f = 1,6$ m/min) fertig bearbeitet, Bild 14.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Bearbeitung größerer und geometrisch deutlich komplexerer Wachsschalungen und Wachsformelemente möglich ist. Es treten keine Maßstabseffekte auf. Zu beachten bleibt allerdings der zunehmend erschwerte Späneabtransport bei zunehmender Strukturtiefe. Es kommt hierbei schnell zu Zersetzungen des Werkzeugs und Anhaftungen am Werkstück. Aus diesem Grund wurde der Prozess regelmäßig unterbrochen, um die Werkzeuge und insbesondere die feinen Strukturen von anhaftenden Spänen zu säubern.

Während aller Versuchsreihen und Fertigungsabläufe wurden die anfallenden Wachsspäne sortenrein gesammelt und zur Wiederverwendung an das ITE übergeben. Bei der Bearbeitung recyclerter und erneut vergossener Späne konnte

finished with a copy milling cutter ($\varnothing = 10$ mm, $n = 7,000$ 1/min, $v_f = 0.78$ m/min). First the vertical outer edges (a, b) and the edge geometry in the corners of the mould module are machined. Then the finishing of the multi-curved surface (c) is carried out. The red lines indicate the approach movements of the milling cutter used in rapid traverse ($v_f = 30$ m/min), whereas the green marks indicate the actual feed movements.

Each additional mould module was also individually machined with the required mould diameters depending on the structural fineness. Particularly filigree structures such as the webs and grooves (widths: 10 to 2 mm, heights or depths: 10 mm) were finished with a copy milling cutter ($\varnothing = 1.5$ mm, $n = 16,000$ rpm, $v_f = 1.6$ m/min), Fig. 14.

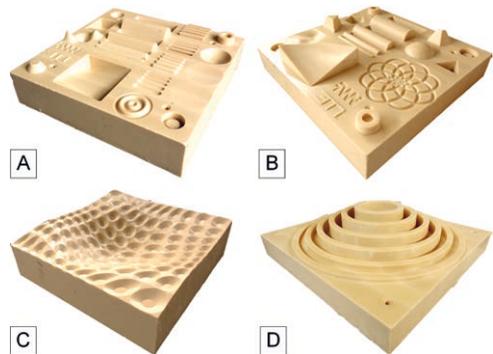


Bild 14: Gefertigte Wachsschaltafeln | Fig. 14: Manufactured wax formwork panels

In summary, it can be stated that the processing of larger and geometrically much more complex wax formwork and wax form elements is possible. There are no scale effects. However, the increasingly difficult chip removal with increasing structure depth must be taken into account. This quickly causes the tool to decompose and adhere to the workpiece. For this reason, the process was regularly interrupted to clean the tools and especially the fine structures from adhering chips.

During all test series and production processes, the wax chips were collected according to type

Serie Series	Messerkopfräser Inserted tooth milling cutter			
	A	B	C	D
Schnittzeit Cutting time [hh:mm:ss]	07:46:39	05:30:14	04:33:16	02:29:34

Tabelle 2: Werkzeugkenngrößen in den weiterführenden Untersuchungen | **Table 2:** Tool characteristics in the further investigations

kein Unterschied im Prozessverhalten im Vergleich zu neuwertig vergossenen Blöcken festgestellt werden.

4.3 Optimierung der Fertigungsparameter

Die Fertigung der Wachsschaltafeln benötigt, je nach gewählten Schnittbedingungen, eine bestimmte Schnittzeit (Tabelle 2).

Neben der eigentlichen Schnittzeit für die Wachsschaltafeln war nach der Fertigung noch eine Nachbearbeitung jeder Wachsschalung notwendig. Durch den Bearbeitungsprozess kam es teilweise zu Anhaftungen und Aufschmelzungen von Spänen auf den entstehenden Formbausteinen. Insbesondere mit zunehmender Strukturtiefe wird der Spanabtransport erschwert. Bild 15 zeigt exemplarisch aufgeschmolzene Späne an der Schalttafel A.

Die Nachbearbeitung jeder Wachsschaltafel erfolgte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen und Fertigungsabläufe händisch durch Bürstoperationen mit Polyamidborsten und bei stärkeren Anhaftungen durch Schaben mit einer metallischen Klinge. Für einen produktiven Fertigungsablauf bieten sich hier Bürstoperationen direkt auf dem Bearbeitungszentrum an. Das Polieren mit Polierstiften wird als kritisch bewertet, da es hier, ausgehend von den Erfahrungen mit Zerspanwerkzeugen mit definierter Schneide, voraussichtlich zur schnellen Zusetzung des Porenraums kommt und keine Zerspannung mehr stattfinden kann.

Wie bereits dargestellt, führt eine Bearbeitung unter Druckluft und Polymerlösung im Hinblick auf die erreichten Oberflächenrauheiten bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten zu vergleichbaren Ergebnissen wie die Trockenbearbeitung. Der wesentliche Vorteil der Polymerlösung ist

and handed over to ITE for reuse. When machining recycled and recast chips, no difference in process behaviour could be detected in comparison to blocks cast as new.

4.3 Optimisation of the production parameters

Depending on the selected cutting conditions, the production of the wax formwork panels requires a certain cutting time (Table 2).

In addition to the actual cutting time for the wax formwork panels, each wax formwork had to be reworked after production. The machining process sometimes caused chips to adhere to and melt on the resulting mould blocks. Especially with increasing structure depth, the removal of chips becomes more difficult. Fig. 15 shows an example of fused chips on the shuttering panel A.

Within the scope of the investigations and production processes carried out, the finishing of each wax board was carried out manually by brushing with polyamide bristles and, in the case of stronger adhesions, by scraping with a metallic blade. For a productive manufacturing process, brushing operations directly on the machining centre are recommended here. Pol-

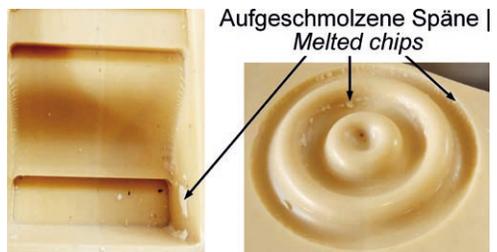


Bild 15: Spananhaftungen an einzelnen Formbausteinen | **Fig. 15:** Chip buildup on individual form bricks

die beinahe vollständige Vermeidung von Zusetzungen an den Werkzeugschneiden und, sofern vorhanden, in den Kühlkanälen. Für eine Bearbeitung unter Polymerlösung muss ein geeignetes Spanabfuhrkonzept in der Bearbeitungsmaschine vorliegen, um Agglomerationen von Spänen in den schmiermittelfördernden Leitungen und Verstopfungen der Spaltsiebe vorzubeugen. Hierzu bietet es sich an, zunächst grobe Späne direkt im Bearbeitungsraum aufzufangen. Feine Späne können mit geeigneten Schwerkraft-Anschwemmfiltern filtriert werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung eines Kammer- bzw. Absatzfilters. Bei diesem schwimmen die feinen Späne oben auf und können abgeschöpft werden. Die letzte Stufe des Kammerfilters pumpt somit ausschließlich gereinigten Kühlschmierstoff zurück in den Kreislauf.

4.4 Abguss der Wachsschalungen mit UHPC

Die am IWF gefrästen Wachsschalungen wurden am ITE in eine Standard-Systemschalung eingebracht, mit einer dünnen Schicht Trennmittel eingestrichen und mit UHPC abgegossen (Bild 16, links).

Durch den visuellen Vergleich der mit UHPC abgegossenen Wachsschalungen (Bild 16, Mitte) und dem UHPC-Abguss selbst (Bild 16, rechts) zeigen sich hier am Beispiel der Blockgeometrie A die geometrischen Möglichkeiten und Einschränkungen der Wachsschalungstechnologie. Generell lässt sich feststellen, dass mit der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie

ishing with polishing pins is regarded as critical, since, based on experience with cutting tools with a defined cutting edge, the pore space is likely to clog quickly and cutting can no longer take place.

As already described, machining under compressed air and polymer solution leads to comparable results to dry machining with regard to the achieved surface roughness at high feed rates. The main advantage of the polymer solution is the almost complete avoidance of clogging at the tool cutting edges and, if present, in the cooling channels. For machining under polymer solution, a suitable chip removal concept must be available in the machine tool to prevent agglomeration of chips in the lubricant-conveying lines and clogging of the slotted screens. For this purpose, it is advisable to first collect coarse chips directly in the machining area. Fine chips can be filtered with suitable gravity precoat filters. Another possibility is the use of a chamber filter, also called a sedimentation filter. In this case, the fine chips float on top and can be skimmed off. The last stage of the chamber filter thus pumps only cleaned cooling lubricant back into the circuit.

4.4 Casting the wax formwork with UHPC

The wax formwork panels milled at the IMF were placed into a standard formwork at the ITE, coated with a thin layer of release agent and cast with UHPC (Fig. 16, left).

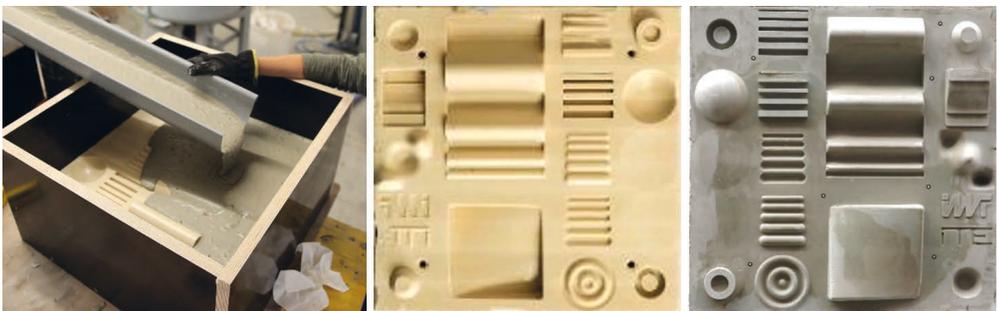


Bild 16: Herstellung der UHPC-Proben (Block A); von links nach rechts: Betonieren, CPW-Wachsschalung nach dem Ablösen des UHPC, UHPC-Abguss | **Fig. 16:** Manufacturing of UHPC samples (type A); from left to right: casting with UHPC, CPW wax formwork after demoulding, UHPC cast

auch großformatige, stark strukturierte UHPC-Bauteile detailgetreu hergestellt werden können. Besonders die robusten uni- und multidirektional gekrümmten Oberflächen, die runden und pyramidenförmigen Stümpfe sowie die abgerundeten Stege und Nuten zeigen ein sehr stabiles und detailgetreues Abformungsverhalten im UHPC. Einschränkungen gibt es hingegen bei den feingliedrigen Elementen wie der Schrift und den rechteckigen Stegen und Nuten. Die herausstehenden rechteckigen Stege auf dem Wachsblock (seitlicher Entformungswinkel von 2°) reißen ab einem Aspektverhältnis > 1 beim Entschalungsprozess ab. Bei den Nuten verhält es sich ähnlich, nur dass hier ab einem Aspektverhältnis > 4 der UHPC im Entschalungsprozess abreißt und in der Wachsschalung verbleibt. Die so aufgezeigten Grenzen sind beim Entwurf von Betonbauteilen unter Verwendung von Wachsschalungen zu berücksichtigen.

5 Optische Vermessung der Wachsschalungen und der Betonabgüsse

Die CFW-Wachsschalungen (Wachsschalafeln) wurden jeweils vor und nach dem UHPC-Abguss zusammen mit den UHPC-Abgüssen selbst bei der Firma GOM mbH, Braunschweig, mit einem handelsüblichen 3D-Scanner (Typ ATOS) digitalisiert. Mit der Software GOM Inspect [7] wurde eine Form- und Maßanalyse im Vergleich zu den ursprünglichen CAD-Daten durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

By visually comparing the wax moulds cast with UHPC (Fig. 16, centre) and the UHPC cast itself (Fig. 16, right), the geometric possibilities and limitations of the wax mould technology are shown here using the example of block geometry A. In general, it can be said that the non-waste wax formwork technology can also be used to produce large-format, highly structured components made of UHPC with great attention to detail. Especially the robust uni- and multidirectional curved surfaces, the round and pyramid-shaped dies as well as the rounded webs and grooves show a very stable and detailed impression behaviour in UHPC. However, there are limitations with the finely structured elements such as the lettering and the rectangular bars and grooves. It was found that the protruding rectangular bars on the wax block (lateral demoulding angle of 2°) break off during the demoulding process if the aspect ratio is greater than 1. The situation is similar with the grooves, except that from an aspect ratio greater than 4, the UHPC breaks off during the demoulding process and remains in the wax mould. The limits shown in this way must be taken into account when designing concrete components using wax formwork.

5 Optical measurement of milled formwork and concrete casts

The CFW wax formwork panels were each digitalised before and after the UHPC casting together with the UHPC castings themselves

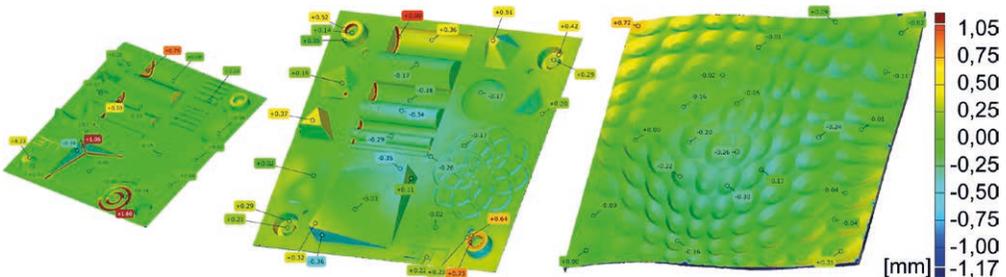


Bild 17: Vergleich zwischen Scandaten der CFW-Wachsblöcke A-C und dem CAD-Datensatz | Fig. 17: Comparison between the scan data of the CFW wax blocks A-C and the original CAD data set of formwork



Bild 18: Vergleich zwischen Scandaten der CFW-Wachsblöcke A–C vor und nach dem Abguss mit UHPC | **Fig. 18:** Comparison between the scan data of the CFW wax blocks A–C before and after the UHPC cast

Der erste Flächenvergleich (Bild 17) zeigt im Falschfarbenbild den senkrechten Abstand jedes einzelnen gescannten Polygonpunktes (IST des real hergestellten Wachsblockes) in Bezug zu dem originalen CAD-Wert der Zeichnung (SOLL).

Bei den Wachsschalungen der Blöcke A–C weisen die ebenen, uni- und multidirektional gekrümmten Oberflächen eine Genauigkeit im Zehntelmillimeterbereich gegenüber dem CAD-Datensatz auf. Größere Abweichungen im Millimeterbereich sind lediglich an den vertikalen bzw. 2° geneigten Flanken, an rechtwinkligen Innenkanten und in den Senken der kreisförmigen Wellengeometrie zu finden.

Durch den Vergleich der Scandaten der Wachschalungen der Blöcke A–C vor und nach dem Abguss mit UHPC (Bild 18) wird deutlich, dass diese auch nach einer Beanspruchung durch den Frischbetondruck des UHPC und die Kräfte beim Entschalen eine sehr hohe Formtreue aufweisen und ohne weiteres wiederverwendet werden könnten.

at GOM mbH, Braunschweig, using a standard 3D scanner (type ATOS). The GOM Inspect software [7] was used to perform a shape and dimensional analysis in comparison to the original CAD data. The results are presented below.

The first surface comparison (Fig. 17) shows in the false-color image the vertical distance of each scanned polygon point (ACTUAL of the actually produced wax block) in relation to the original CAD value of the drawing (NOMINAL).

In the wax moulds of blocks A–C, the plane, uni- and multidirectionally curved surfaces have an accuracy in the tenth of a millimetre range compared to the CAD data set. Larger deviations in the millimetre range are only found on the vertical or 2° inclined flanks, on right-angled inner edges and in the depressions of the circular wave geometry.

By comparing the scan data of the wax moulds of blocks A–C before and after casting with



Bild 19: Flächenvergleich zwischen Scandaten der hergestellten UHPC-Abgüsse und CAD-Datensätzen | **Fig. 19:** Surface comparison between the scan data of the UHPC casts and the original CAD data

In Analogie zum ersten Flächenvergleich des Wachsblockes wurden auch die Scandaten des UHPC-Abgusses mit dem CAD-Datensatz des herzustellenden Bauteils verglichen (Bild 19). Hier wurde eine für das Bauwesen sehr hohe Präzision erreicht. Wie in Bild 19 dargestellt, entstehen durch den UHPC-Abguss an den jetzt invertierten Bereichen der Formenbausteine, wie z. B. einigen Flanken, rechtwinkligen Außenkanten und in den Erhöhungen der kreisförmigen Wellengeometrie, etwas höhere Abweichungen analog zur bereits beschriebenen Abweichung der Wachsschalung.

Anhand der durchgeführten Maßanalysen wird deutlich, dass sich das ausgewählte Wachs CFW auch bei vergleichsweise großen Bauteilabmessungen sehr präzise spanend bearbeiten lässt und die im Wachs gefertigten Geometrien eine für das Bauwesen überaus hohe Formtreue der UHPC-Abgüsse aufweisen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen im Forschungsprojekt haben gezeigt, dass sich das ausgewählte Industriegusswachs CFW für die Herstellung von präzisen Schalungen für komplexe, frei geformte Bauteile aus Beton und insbesondere UHPC eignen. Die physikalisch-technischen Eigenschaften, wie der E-Modul und die Festigkeit, liegen dabei für die Anwendung im Betonschalungsbau bei Temperaturen bis 40 °C in einem günstigen Bereich: starr genug, um hohen Frischbetondrücken standzuhalten und weich genug für eine effiziente spanende Bearbeitung. Die Bearbeitbarkeit des Industriegusses mittels CNC-gesteuerter Zerspänung konnte am IWF durch geeignete Werkzeuge und Bearbeitungsparameter nachgewiesen und effizient gestaltet werden. Hinsichtlich der eingesetzten Werkzeuge wurden der Messerkopfräser mit einer Schneidenanzahl $z = 8$ sowie der Walzenstirnfräser als gut geeignet identifiziert, um bei moderaten Vorschubgeschwindigkeiten ($v_f < 15 \text{ m/min}$) hohe Zeitspannvolumen bei guter Oberflächenqualität zu fertigen. Diese Werkzeuge eignen sich zudem sehr gut zur Schrupp-

UHPC (siehe Fig. 18), es wird deutlich, dass sie eine sehr hohe dimensionale Genauigkeit auch nach dem Fräsen durch den UHPC-Druck und die Kräfte beim Entformen zeigen und wiederverwendet werden können.

In Analogie zum ersten Oberflächenvergleich des Wachsblockes, wurden die Scandaten des UHPC-Abgusses ebenfalls mit dem CAD-Datensatz des Bauteils verglichen (Fig. 19). Hier wurde ein sehr hohes Maß an Präzision erreicht. Wie in Fig. 19 dargestellt, entstehen durch den UHPC-Abguss an den jetzt invertierten Bereichen der Formenbausteine, wie z. B. einigen Flanken, rechtwinkligen Außenkanten und in den Erhöhungen der kreisförmigen Wellengeometrie, etwas höhere Abweichungen analog zur bereits beschriebenen Abweichung der Wachsschalung.

Auf Basis der Dimensionalanalysen wird deutlich, dass sich das ausgewählte Wachs CFW auch bei vergleichsweise großen Bauteilabmessungen sehr präzise spanend bearbeiten lässt und die im Wachs gefertigten Geometrien eine für das Bauwesen überaus hohe Formtreue der UHPC-Abgüsse aufweisen.

6 Summary and conclusion

The investigations carried out in the research project have shown that the selected CFW industrial wax is suitable for the production of precision formwork for complex, freely formed components made of concrete and especially UHPC. The physical-technical properties, such as the modulus of elasticity and strength, are in a favourable range for use in concrete formwork construction at temperatures up to 40 °C: rigid enough to withstand high fresh concrete pressures and soft enough for efficient machining. The machinability of the industrial wax by means of CNC-controlled machining could be proven and efficiently designed at the IMF by using suitable tools and machining parameters. With regard to the tools used, the cutter head

bearbeitung ebener Bauteile, da mit hohen Zustellertiefen gefräst werden kann.

Zur Fertigung von Nuten und feinen Strukturen kamen Schafffräser zum Einsatz, deren Durchmesser der jeweiligen Strukturfeinheit angepasst wurden. Bei der Fertigung von Nuten und Stegen ist eine minimale Stegbreite zwischen den einzelnen Strukturen von 5 mm einzuhalten, um Ausbrüche und Beeinflussungen angrenzender Elemente zu vermeiden. Die einzelnen Formenbausteine wurden mit hoher Präzision gefertigt, die resultierenden Oberflächenrauheiten hatten keinen Einfluss auf die spätere Entformbarkeit des Betonabgusses. Es wurden sowohl mehrfach gekrümmte Flächen als auch Elemente mit hohen Aspektverhältnissen gefertigt, wobei sich die Spanabfuhr aus der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück als wichtiger Einfluss herausgestellt hat. Es ist zu empfehlen, die Schlichtbearbeitung gefertigter Wachsschalungen mit einer Bürstoperation abzuschließen, um so Restspäne aus den Formenbausteinen zu entfernen. Ein Verschleiß der eingesetzten Werkzeuge lag bei der Zerspannung des Wachses CFW nicht vor. Auftretende Anhaftungen an den Werkzeugen konnten durch den Einsatz von Druckluft teilweise und unter Verwendung von Kühlschmierstoff beinahe vollständig vermieden werden.

Es wurde gezeigt, dass nicht nur die Wachsschalungen, sondern auch die damit hergestellten Betonbauteile eine für das Bauwesen sehr hohe Präzision aufweisen. Vornehmlich einiger punktueller fertigungsbedingter Abweichungen liegen die gemessenen Herstellungstoleranzen lediglich im Zehntelmillimeterbereich.

Durch die Möglichkeit, die erzeugte Wachsspäne sowie die ausgedienten Wachsschalungselemente durch Einschmelzen vollständig wiederzuverwenden (*Closed Loop Recycling*), stellt die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie eine ökologisch und ökonomisch effiziente Alternative zu den heutigen Freiformschalungen dar. Durch das Einschmelzen des Wachses können die Materialkosten dabei je Einsatz auf ein vergleichbares Kostenniveau von E-PS und X-PS gesenkt

with a number of cutting edges $z = 8$ and the shell end mill were identified as being well suited to produce high metal removal rates with good surface quality at moderate feed rates ($v_f < 15$ m/min). These tools are also very well suited for roughing flat components, since milling can be carried out with high infeed depths. For the production of grooves and fine structures, end mills were used whose diameters were adapted to the respective structural fineness. When manufacturing grooves and webs, a minimum web width between the individual structures of 5 mm must be maintained in order to avoid chipping and influencing adjacent elements. The individual mould modules were manufactured with high precision, the resulting surface roughness had no influence on the later demoldability of the concrete cast. Both multi-curved surfaces and elements with high aspect ratios were manufactured, whereby the chip removal from the contact zone between tool and workpiece proved to be an important influence. It is recommended to finish the finishing of manufactured wax moulds with a brushing operation to remove residual chips from the mould components. There was no wear of the tools used when machining the CFW wax. Adhesions on the tools could be partly avoided by using compressed air and almost completely by using cooling lubricant.

It was shown that not only the wax formwork, but also the concrete components produced with it exhibit a very high precision for the construction industry. Mainly some punctual production-related deviations, the measured production tolerances are only in the range of a tenth of a millimetre.

Due to the possibility of completely reusing the produced wax chips as well as the used wax formwork elements by melting them down (closed loop recycling), the non-waste wax formwork technology represents an ecologically and economically efficient alternative to today's open-face formwork. By melting down the wax, the material costs per application can be reduced to a comparable cost level of E-PS and X-PS, while significantly better material prop-

werden, wohingegen aber deutlich bessere Materialeigenschaften – vergleichbar mit denen von Polyurethan (Dichte: 700 kg/m³) – erreicht werden. Als Ergebnis des Forschungsprojektes ist das Industriewachs CFW unter der Bezeichnung „ConFormWax“ (*Concrete Formwork Wax*) jetzt als Schalungswachs auf dem Markt erhältlich.

Basierend auf diesen guten grundlegenden Ergebnissen und dem Bedürfnis der Industrie nach nachhaltigen Freiformschalungen soll die Non-Waste-Wachsschalungstechnologie zukünftig in industriellen Anwendungen umgesetzt werden. In zwei Forschungsprojekten wird derzeit am ITE gemeinsam mit Industriepartnern die Weiterentwicklung und damit Übertragbarkeit der Technologie in die Industrie erarbeitet.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 257109752 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

erties – comparable to those of polyurethane (density: 700 kg/m³) – are achieved. As a result of the research project, the CFW industrial wax is now available on the market as formwork wax under the name “ConFormWax” (Concrete Formwork Wax).

Based on these good basic results and the industry's need for sustainable open-ended formwork, the non-waste wax formwork technology is to be implemented in industrial applications in the future. Two research projects are currently being carried out at the ITE together with industrial partners to further develop the technology and thus make it transferable to industry.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (number 257109752) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Kloft, H.; Mainka, J.; Ledderose, L.; Neudecker, S.; Petri, J.: Hochleistungswerkstoff – Bauen mit Beton im Zeitalter digitaler Planung und Fertigung. DBZ – Deutsche Bauzeitschrift (2016) 2, S. 60–64
- [2] Mainka, J.; Kloft, H.; Baron, S.; Hoffmeister, H.-W.; Dröder, K.: Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisionsschalungen aus recycelbaren Industriewachsen. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 784–793
- [3] Mainka, J.; Heinemann, T.; Kloft, H.: A novel recyclable wax formwork-system for high-precision free-form UHPC members and joints. In: Brasil, R.; Pauletti, R. (Hrsg.): Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints – Proc. of the IASS-SLTE 2014 Symp., 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 2014, 8 S.
- [4] Mainka, J.; Kloft, H.; Stein, E.: A novel precise formwork technology based on CNC milled recyclable industrial wax for the casting of geometrically complex concrete elements. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Symp. 2015 & ISOFF Symp., 17.–20.08. & 16./17.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-517423, publiziert auf USB-Stick: 12 S.
- [5] Mainka, J.; Kloft, H.; Stein, E.; Wirth, F.: Non-Waste wax formwork-technology: Innovative precision formwork for concrete members made of recyclable industrial waxes. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, Beitrag Nr. 9575, Book of Abstracts: S. 180, Langfassung digital: 10 S.
- [6] Mainka, J. L. C.: Non-Waste-Wachsschalungen – Entwicklung einer Wachsschalungstechnologie für geometrisch komplexe Betonbauteile (Non-Waste-Wax-Formwork technology). Diss., TU Braunschweig, 2019 – <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201906111155-0>
- [7] GOM Inspect – Auswertesoftware für 3D-Messdaten. Download: <http://www.gom.com/de/3d-software/gom-inspect.html> [Zugriff: 02.08.2016]

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures: 1, 2, 11, 12, 14, 16–19: Jeldrick Mainka, ITE TU Braunschweig
- Bilder | Pictures: 3–10, 13, 15: Sarah Baron

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisions-Schalungen aus 100 % recycelbaren Industrie-Wachsen zur Herstellung von geometrisch komplexen Beton-Bauteilen | Non-Waste-Wax-Formwork: Novel precise formwork-technology on basis of 100% recyclable industrial wax for the fabrication of geometrically complex concrete elements

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder Institutsleiter Institute's director
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	DR 973/3-1 (Projektnummer Project number: 257109752)
Adresse Address:	TU Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), Langer Kamp 19b, 38106 Braunschweig
Kontakt Contact:	+49 531 391 7600 k.droeder@tu-braunschweig.de https://www.tu-braunschweig.de/iwf/fup
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft Institutsdirektor Institute's director
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	KL 2119/2-1 (Projektnummer Project number: 257109752)
Adresse Address:	TU Braunschweig, Institut für Tragwerksentwurf (ITE), Pockelsstraße 4, 38106 Braunschweig
Kontakt Contact:	+49 531 391 3571 h.kloft@tu-braunschweig.de www.ite.tu-bs.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.12.2014–29.11.2016
Team Team:	IWF: Sarah Baron, Hans Werner Hoffmeister ITE: Jeldrik Mainka

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Mainka, J.; Heinemann, T.; Kloft, H.: A novel recyclable wax formwork-system for high-precision free-form UHPC members and joints. In: Brasil, R.; Pauletti, R. (Hrsg.): Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints – Proc. of the IASS-SLTE 2014 Symp., 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 2014, 8 S.
- Mainka, J.; Kloft, H.; Stein, E.: A novel precise formwork technology based on CNC milled recyclable industrial wax for the casting of geometrically complex concrete elements. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Symp. 2015 & ISOFF Symp., 17.–20.08. & 16./17.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-517423, publ. auf USB-Stick: 12 S.
- Kloft, H.; Mainka, J.; Ledderose, L.; Neudecker, S.; Petri, J.: Hochleistungswerkstoff – Bauen mit Beton im Zeitalter digitaler Planung und Fertigung. DBZ – Deutsche Bauzeitschrift (2016) 2, S. 60–64
- Mainka, J.; Kloft, H.; Baron, S.; Hoffmeister, H.-W.; Dröder, K.: Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisionsschalungen aus recycelbaren Industriewachsen. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 784–793
- Mainka, J.; Kloft, H.; Stein, E.; Wirth, F.: Non-Waste wax formwork-technology: Innovative precision formwork for concrete members made of recyclable industrial waxes. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, Beitrag Nr. 9575, Book of Abstracts: S. 180, Langfassung digital: 10 S.
- Hermann, E.; Mainka, J. L. C.; Lindemann, H.; Wirth, F.; Kloft, H.: Digitally Fabricated Innovative Concrete Structures. In: Teizer, J.; König, M. (Hrsg.): Proc. of the 35th Int. Symp. on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2018), 20.–25.07.2018 in Berlin, 2018, Beitrag Nr. 127, S. 553–560 (publ. digital), 8 pages – <https://doi.org/10.22260/ISARC2018/0077>
- Mainka, J.; Wirth, F.; Herrmann, E.; Kloft, H.: INDUSTRIALIZING THE NON-WASTE-WAX-FORMWORK TECHNOLOGY. In: Proc. of the 1st Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete (ICCDF) 2018, 10.–12.09.2018 in Zürich (Schweiz), 2018, S. 153–154 (published digitally)

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertationen | Dissertations

- Mainka, J. L. C.: Non-Waste-Wachsschalungen – Entwicklung einer Wachsschalungstechnologie für geometrisch komplexe Betonbauteile (Non-Waste-Wax-Formwork technology). ITE, 2019 – <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201906111155-0>
- Wirth, F. W.: Untersuchungen zur Eignung der Non-Waste-Wachsschalungstechnologie für die automatisierte, individuelle Fertigung von Betonbauteilen. ITE, 2020 – https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs_mods_00068999

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Modulares und vollautomatisiertes Fertigungsverfahren für frei geformte Betonschalungen im Hochbau auf Basis von technischen Wachsen | Development of a modular and fully automatic production process for freeform concrete formwork in building construction based on technical wax

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Förderer Funding:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), ZIM
Laufzeit Period:	01.04.2017–31.03.2019
Partner Partner:	B+S Engineering, Rheine
Web:	https://www.tu-braunschweig.de/ite/forschung/modularewachsschalung

- Innovative Non-Waste-Wachsschalungen für die Herstellung von hochpräzisen Maschinengestellen aus UHPC | Innovative Non-Waste-Wax-Formwork for the fabrication of high-precision machine frames made by UHPC

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Mitverantwortliche Co-Investigators:	Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann (TU Braunschweig), Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder, Prof. Dr. Henning Menzel (TU Braunschweig)
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project
Laufzeit Period:	01.01.2018–31.12.2019
Partner Partners:	Sudholt-Wasemann GmbH, Herzebrock-Clarholz Dyckerhoff GmbH, Wiesbaden
Web:	https://www.tu-braunschweig.de/ite/forschung/innovativewachsschalungen

- SFB/Transregio 277: Additive Fertigung im Bauwesen – Die Herausforderung des großen Maßstabs | CRC/Transregio 277: Additive manufacturing in construction – The challenge of large scale

Sprecher Speaker:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 277
Laufzeit Period:	seit since 01.01.2020
Partner Partner:	TU München
Web:	https://www.tu-braunschweig.de/trr277

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- 14.02.2017, 61. Ulmer BetonTage: Innovationspreis 2017 der Zulieferindustrie Betonbauteile für die Entwicklung von Non-Waste-Präzisionsschalungen aus 100 % recycelbaren Industriewachsen | Innovation Prize of the Supplier Industry for Structural Concrete Products 2017 for the development of non-waste precision formwork made of 100% recyclable industrial waxes
- Jeldrik Mainka: Matthäi-Preis der Fakultät 3 Architektur, Bau- und Umweltwissenschaften der TU Braunschweig für die Dissertation, Braunschweig 2020 | Matthäi-Prize of the Faculty 3 Architecture, Building and Environmental Sciences of the TU Braunschweig for the dissertation, Braunschweig 2020

Ultraleichte, dünnwandige stabförmige Betonhohlbauteile | Ultra-light, thin-walled hollow concrete members

- ▶ Daniel Busse, Martin Empelmann
- ▶ Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), FG Massivbau, Technische Universität Braunschweig

1 Einleitung

Das Prinzip „Leicht Bauen mit Beton“ kann durch stabförmige Bauelemente außerordentlich gut umgesetzt werden, da einwirkende Beanspruchungen konzentriert und optimiert aufgenommen werden können. Stabförmige Bauelemente gehören zu den maßgebenden Bestandteilen von Mast- und Turmkonstruktionen sowie Fachwerk- und Rahmenstrukturen (Bild 1). Obgleich die Stäbe in diesen Konstruktionen überwiegend normalkraftbeansprucht sind, führen horizontale Beanspruchungen z. B. infolge Wind sowie Einspannungen in den Verbindungsknoten zu Biege- und Querkraftbeanspruchungen. Daneben sind nahezu alle räumlichen Konstruktionen durch einseitige oder unsymmetrische Beanspruchungen einer gewollten oder ungewollten Torsionsbeanspruchung unterworfen.

Kreisrunde Querschnitte weisen unter diesen Beanspruchungen eine günstige Formgebung auf. Sie sind kompakt und bieten Umwelteinflüssen wenig Angriffsfläche, sind architektonisch anspruchsvoll und strömungsmechanisch günstig. Werden Hohlprofile eingesetzt, kann die Leistungsfähigkeit bei gleichbleibendem Materialeinsatz gesteigert werden (Bild 2). Ferner ermöglichen Hochleistungsbetone durch eine Reduktion der Querschnittsabmessungen bei zugleich erhöhter Dauerhaftigkeit eine weitergehende Optimierung. Im Rahmen des Projektes wurden daher dünnwandige stabförmige Be-

1 Introduction

The principles of “Concrete Light” apply extraordinarily well to tubular concrete members, as applied stresses can be absorbed in a concentrated and optimized way. Tubular members are decisive components of mast and tower constructions as well as of truss and frame structures (Fig. 1). Although tubular members in such constructions are predominantly subjected to normal forces, horizontal loads (e.g. due to wind) and rigid joints lead to secondary bending moments and shear forces. In addition, as a result of one-sided or asymmetrical loads, almost all spatial constructions are subjected to intentional or unintentional torsion.



Bild 1: Anwendungsmöglichkeiten für ultraleichte, dünnwandige Betonhohlbauteile, hier: King's Cross, London | **Fig. 1:** Possible applications of ultra-light, thin-walled hollow concrete members: King's Cross, London

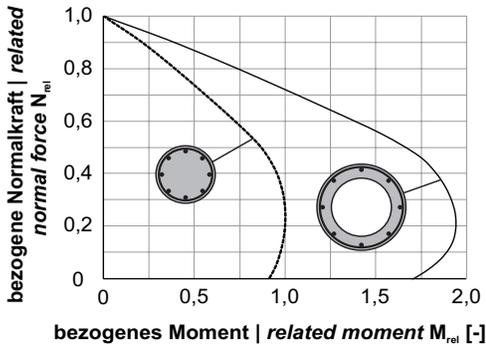


Bild 2: Vergleich der M-N-Interaktion eines Kreis- und eines Kreisringquerschnitts mit identischer Querschnittsfläche | **Fig. 2:** Comparison of the M-N interaction of a circular and a circular hollow cross section with identical cross-sectional area

tonhohlbauteile mit Wandstärken von teilweise nur 25 mm untersucht (Bild 3). In der ersten Phase wurden neben dem Tragverhalten der dünnwandigen Betonhohlbauteile unter Druckbeanspruchung weitere Fragestellungen hinsichtlich der Bewehrungs-, Beton- und Schalungstechnik adressiert. In der zweiten Phase wurde darauf aufbauend das Tragverhalten dünnwandiger Betonbauteile unter Biege-, Querkraft- und Torsionsbeanspruchung betrachtet.

2 Herstellung ultraleichter, dünnwandiger Betonhohlbauteile

2.1 Bewehrungskonzepte

Da eine konventionelle Bewehrung bei den gewählten sehr geringen Wandstärken nicht ausführbar ist, wurden drei alternative Bewehrungskonzepte untersucht (Bild 3):

- Bewehrungskonzept A: Längsbewehrung: hochfeste Stäbe SAS670 Ø 18 mm, vergrößerte Wandstärke im Bereich der Längseisen erforderlich; Querbewehrung: Ringbügel aus B500 Ø 6 mm, Bügelabstand 10 cm,
- Bewehrungskonzept B: längs: konventioneller Betonstahl B500, Ø 4 mm; Querbewehrung: Ringbügel aus B500, Ø 6 mm, Bügelabstand 6 cm,
- Bewehrungskonzept C: mehrlagige Mikrobewehrung aus geschweißten Drahtgittern aus

Circular cross-sections are advantageous under such conditions as they offer little surface for environmental influences, are flow-mechanically favourable and architecturally sophisticated. When using circular hollow cross-sections, the performance can be increased while using the same amount of material (Fig. 2). Furthermore, high-performance concrete allows an additional optimization, achieved by reducing the cross-section dimensions and increasing durability at the same time. Within the scope of the project thin-walled tubular concrete members with circular hollow cross sections and wall thicknesses as low as 25 mm were examined (Fig. 3). In the first phase, in addition to investigations on the load-bearing behaviour of such thin-walled tubular concrete members, further questions regarding reinforcement, concrete and formwork technology were addressed. In the second phase, the load-bearing behaviour of thin-walled concrete members under bending, shear and torsion was examined.

2 Manufacturing of ultra-light, thin-walled hollow concrete members

2.1 Reinforcement concepts

Since conventional reinforcement is not applicable to low wall thicknesses, three alternative reinforcement concepts were investigated (Fig. 3):

- Reinforcement concept A: longitudinal reinforcement: high-strength rebars SAS670, Ø 18 mm, local increase in wall thickness is required; transverse reinforcement: loops of B500, Ø 6 mm, spacing of 10 cm,
- Reinforcement concept B: longitudinal: conventional rebars B500, Ø 4 mm; transverse: loops of B500 Ø 6 mm, spacing of 6 cm,
- Reinforcement concept C: multi-layer micro-reinforcement made of welded wire meshes of stainless steel St1.4301, wire diameters between 0.5 and 2.0 mm, mesh sizes of 10 to 50 mm.

The material properties of the reinforcements were determined on the basis of compression

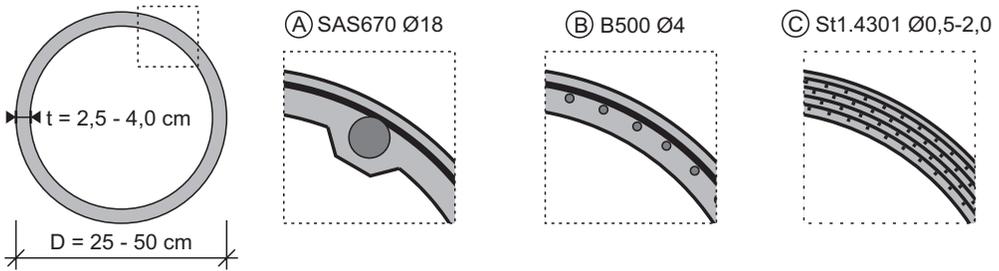


Bild 3: Bewehrungskonzepte A bis C | Fig. 3: Reinforcement concepts A to C

Edelstahl St1.4301, Drahtdurchmesser zwischen 0,5 und 2,0 mm, Maschenweiten von 10 bis 50 mm.

Die Materialeigenschaften der Bewehrungsmaterialien wurden in Druck- und Zugprüfungen ermittelt [1], [2]. Während für den SAS670 sowie den B500 Druckprüfungen möglich waren, konnten die Mikrobewehrungsdrähte nur im Zugversuch geprüft werden. Eine mathematische Beschreibung der Spannungs-Stauchungs- bzw. Spannungs-Dehnungs-Beziehungen kann mit den Modellen nach Mander [3] bzw. Dhakal/Maekawa [4] erfolgen (Bild 4).

2.2 Betonauswahl und -eigenschaften

Um die ultraleichten, dünnwandigen Betonhohlbauteile in gleichmäßig hoher Qualität herstellen zu können, war ein Beton erforderlich, der:

and tensile tests [1], [2]. While compression tests were possible for SAS670 and B500, the micro-reinforcement wires could only be tested in tension. The stress-strain relationships in compression or tension can be mathematically described by the models according to Mander [3] or Dhakal/Maekawa [4] (Fig. 4).

2.2 Concrete selection and properties

To manufacture the ultra-light, thin-walled hollow concrete members at consistently high quality levels, it was necessary to use a concrete that:

- achieves a high flowability and fully integrates the reinforcement, especially the thin micro-reinforcement meshes,
- allows a dense concrete structure and a small pore volume to ensure durability, and
- achieves a compressive strength in the range of high-strength concretes.

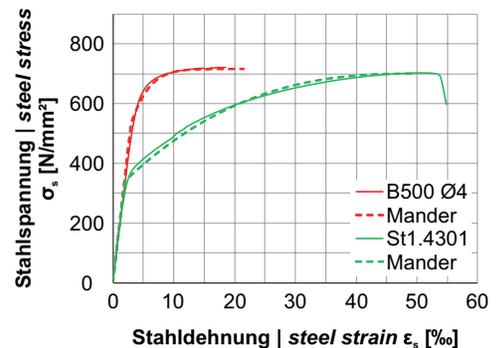
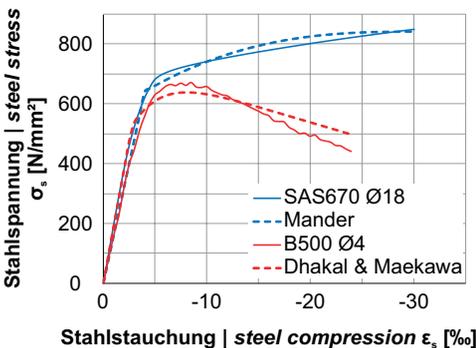


Bild 4: Experimentelle Spannungs-Stauchungs- bzw. Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der Bewehrungen und rechnerische Beziehungen nach Mander [3] bzw. Dhakal und Maekawa [4] | Fig. 4: Stress-compression resp. stress-strain relationships of the reinforcements from tests and calculated acc. to Mander [3] or Dhakal & Maekawa [4]

Materialparameter Material parameter	Abmessungen Dimensions [mm]	Anzahl Number [-]	Mittelwert Mean value [N/mm ²]	Variationskoeffizient Variation coefficient [%]
Zylinderdruckfestigkeit Compressive cylinder strength [9]	Ø150/300	106	94,0	4,6
Würfeldruckfestigkeit Compressive cube strength [10]	40/40/40	104	97,1	5,8
Zentrische Zugfestigkeit Axial tensile strength [11]	Ø80/300	60	7,5	9,5
Spaltzugfestigkeit Splitting tensile strength [12]	Ø150/300	42	6,5	11,8
	Ø80/160	60	7,3	10,2
Biegezugfestigkeit Flexural strength [13]	700/150/150	62	10,9	12,9
	160/40/40	73	12,9	9,1

Tabelle 1: Materialeigenschaften des hochfesten Feinkornbetons | **Table 1:** Material properties of high-strength concrete with fine aggregate

- eine hohe Fließfähigkeit erreicht und die Bewehrung, insbesondere die feinen Mikrobewehrungsgitter, vollständig einbindet,
- eine dichte Betonstruktur und ein geringes Porenvolumen zur Sicherung der Dauerhaftigkeit ermöglicht und
- eine Betondruckfestigkeit erzielt, die im Bereich hochfester Betone liegt.

Auf Basis dieses Anforderungsprofils wurde ein hochfester, selbstverdichtender Feinkornbeton (Größtkorn $d_g = 2 \text{ mm}$) basierend auf der Bindepungsmischung Flowstone ausgewählt [5]. Die Festboneigenschaften des hochfesten Feinkornbetons wurden anhand von Begleitkörperprüfungen ermittelt (Tabelle 1, [5], [6]). Neben der Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit $f_{cm,cyl}$ bzw. $f_{cm,cube}$ wurde in weggeregelten Druckprüfungen die Spannungs-Stauchungs-Beziehung bestimmt, die über die Spannungs-Dehnungs-Linie für nichtlineare Verfahren gemäß DIN EN 1992-1-1/NA (EC2/NA [7], [8]) abgebildet werden kann (Bild 5).

Bei der Bestimmung der Betonzugfestigkeit wurde ein Einfluss des Versuchsaufbaus (zentrische Zugfestigkeit f_{ctm} , Biegezugfestigkeit $f_{ctm,fl}$, Spaltzugfestigkeit $f_{ctm,sp}$), der Größe der Versuchskörper (vgl. Tabelle 1) sowie der Lagerungsbedingungen (Wasserlagerung, Hallenlagerung) festgestellt. Letztlich konnte gezeigt werden, dass mit kleinformatigen, wassergela-

Based on these requirements, a high-strength, self-compacting concrete with fine aggregates (maximum aggregate size $d_g = 2 \text{ mm}$) was selected based on the compound Flowstone [5]. The material properties of the hardened concrete with fine aggregates were obtained by accompanying tests (Table 1, [5], [6]). In addition to the cylinder and cube compressive strength ($f_{cm,cyl}$ resp. $f_{cm,cube}$), the stress-compression relationship could be determined by compression tests with path-controlled loading and illustrated by the stress-strain curve for non-linear methods in accordance with DIN EN 1992-1-1/NA (EC2/NA [7], [8], Fig. 5).

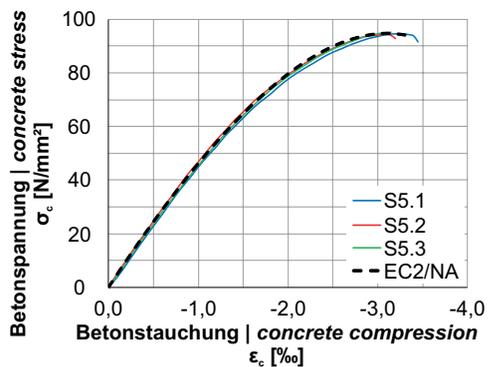


Bild 5: Spannungs-Stauchungs-Beziehung des hochfesten Feinkornbetons und rechnerische Beziehung nach EC2/NA | **Fig. 5:** Stress-compression relationship of high-performance concrete with fine aggregates and calculated relationship as by EC2/NA

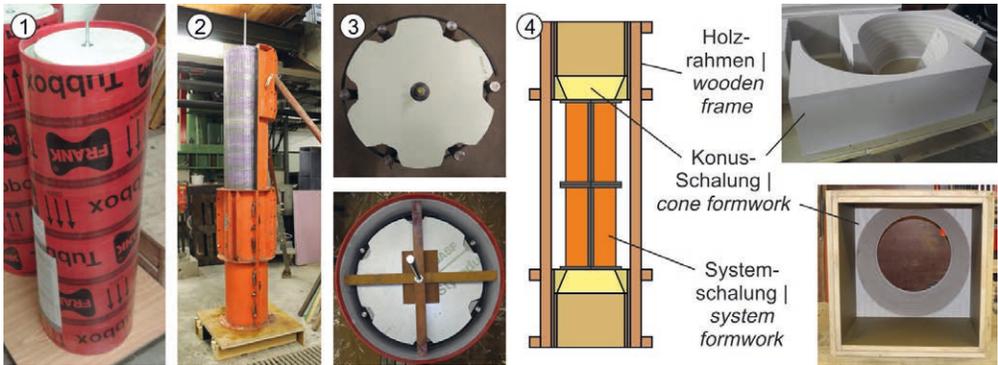


Bild 6: Schalungssysteme zur Herstellung dünnwandiger Betonhohlbauteile: Kunststoff-Außenschalung (1), Systemschalung (2), Innenschalung aus Polystyrol (3) und Schalung für Torsionsversuchskörper (4) | **Fig. 6:** Formwork for the manufacturing of thin-walled hollow concrete members: Outer plastic formwork (1), system formwork (2), inner formwork made of polystyrene (3) and formwork for torsional specimens (4)

gerten Begleitkörpern Materialkennwerte ermittelt werden können, die auf dünnwandige Bauteile übertragbar sind.

2.3 Schalungskonzept

Zur Herstellung der dünnwandigen Betonhohlbauteile musste ein innovatives Schalungskonzept entwickelt werden [5], [14]. Dies sieht als Außenschalung bei Bauteillängen von maximal 1,50 m eine Rohrschalung aus stabilem Kunststoff (Bild 6 (1)), bei längeren Körpern ein Schalsystem für Rundstützen vor (Bild 6 (2)). Als Innenschalung wurde eine verlorene Schalung aus geschäumtem Polystyrol eingesetzt (Bild 6 (3)), womit auch eine Formgebung im Innenbereich möglich war.

Zur Herstellung der Torsionsversuchskörper (vgl. Abschnitt 7) war eine Ergänzung des Schalungskonzeptes erforderlich. Für die konischen Übergangsbereiche wurde eine gefräste Schalung aus Obomodulan sowie für die Lasteinleitungsblöcke eine Holzschalung verwendet (Bild 6 (4)).

It was found that the test setup (axial tensile strength f_{ctm} , flexural strength $f_{ctm,fl}$, splitting tensile strength $f_{ctm,sp}$), the size of the specimens (cf. Table 1) and the storage conditions (water or laboratory storage) influence the determination of the concrete tensile strength. Eventually, it could be shown that small, water-stored specimens can be used to determine material properties comparable to those of thin-walled members.

2.3 Formwork concept

The manufacturing of the thin-walled hollow concrete members required an innovative formwork [5], [14]. A formwork made of stable plastic was chosen for the outer formwork of tubular columns with a maximum length of 1.50 m (Fig. 6 (1)). For larger specimens, a system formwork was used (Fig. 6 (2)). The inner core was made up of a lost foamed polystyrene formwork (Fig. 6 (3)) which also allowed internal shaping.

The manufacturing of the torsional specimens (cf. section 7) required additions to the formwork concept. A milled formwork made of Obomodulan was used for the conical transition areas as well as a wooden formwork for the loading areas (Fig. 6 (4)).

3 Tragverhalten ultraleichter, dünnwandiger Betonhohlbauteile unter exzentrischer Druckbeanspruchung

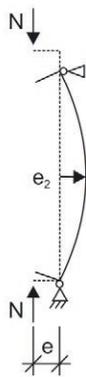
3 Load-bearing behaviour of ultra-light, thin-walled hollow concrete members under eccentric normal loads

3.1 Versuchskonzept

3.1 Test setup and test specimens

Die ersten experimentellen Untersuchungen wurden an dünnwandigen Betonhohlbauteilen unter einachsiger Normalkraftbeanspruchung mit geringer Exzentrizität durchgeführt [1], [2], [15]. Die Versuchskörper wurden in einer 10-MN-Druckprüfmaschine geprüft, wobei die Exzentrizität durch einen ausmittigen Einbau der Versuchskörper erzeugt wurde. Zur Auf-

The first experimental investigations were performed on thin-walled hollow concrete members under uniaxial normal loads with low eccentricities [1], [2], [15]. The tests were performed in a 10-MN-testing machine. The load eccentricity was generated by an eccentric installation of the specimens. Oppositely arranged strain gauges were applied to the deformation axis to measure the concrete strains. Inductive displacement transducers were used to record the bending deformations (e_2 , Fig. 7).



The tests were carried out in nine series of two to three test specimens (Table 2), during which generally identically configured specimens were examined under different eccentricities e . In the S7 series, differently reinforced specimens were tested with constant eccentricity. The reinforcement concepts (A–C) were varied between series in addition to the diameter D , the wall thickness t and the height H .

Bild 7: Versuchsaufbau und Messtechnik für die Versuche unter exzentrischer Druckbeanspruchung | **Fig. 7:** Test setup inclusive measurement technique of tests under eccentric normal force

Serie Series	Anzahl Number	Durchmesser Diameter D [cm]	Höhe Height H [cm]	Wandstärke Wall thickness t [cm]	Exzentrizität Eccentricity e [cm]	Bewehrungskonzept Reinforcement concept
S1	3	30	90	3,0	0,5 / 2,0 / 5,0	A 6 Ø 18
S2	3	50	150	3,0	0,5 / 2,0 / 5,0	A 6 Ø 18
S3	3	30	90	2,6	0,5 / 2,0 / 5,0	B 44 Ø 4
S4	3	30	90	2,6	0,5 / 2,0 / 5,0	B 44 Ø 4
S5	3	30	90	3,0	0,5 / 2,0 / 5,0	C Ø 2/50
S6	3	30	90	3,0	0,5 / 2,0 / 5,0	C Ø 0,5/10
S7	2	30	90	3,0	2,0	C gradiert graded
S8	3	30	150	3,0	5,0 / 10,0	C Ø 1/20
S9	2	50	150	2,5	0,5 / 2,0	C Ø 1/20

Tabelle 2: Konfiguration der Versuchskörper für Versuche unter exzentrischer Druckbeanspruchung | **Table 2:** Configuration of specimens for tests under eccentric normal force

nahme der Stauchungen des Betons wurden in der Verformungsachse gegenüberliegend Dehnungsmessstreifen appliziert. Zur Erfassung der Biegeverformungen e_2 wurden induktive Wegaufnehmer verwendet (Bild 7).

Die Tests wurden in neun Serien à zwei bis drei Prüfkörpern durchgeführt (Tabelle 2), in denen i. A. identisch konfigurierte Körper unter unterschiedlichen Exzentrizitäten e untersucht wurden. In Serie S7 wurden unterschiedlich bewehrte Proben bei gleicher Exzentrizität geprüft. Es wurden neben dem Bauteildurchmesser D , der Wandstärke t und der Bauteilhöhe H auch die Bewehrungskonzepte A–C variiert.

3.2 Versuchsergebnisse

Die Versuchskörper zeigten bis zu einem Lastniveau von 45–50 % eine lineare Zunahme der Verformung. Oberhalb dieser Grenze steigerte sich die Verformung nichtlinear (Bild 8). Bis zum Versagen konnten keine Rissbildung und keine sonstige Vorankündigung (z. B. akustisch) registriert werden. Die in den Versuchen beobachteten Versagensmodi und gemessenen Bruchstauchungen $\epsilon_{c,u}$ wurden maßgeblich durch das verwendete Bewehrungskonzept bestimmt:

- Der Versagensmechanismus der Versuchskörper mit Bewehrungskonzept A wurde durch ein schlagartiges Absprengen der Betondeckung eingeleitet. Der verbleibende Betonquerschnitt konnte die aufgebrachte Last nicht mehr aufnehmen, so dass die Lasten auf die Längsbewehrung umgelagert wurden, die daraufhin ausknickte (Bild 9, links). Hierbei wurde eine Bruchstauchung von im Mittel $\epsilon_{c,u} = -3,6 ‰$ erreicht.
- Bei den Versuchskörpern mit Bewehrungskonzept B kam es ebenfalls zu einem schlagartigen Absprengen der Betondeckung. Die Betonstauchung lag zu diesem Zeitpunkt im Mittel jedoch nur bei $\epsilon_{c,u} = -2,4 ‰$. Da die Betondruckfestigkeit bei den gemessenen Stauchungen nicht voll ausgenutzt war, ist davon auszugehen, dass die Knicklast der Bewehrung erreicht wurde (vgl. Bild 4). Das Knicken der Bewehrungsseisen führte wiederum zum Absprengen der Betondeckung (Bild 9, Mitte).

3.2 Test results

The specimens showed a linear increase in deformation up to a load level of 45–50% of the ultimate load. Above this limit, the deformation increased non-linearly (Fig. 8). Until failure, no cracking or other advanced notice (e.g. acoustic) could be registered. The failure modes observed in the tests and the measured ultimate compressions $\epsilon_{c,u}$ were substantially determined by the reinforcement concept used:

- The concept A specimens' failure the was initiated by a sudden concrete cover spalling. The remaining concrete cross-section could no longer absorb the applied load and this was transferred to the longitudinal reinforcement, which then buckled (Fig. 9, left). The reached average ultimate compression was $\epsilon_{c,u} = -3.6 ‰$.
- The specimens with reinforcement concept B also showed a sudden spalling of the concrete cover. In contrast to reinforcement concept A, however, the average compression strain attained a mere $\epsilon_{c,u} = -2.4 ‰$. Since the concrete compressive strength was not reached at the measured compression, it can be assumed that the buckling load of the reinforcement was exploited (cf. Fig. 4). The buckling of the reinforcing bars in turn led to the spalling of the concrete cover (Fig. 9, middle).
- The micro-reinforced specimens (reinforcement concept C, Fig. 9, right) did not show any

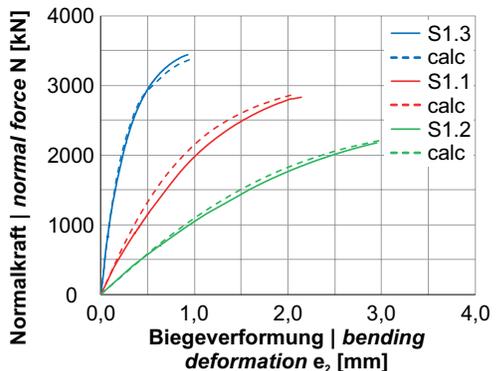


Bild 8: Last-Verformungs-Kurven der Serie S1 und entsprechende rechnerische Verläufe | Fig. 8: Load-deflection curves of series S1 and corresponding calculated curves

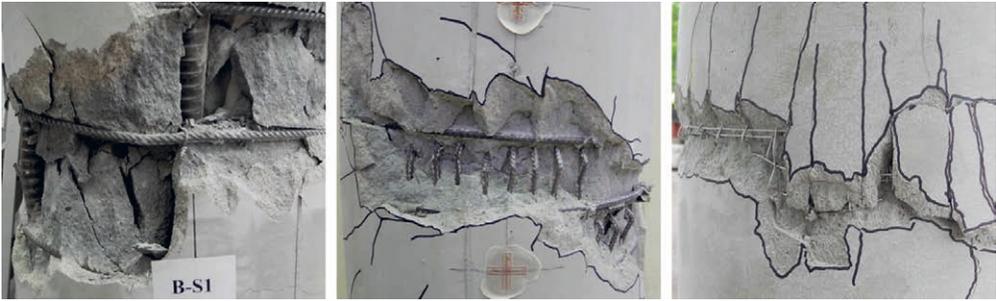


Bild 9: Versagensbilder der Versuchskörper S1.1 (Bewehrungskonzept A, links), S3.2 (Konzept B, Mitte) und S5.2 (Konzept C, rechts) | **Fig. 9:** Failure characteristics of specimens S1.1 (reinforcement concept A, left), S3.2 (concept B, middle) and S5.2 (concept C, right)

■ Bei den mikrobewehrten Versuchskörpern (Bewehrungskonzept C, Bild 9, rechts) kam es nicht zu einem Absprennen der Betondeckung. Das Versagen entsprach praktisch einem reinen Betonversagen, wie es bei Begleitkörpern zu beobachten war. Dementsprechend konnte im Mittel eine Bruchstauchung von $\epsilon_{c,u} = -3,4\text{‰}$ und somit die volle Betondruckfestigkeit erreicht werden.

Das Nachbruchverhalten bzw. die nach Erreichen der Bruchlasten aufnehmbaren Lasten wurden, analog zu konventionellen Stahlbetonbauteilen [16], wesentlich durch den Längsbewehrungsgrad sowie die Steifigkeit der Bewehrung bestimmt. Dementsprechend erreichten die Versuchskörper mit dem Bewehrungskonzept A die höchste Nachbruchtragfähigkeit. Obgleich die Nachbruchtragfähigkeit der mikrobewehrten Versuchskörper geringer war, konnten dennoch etwa 30 % der Traglast erreicht werden [15].

3.3 Auswertung

3.3.1 Nachrechnung der Versuche

Die Querschnitts- und Systemtragfähigkeit unter Biegung mit Längskraft wurde in Anlehnung an EC2/NA bestimmt. Hierzu wurden bei allen Bewehrungskonzepten ein vollständiger Verbund zwischen Beton und Bewehrung, ein Ebenbleiben der Querschnitte sowie die Spannungs-Stauchungs- bzw. Spannungs-Dehnungs-Beziehungen gemäß Bild 4 bzw. Bild 5 angenommen. Es war insbesondere das Ausknicken

spalling of the concrete cover. The failure corresponded to a pure concrete failure, as it could be observed in accompanying tests. Accordingly, an ultimate compression of $\epsilon_{c,u} = -3.4\text{‰}$ on average and thus the full concrete compressive strength could be attained.

As with conventional reinforced concrete members, the post-fracture load was essentially determined by the longitudinal reinforcement ratio and the rigidity of the respective reinforcement [16]. Accordingly, the specimens with reinforcement concept A achieved the highest post-fracture loads. Despite lower post-fracture loads of the micro-reinforced specimens, about 30% of the fracture loads could still be achieved [15].

3.3 Evaluation

3.3.1 Recalculation of tests

The load-bearing capacity under bending with longitudinal force was determined in compliance with EC2/NA. In doing so, a full bond between concrete and reinforcement, the validity of the Bernoulli hypothesis (cross-sections remain plane) and stress-strain relationships according to Fig. 4 and Fig. 5 were assumed for all reinforcement concepts. It was particularly important to take into account the buckling of the B500 with $\varnothing 4\text{ mm}$ at a compression of $\epsilon_s = -2.4\text{‰}$. Adjustments due to the low wall thicknesses were not necessary. Fig. 10 displays a good correlation between the experimentally determined fracture loads and the moment-normal force interaction determined by the program INCA2.

des B500 mit \varnothing 4 mm bei einer Stauchung von $\epsilon_s = -2,4 \text{ ‰}$ zu berücksichtigen. Bei der Nachrechnung der Versuche waren keine Anpassungen aufgrund der geringen Wandstärken erforderlich. Bild 10 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der experimentell ermittelten Bruchlasten mit der mit dem Programm INCA2 bestimmten Moment-Normalkraft-Interaktion.

Das Last-Verformungs-Verhalten der Versuchskörper wurde mit einer nichtlinearen Stabwerksberechnung unter Verwendung des Programms SOFISTiK verglichen. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Berechnungsergebnissen (Bild 8).

3.3.2 Bewertung der Ergebnisse

Aus den Versuchen zum Tragverhalten unter geringer exzentrischer Druckbeanspruchung konnten für die weitere Bearbeitung des Forschungsvorhabens entscheidende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Bewehrungskonzept A und damit der Einsatz hochfester Stähle mit – insbesondere im Vergleich zur Wandstärke – großem Durchmesser erzeugt zwar die höchsten Traglasten, erfordert jedoch eine Anpassung der Innenschalung, um eine ausreichende Betondeckung sicherzustellen.
- Der Versagensmechanismus der Versuchskörper mit Bewehrungskonzept B wird durch das Ausknicken der Längsbewehrung bei einer Grenzstauchung von $-2,4 \text{ ‰}$ dominiert, wodurch der hochfeste Beton nicht voll ausgenutzt werden kann.
- Mit der Mikrobewehrung (Bewehrungskonzept C) steht ein flexibel, auch in geringen Wandstärken einsetzbares Konzept zur Verfügung, mit dem zudem hohe Materialausnutzungsgrade erreicht werden können.

Daher wurde in den weiteren Untersuchungen der Einsatz einer Mikrobewehrung fokussiert.

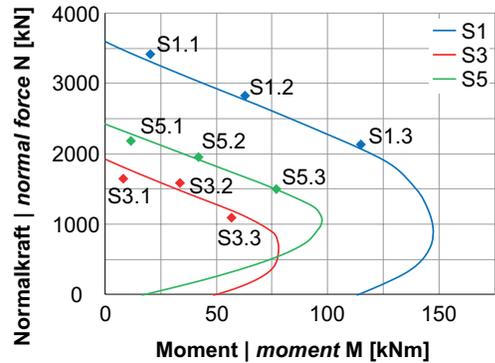


Bild 10: Vergleich der Versuchsergebnisse mit numerisch ermittelten M-N-Interaktionskurven | Fig. 10: Comparison of test results with numerically determined M-N interaction curves

The load-deformation behaviour of the test bodies was compared with a non-linear SOFISTiK calculation. The results of the calculations correspond very well with the test results, examples are shown in Fig. 8.

3.3.2 Assessment of the results

The tests conducted under uniaxial normal loads with low eccentricities allowed to draw decisive conclusions for the further processing of the research project:

- Reinforcement concept A and thus the use of high-strength rebars with a large diameter – especially in comparison to the wall thickness – generates the highest load-bearing capacities but requires an adjustment of the internal formwork in order to ensure sufficient concrete cover.
- The failure mechanism of the specimens with reinforcement concept B is dominated by the buckling of the longitudinal reinforcement at a compressive strain of -2.4‰ . Thus, the high-strength concrete cannot be fully utilized.
- The micro-reinforcement (reinforcement concept C) provides a flexible concept that can also be used in thin walls while achieving high material utilization rates.

Therefore, further investigations focussed on the use of micro-reinforcement.

4 Tragverhalten mikrobewehrter Betonbauteile unter Biegebeanspruchung

4.1 Versuchskonzept

Als Grundlage für die folgenden Arbeitspakete wurde zunächst das Biegetragverhalten mikrobewehrter Betonbauteile betrachtet. Um den Einfluss der Orientierung der Mikrobewehrung (MR) auf das Biegetragverhalten zu untersuchen, wurden 4-Punkt-Biegeversuche an Bauteilen mit quadratischem Querschnitt durchgeführt (Bild 11, [17]). Die Verformung der Balken wurde mit zwei vertikalen Wegaufnehmern aufgezeichnet.

Die Versuche wurden in fünf Serien zu je drei Versuchskörpern mit gleicher Konfiguration unterteilt. Die Serie BB1 wurde mit konventioneller Längsbewehrung B500 mit \varnothing 6 mm ausgeführt und diente als Referenz. In den weiteren Serien wurde eine mehrlagige, homogen über Querschnittshöhe bzw. -breite verteilte Mikrobewehrung verwendet. Hierbei wurde die Anzahl der Mikrobewehrungslagen n und damit der Bewehrungsgrad $\rho_{s,l}$ ebenso variiert wie die Ausrichtung der Mikrobewehrungsgitter (Tabelle 3).

4.2 Versuchsergebnisse

Bei den Versuchen konnte ein Einfluss des Bewehrungsgrades sowie der Ausrichtung der Mikrobewehrungsgitter auf das Last-Verformungs-Verhalten (Bild 12) sowie auf die Rissbildung (Bild 13) beobachtet werden. Die Serien BB1 mit vier Stäben B500 \varnothing 6 mm und BB2 mit

4 Load-bearing behaviour of micro-reinforced concrete members under bending

4.1 Test setup and test specimens

In the first place the bending behaviour of micro-reinforced concrete members was investigated to provide a basis for the following investigations. The influence of the orientation of the micro-reinforcement on the bending behaviour was analysed using 4-point bending tests on members with square cross-section (Fig. 11, [17]). The deformation of the members was recorded with two vertical displacement transducers.

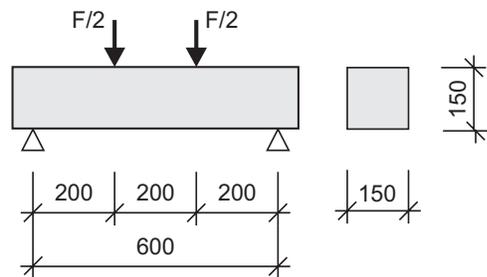


Bild 11: Versuchsaufbau für Biegeversuche an mikrobewehrten Betonbauteilen | Fig. 11: Test setup for bending tests on micro-reinforced concrete members

The tests were divided into five series of three test bodies, each with the same configuration. The BB1 series was conducted with a conventional longitudinal reinforcement (B500, \varnothing 6 mm) and served as a reference. In the other series, a multi-layer micro-reinforcement (MR) homo-

Serie Series	Typ Type *)	Bewehrungsgrad Reinforcement ratio $\rho_{s,l}$ [%]	Orientierung Orientation
BB1	B500, 4 \varnothing 6	0,5	-
BB2	MR, n = 35	1,0	vertikal vertical
BB3	MR, n = 70	2,0	vertikal vertical
BB4	MR, n = 35	1,0	horizontal horizontal
BB5	MR, n = 35	0,7	45° geneigt inclined by 45°

*)MR: Mikrobewehrung | Micro reinforcement, n = Anzahl Lagen MR | Number of layers of MR

Tabelle 3: Konfiguration der Versuchskörper für Biegeversuche | Table 3: Configuration of specimens for bending tests

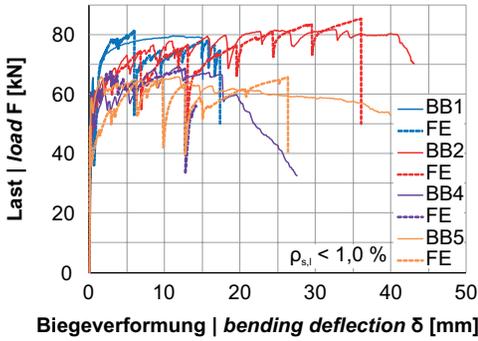


Bild 12: Last-Verformungs-Kurven der Serien mit $\rho_{s,i} < 1,0\%$ (Mittelwerte pro Serie) und entsprechende FE-Ergebnisse | Fig. 12: Load-deflection curves of series with $\rho_{s,i} < 1,0\%$ (mean values per series) and corresponding FE results

einer äquivalenten Mikrobewehrung zeigten vergleichbare maximale Lasten. Bei der Serie BB2 konnten jedoch deutlich erhöhte Verformungen sowie ein feineres Rissbild beobachtet werden. Eine weitere Steigerung des Mikrobewehrungsgrades (BB3) führte zu einer weiteren Steigerung der Lasten sowie weiter verringerten Rissbreiten. Die Versuche mit horizontaler sowie geneigter Anordnung der Mikrobewehrung (BB4, BB5) zeigten sowohl reduzierte Traglasten als auch erhöhte Rissbreiten.

Das Versagen der Versuchskörper der Serie BB1 erfolgte schlagartig mit Erreichen der Zugfestigkeit der Betonstahlbewehrung. Bei den mikrobewehrten Versuchskörpern wurden hingegen ein sukzessives Versagen der einzelnen Mikrobewehrungsdrähte beobachtet (Bild 14).

4.3 Auswertung

4.3.1 Nachrechnung der Versuche

Die Querschnittstragfähigkeit der Biegebalken wurde in Anlehnung an das Berechnungsmodell des EC2/NA unter Annahme eines vollständigen Verbundes der Mikrobewehrung ermittelt, der primär durch die angeschweißten Querstäbe sichergestellt wird [18], [19], Bild 15.

$$M_{REC2/NA} = F_c \cdot z_c + \sum F_{s,i} \cdot z_{s,i} \tag{1}$$

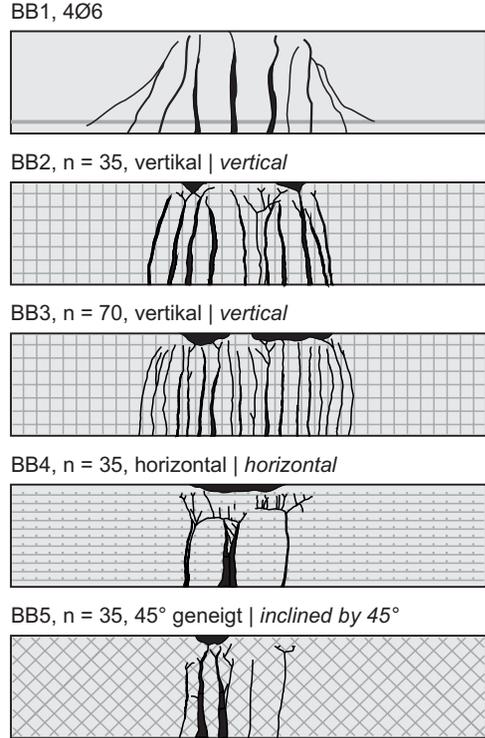


Bild 13: Rissbilder der Versuchskörper der Serie BB | Fig. 13: Crack formations of specimens of series BB

geneously distributed over the cross-section height and width was used. The number of micro-reinforcement layers n and thus the reinforcement ratio $\rho_{s,i}$ as well as the orientation of the micro-reinforcement meshes were varied (Table 3).

4.2 Test results

The tests revealed an influence of the reinforcement ratio as well as of the orientation of the micro-reinforcement on the load-deformation behaviour (Fig. 12) and on the crack formation (Fig. 13). The BB1 (with 4 rebars B500, $\varnothing 6$ mm) and BB2 series (with equivalent micro-reinforcement) showed comparable maximum loads. However, significantly increased deformations and a finer crack pattern could be observed with the BB2 series. A further increase of the micro-reinforcement ratio (BB3) led to a further increase in loads and a further reduc-

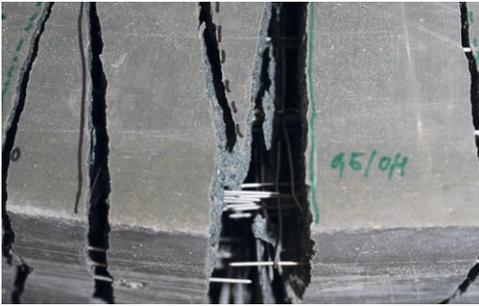


Bild 14: Versagen einzelner Mikrobewehrungsdrähte | Fig. 14: Failure of single micro-reinforcement wires

tion in crack widths. The tests with horizontal and inclined micro-reinforcement (BB4, BB5) showed reduced loads as well as increased crack widths.

The specimens of the BB1 series failed abruptly once the tensile strength of the reinforcement was achieved. In the case of the micro-reinforced specimens, on the other hand, a successive failure of single micro-reinforcement wires was observed (Fig. 14).

4.3 Evaluation

4.3.1 Recalculation of tests

The bending capacity of the specimens was determined in compliance with EC2/NA, assuming a full bond of the micro-reinforcement, which is primarily ensured by the anchorage provided by transverse bars (Fig. 15, [18], [19]).

$$M_{R,EC2/NA} = F_c \cdot z_c + \sum F_{s,i} \cdot z_{s,i} \quad (1)$$

with:

- F_c resulting concrete compression force
- z_c inner lever arm between resulting concrete compression force and stress-neutral line
- $F_{s,i}$ tensile force at reinforcement layer i
- $z_{s,i}$ inner lever arm between reinforcement layer i and stress-neutral line

The results indicate that the experimental bending moments M_{exp} are on average 29% higher than the calculated bending capacity $M_{R,EC2/NA}$ (Fig. 16).

Mit:

- F_c resultierende Betondruckkraft
- z_c Hebelarm der resultierenden Betondruckkraft
- $F_{s,i}$ Stahlzugkraft in Bewehrungslage i
- $z_{s,i}$ Hebelarm der Bewehrungslage i

Die Ergebnisse zeigen, dass die experimentelle Momenten Tragfähigkeit M_{exp} im Mittel 29 % über der mit dem Berechnungsmodell ermittelten Momenten Tragfähigkeit $M_{R,EC2/NA}$ liegt (Bild 16).

Ergänzend konnte auf Basis der Versuchsergebnisse in Anlehnung an EC2/NA ein Ansatz zur Ermittlung der Mindestbewehrung $A_{s,min}$ zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilverhaltens bei Einsatz einer mehrlagigen, homogen über den Querschnitt verteilten Mikrobewehrung hergeleitet werden:

$$A_{s,min} = \frac{f_{ct,fl} \cdot W_c}{\frac{1}{3} \cdot (h - x) \cdot f_y} \quad (2)$$

Mit:

- $f_{ct,fl}$ Biegezugfestigkeit des hochfesten Feinkornbetons
- W_c Widerstandsmoment des Betonquerschnitts
- h Bauteilhöhe
- x Druckzonenhöhe
- f_y Streckgrenze der Mikrobewehrung

Eine genauere Nachrechnung der Biegeversuche wurde mit einem 2D-Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) erreicht. Hierzu wurde das Programm

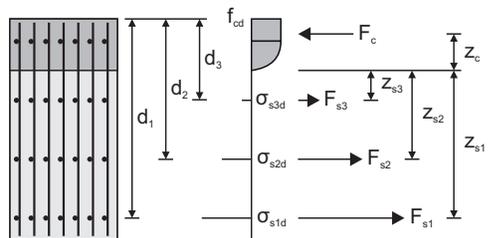


Bild 15: Berechnungsmodell in Anlehnung an EC2/NA | Fig. 15: Design approach based on EC2/NA

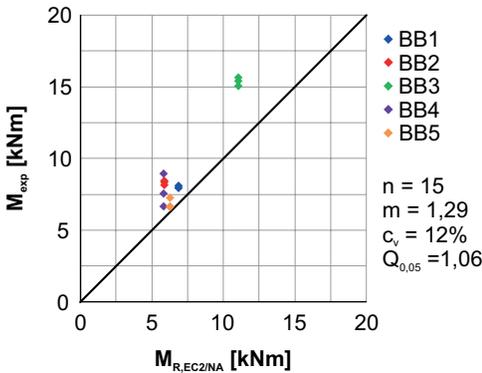


Bild 16: Vergleich der Tragfähigkeit $M_{R,EC2/NA}$ nach EC2/NA mit Versuchsergebnissen M_{exp} | **Fig. 16:** Comparison of ultimate moment capacity $M_{R,EC2/NA}$ as by EC2/NA and test results M_{exp}

DIANA FEA eingesetzt. Die Mikrobewehrung wurde bei der Modellierung aufgrund des vollständigen Verbundes sowie der geringen Stab- und Mattenabstände vereinfacht als verschmierte Mattenbewehrung berücksichtigt, wodurch sowohl der Modellierungs- als auch der Berechnungsaufwand erheblich reduziert werden konnten. Mit den FE-Berechnungen konnte hinsichtlich der Last-Verformungs-Kurven sowie der experimentellen Traglasten eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erzielt werden (Bild 16).

4.3.2 Bewertung der Ergebnisse

Basierend auf den Biegeversuchen an mikrobewehrten Betonbauteilen konnte das grundlegende Biegetragverhalten der mikrobewehrten Bauteile unter Biegebeanspruchung abgebildet und modelltheoretisch erfasst werden:

- Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Einsatz einer mehrlagigen Mikrobewehrung im Vergleich zu einer konventionellen Betonstahlbewehrung zu einem feineren Rissbild führt. Durch eine Erhöhung des Mikrobewehrungsgrades konnten zudem die Traglasten sowie die Verformungen weiter gesteigert werden.
- In Anlehnung an das Berechnungsmodell des EC2/NA können die Tragfähigkeit sowie die Mindestbewehrung zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilverhaltens ermittelt werden.

In addition, on the basis of the test results and in compliance with EC2/NA, an approach for the determination of the minimum reinforcement $A_{s,min}$ ensuring a ductile behaviour of members with a multi-layer micro-reinforcement homogeneously distributed over the cross-section could be derived:

$$A_{s,min} = \frac{f_{ct,fl} \cdot W_c}{3 \cdot (h - x) \cdot f_y} \tag{2}$$

with:

- $f_{ct,fl}$ flexural strength of the high-strength concrete
- W_c elastic section modulus of the concrete cross-section
- h height of the member
- x height of the compression zone
- f_y yield strength of micro-reinforcement

A more detailed recalculation of the bending tests was achieved with a 2D finite element model (FE model). The DIANA FEA program was used for this purpose. Due to the full bond of the micro-reinforcement and the small distances between wires and meshes, the micro-reinforcement was modelled as a smeared mesh reinforcement, which considerably reduced the modelling and calculation effort. With the FE calculations, a very good correlation with the test results was attained with regard to the load-deformation curves and the experimental load capacities (Fig. 16).

4.3.2 Assessment of the results

Based on the bending tests on micro-reinforced concrete members, the fundamentals of the bending behaviour of micro-reinforced members were depicted and described theoretically:

- The test results show that the use of a multi-layer micro-reinforcement leads to a finer crack pattern compared to a conventional reinforcement. By increasing the micro-reinforcement ratio, it was also possible to further increase the bending capacity and the deflections.

- Mit dem verwendeten FE-Modell kann die Genauigkeit der Versuchsnachrechnung weiter verbessert werden. Durch die verschmierte Modellierung der Mikrobewehrung können hierbei sowohl der Modellierungs- als auch der Berechnungsaufwand reduziert werden.

- The bending capacity as well as the minimum reinforcement to ensure a ductile behaviour can be determined in compliance with EC2/NA.
- The accuracy of the re-calculation can be further improved using the FE model. The smeared modelling of the micro-reinforcement can reduce both the modelling and the calculation effort.

5 Tragverhalten dünnwandiger, mikrobewehrter Betonbauteile unter Querkraftbeanspruchung

5 Load-bearing behaviour of thin-walled, micro-reinforced concrete members under shear forces

5.1 Versuchskonzept und Probekörper

5.1 Test setup and test specimens

Zur Untersuchung des Querkrafttragverhaltens dünnwandiger, mikrobewehrter Betonbauteile wurden 3-Punkt-Biegeversuche an dünnwandigen, profilierten Trägern durchgeführt [20]–[22]. Die Biegeverformung der Versuchskörper wurden durch Wegaufnehmer an der Unterkante gemessen, während die Schubfelder durch Dehnungsmessstreifen sowie Wegaufnehmer überwacht wurden. Zusätzlich wurde das photogrammetrische Messsystem GOM ARAMIS eingesetzt, um die Verformungen im Schubfeld aufzuzeichnen (Bild 17, links).

In order to investigate the shear behaviour of thin-walled, micro-reinforced concrete members, 3-point bending tests were carried out on thin-walled, profiled beams [20]–[22]. The deflection of the test bodies was measured by displacement transducers at the lower edge, while the shear spans were monitored by strain gauges and additional displacement transducers. In addition, the GOM ARAMIS photogrammetric measuring system was used to record the planar deformations in the shear span (Fig. 17, left).

Die Stegbreite betrug bei allen Versuchen 40 mm (Bild 17, rechts). Analog zu den Untersuchungen zum Biegetragverhalten wurde mit dem Versuchskörper Q0 ein konventionell bewehrter Referenzkörper geprüft. Bei den acht mikrobewehrten Trägern wurden die Bauteilhöhe h , die Schubschlankheit a/d sowie die Anzahl der

The beam's web width was 40 mm for all specimens (Fig. 17, right). By analogy with the investigations on the bending behaviour a conventionally reinforced reference specimen was also tested (Q0). The height h , the shear slenderness a/d , the number of micro-reinforcement layers n

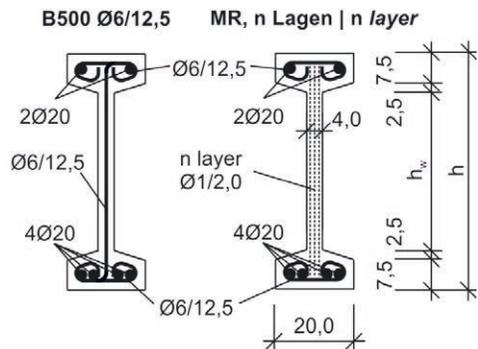


Bild 17: Versuchsaufbau für die Querkraftversuche und Messtechnik (links) sowie Querschnitt und Bewehrung der Versuchskörper (rechts) | Fig. 17: Test setup for shear tests and measurement (left) as well as cross-section and reinforcement of specimens (right)

Versuchskörper Specimen	Abmessungen Dimensions			Bewehrung Reinforcement	
	Höhe Height h [cm]	Steghöhe Web height h _w [cm]	Schubslankheit Shear slenderness a/d [-]	Typ Type	Bewehrungsgrad Reinforcement ratio ρ _{sw} [%]
Q0	60	40	2,5	B500 Ø 6/12,5	0,6
Q1	60	40	2,5	MR, n = 5	0,5
Q2	60	40	2,5	MR, n = 10	1,0
Q3	60	40	2,5	MR, n = 15	1,5
Q4	40	20	2,5	MR, n = 5	0,5
Q5	40	20	2,5	MR, n = 15	1,5
Q6	80	60	2,5	MR, n = 5	0,5
Q7	60	40	2,0	MR, n = 5	0,5
Q8	60	40	1,5	MR, n = 5	0,5

Tabelle 4: Konfiguration der Versuchskörper für Querkraftversuche | Table 4: Configuration of specimens for shear tests

Mikrobewehrungslagen n und damit der Querkraftbewehrungsgrad ρ_{sw} variiert (Tabelle 4).

5.2 Versuchsergebnisse

Bei den Querkraftversuchen konnte durchgehend ein vergleichbares Last-Verformungs-Verhalten bis zum Erreichen der maximalen Traglasten beobachtet werden (Bild 18). Bei der Rissbildung, den Versagensmodi und im Nachbruchverhalten zeigten sich jedoch deutliche Unterschiede. Beim konventionell bewehrten Träger Q0 kam es zur Bildung von wenigen schrägen Rissen, die beim Versagen

and thus the shear reinforcement ratio ρ_{sw} were varied for each of the eight micro-reinforced beams (Table 4).

5.2 Test results

A comparable load-deflection behaviour was observed for all shear tests until the maximum loads were reached (Fig. 18). However, significant differences in crack formation, failure modes and post-cracking behaviour were observed. Few inclined cracks with widths of up to 2.0 cm upon failure formed in the conventionally reinforced specimen Q0. A significantly higher number of inclined cracks with considerably smaller crack widths (≤ 0.5 mm) could be observed in the micro-reinforced specimens (Fig. 19).

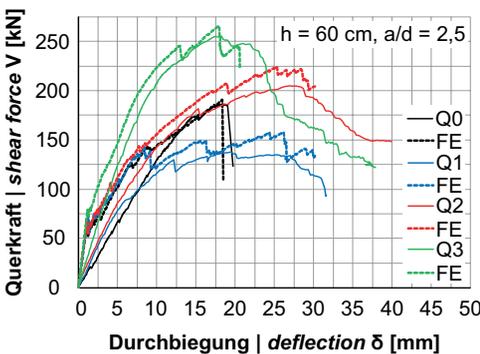


Bild 18: Last-Verformungs-Kurven der Versuche mit h = 60 cm und a/d = 2,5 und entsprechende FE-Ergebnisse | Fig. 18: Load-deflection curves of tests with h = 60 cm and a/d = 2.5 and corresponding FE results

While the shear reinforcement of reference specimen Q0 failed abruptly (Fig. 20, left), a successive decrease of the load-deformation curve could be observed with all micro-reinforced specimens. The failure of the specimens with a shear reinforcement ratio of ρ_{sw} = 0.5% was induced by the failure of single micro-reinforcement wires (Fig. 20, middle). In the case of specimens Q3 and Q5 with a shear reinforcement ratio of ρ_{sw} = 1.5%, the previously multi-cracked web concrete was gradually destroyed after reaching the yield strength of the shear rein-

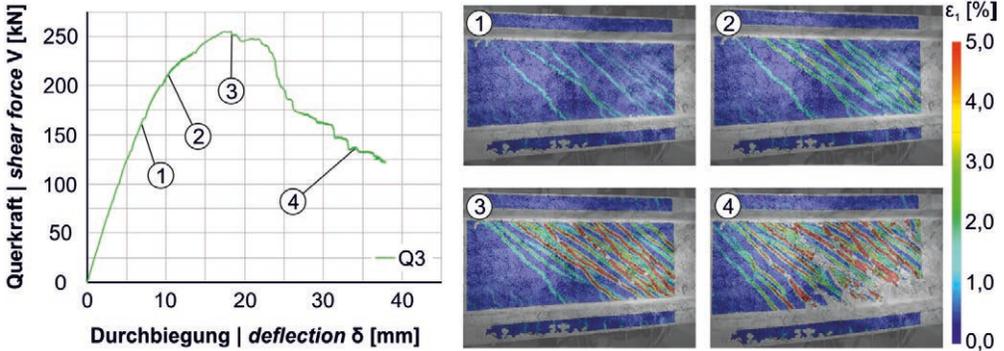


Bild 19: Last-Verformungs-Kurve und Entwicklung der Rissbildung des Versuchskörpers Q3 (Hauptformänderung ϵ_1 , aufgezeichnet mit ARAMIS) | Fig. 19: Load-deflection curve and development of crack formation of specimen Q3 (principal deformation strain ϵ_1 , recorded by ARAMIS)

Rissbreiten von bis zu 2,0 cm erreichten. Bei den mikrobewehrten Versuchskörpern wurden deutlich mehr schräge Risse mit deutlich geringeren Rissbreiten ($\leq 0,5$ mm) beobachtet (Bild 19).

Während beim Referenzkörper Q0 die Bewehrung im Steg schlagartig auf Zug versagte (Bild 20, links), konnte bei allen mikrobewehrten Versuchskörpern ein sukzessives Abfallen der Last-Verformungs-Kurve beobachtet werden. So wurde bei den Versuchskörpern mit einem Querkraftbewehrungsgrad von $\rho_{sw} = 0,5$ % das Versagen durch ein Reißen einzelner Mikrobewehrungsdrähte eingeleitet (Bild 20, Mitte). Bei den Versuchskörpern Q3 und Q5 mit einem Querkraftbewehrungsgrad von $\rho_{sw} = 1,5$ % kam es nach Erreichen der Fließgrenze der Querkraftbewehrung zu einer zunehmenden Zerstörung des zuvor bereits mehrfach gerisse-

forcement (secondary concrete failure, Fig. 20, right, cf. [23], [24]).

5.3 Evaluation

5.3.1 Recalculation of tests

By analogy with the bending capacity, the shear capacity was determined in accordance with EC2/NA:

$$V_{R,EC2/NA} = \min(V_{R,s}; V_{R,max}) \quad (3)$$

with:

$$V_{R,s} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{yk} \cdot \cot \theta \quad (4)$$

$$V_{R,max} = 2 \cdot t \cdot z \cdot v_{1,Q} \cdot \frac{f_{ck}}{\cot \theta} \quad (5)$$

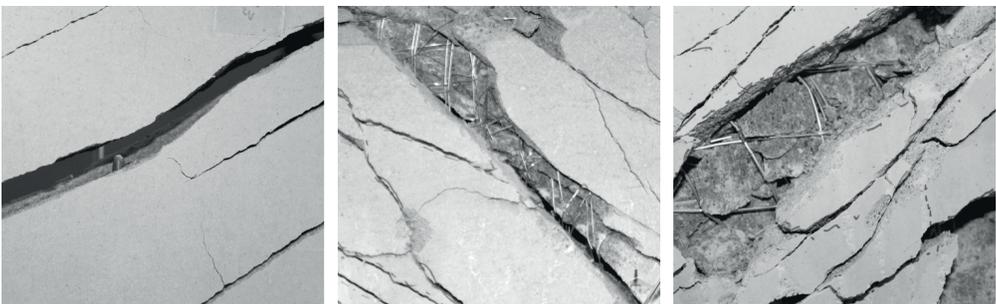


Bild 20: Versagensbilder der Versuchskörper Q0 (Stegzugversagen B500, links), Q1 (Stegzugversagen Mikrobewehrung, Mitte) und Q3 (sekundäres Betonversagen, rechts) | Fig. 20: Failure characteristics of specimens Q0 (tensile failure of B500, left), Q1 (tensile failure of micro-reinforcement, middle) and Q3 (secondary concrete failure, right)

nen Betongefüges (sekundäres Betonversagen, rechts in Bild 20, vgl. [23], [24]).

5.3 Auswertung

5.3.1 Nachrechnung der Versuche

Analog zur Biegetragfähigkeit wurde die Querkrafttragfähigkeit in Anlehnung an das Berechnungsmodell des EC2/NA ermittelt:

$$V_{R,EC2/NA} = \min(V_{R,s}, V_{R,max}) \quad (3)$$

Mit:

$$V_{R,s} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{yk} \cdot \cot \Theta \quad (4)$$

$$V_{R,max} = 2 \cdot t \cdot z \cdot v_{1,Q} \cdot \frac{f_{ck}}{\cot \Theta} \quad (5)$$

- a_{sw} Querschnittsfläche der vertikalen Mikrobewehrung pro m
- z Hebelarm der inneren Kräfte
- f_{yk} charakteristische Streckgrenze der Mikrobewehrung
- $\cot \Theta$ Druckstrebenneigung
- t Wandstärke
- $v_{1,Q}$ Abminderungsfaktor
- f_{ck} charakteristische Betondruckfestigkeit

Bild 21 zeigt, dass mit dem Berechnungsmodell des EC2/NA eine konservative Abschätzung der Querkrafttragfähigkeit dünnwandiger, mikrobewehrter Bauteile möglich ist. Vergleichbare Ergebnisse wurden z. B. in [25], [26] für konventionell bewehrte Stahlbetonbauteile mit Querkraftbewehrungsgraden $\rho_{sw} \leq 1,0 \%$ dokumentiert. Die mit dem Berechnungsmodell ermittelten Tragfähigkeiten werden durchgehend durch die Tragfähigkeit der Querkraftbewehrung $V_{R,s}$ bestimmt. Ein Betonversagen $V_{R,max}$ wird nicht erfasst. Dies kann damit begründet werden, dass der Abminderungsbeiwert zur Ermittlung der Betondruckstreben tragfähigkeit $v_{1,Q}$ (Gl. (6)) für ein Betonversagen vor Erreichen der Fließgrenze der Querkraftbewehrung abgeleitet wurde [27].

$$v_{1,Q} = 0,75 \cdot \left(1,1 - \frac{f_{ck} = 86,0}{500} \right) = 0,69 \quad (6)$$

- a_{sw} cross-sectional area of the vertical micro-reinforcement per m
- z lever arm of internal forces
- f_{yk} characteristic yield strength of the micro-reinforcement
- $\cot \Theta$ angle of the compression struts
- t thickness of the web
- $v_{1,Q}$ strength reduction factor
- f_{ck} characteristic concrete compressive strength

Fig. 21 shows that the shear capacity of thin-walled, micro-reinforced concrete members can be conservatively estimated on the basis of the EC2/NA calculation model. Comparable results were documented e.g. in [25], [26] for conventionally reinforced concrete members with shear reinforcement ratios of $\rho_{sw} \leq 1.0\%$. The capacity of the shear reinforcement $V_{R,s}$ is decisive for all tests. Thus, no concrete failure $V_{R,max}$ is detected. This can be explained by the fact that the strength reduction factor $v_{1,Q}$ (Eq. (6)) used to determine the concrete compression capacity was derived to account for a concrete failure before the yield strength of the vertical reinforcement is reached (main concrete failure, [27]).

$$v_{1,Q} = 0,75 \cdot \left(1,1 - \frac{f_{ck} = 86,0}{500} \right) = 0,69 \quad (6)$$

with:

$$f_{ck} = f_{cm,cyl} - 8,0 \text{ N/mm}^2 = 94,0 - 8,0 = 86,0 \text{ N/mm}^2$$

In [24], a range of 0.25 and 0.55 is given for $v_{1,Q}$ in case of a concrete failure after the yield strength of the shear reinforcement has been reached (secondary concrete failure). This corresponds to the values of 0.25 and 0.33 determined by the tests Q3 and Q5. On the basis of the test results available, a reduction coefficient of $v_{1,Q} = 0.25$ can therefore be proposed.

The FE model described in Section 4.3.1 was extended for the re-calculation of the shear tests. To be able to depict a failure of the concrete, the reduction of the concrete compressive strength as a result of cracking was taken into account

Mit:

$$f_{ck} = f_{cm,cyl} - 8,0 \text{ N/mm}^2 = 94,0 - 8,0 = 86,0 \text{ N/mm}^2$$

Für ein Betonversagen nach Erreichen der Fließgrenze der Querkraftbewehrung (sekundäres Betonversagen) wird in [24] der Bereich von 0,25 und 0,55 angegeben. Dieser deckt sich mit den anhand der Tests Q3 und Q5 ermittelten Werte von 0,25 bzw. 0,33. Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen kann daher ein Abminderungsbeiwert von $v_{1,Q} = 0,25$ vorgeschlagen werden.

Für eine Nachrechnung der Last-Verformungs-Kurven konnte das im Abschnitt 4.3.1 beschriebene FE-Modell erweitert werden. Um ein Querkraftversagen des Betons abbilden zu können, wurde die Reduktion der Betondruckfestigkeit infolge Rissbildung mit dem Modell nach Vecchio und Collins [23] berücksichtigt. Mit dem erweiterten FE-Modell konnten die Last-Verformungs-Kurven und Versagensmodi der Versuche sehr gut abgebildet werden (Bild 21).

5.3.2 Bewertung der Ergebnisse

Mit den Tests zum Querkrafttragverhalten dünnwandiger, mikrobewehrter Betonbauteile wurden die Ergebnisse der Biegeversuche sowie die daraus abgeleiteten Analogien zu Tragmodellen des konventionellen Stahlbetonbaus bestätigt. Darüber hinaus sind folgende Punkte festzuhalten:

- Die Querkraftversuche zeigen aufgrund der hohen Duktilität der Mikrobewehrung eine deutliche Versagensvorankündigung unabhängig davon, ob ein Querkraftbewehrungs- oder ein sekundäres Betonversagen vorliegt.
- Die Querkrafttragfähigkeiten der Versuche können nach EC2/NA sicher abgeschätzt werden. Eine Anpassung des Abminderungsbeiwertes zur Ermittlung der Druckstreben-tragfähigkeit ($v_{1,Q} = 0,25$) erlaubt zudem eine Prognose des Versagensmodus.
- Mit dem FE-Modell können die experimentellen Versagenslasten und -modi (Querkraftbewehrungs- oder Betonversagen) sowie die Last-Verformungs-Kurven in guter Übereinstimmung abgebildet werden.

using the model according to Vecchio & Collins [23]. The extended FE model adequately depicted the load-deformation curves and failure modes of the tests (Fig. 21).

5.3.2 Assessment of the results

The shear tests on thin-walled, micro-reinforced concrete members allowed to confirm the results of the bending tests and the derived analogies to calculation models for conventional reinforced concrete. In addition, the following points should be noted:

- Due to the high ductility of the micro-reinforcement, the shear tests show a clearly advanced notice of failure, irrespective of whether a failure of the vertical reinforcement or a secondary concrete failure occurred.
- The shear capacities of the tests can be conservatively estimated according to EC2/NA. Besides that, an adjustment of the strength reduction factor $v_{1,Q} = 0.25$ used to determine the concrete compression capacity allows a prediction of the failure mode.
- The extended FE model adequately depicts the experimental failure loads and modes (reinforcement or concrete failure) as well as the load-deformation curves.

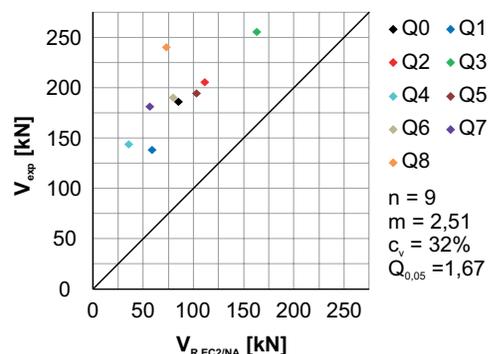


Bild 21: Vergleich der Querkrafttragfähigkeit $V_{R,EC2/NA}$ nach EC2/NA mit den Versuchsergebnissen V_{exp} | Fig. 21: Comparison of ultimate shear force $V_{R,EC2/NA}$ in compliance with EC2/NA and the test results V_{exp}

6 Tragverhalten dünnwandiger, mikrobewehrter Betonhohlbauteile unter Biege- und Querkraftbeanspruchung

6.1 Versuchskonzept

Das Tragverhalten dünnwandiger, mikrobewehrter Betonhohlbauteile wurde anhand von vier 3-Punkt-Biegeversuchen untersucht. Um in zwei Tests eine für Stabwerke typische Normalkraftbeanspruchung aufzubringen, wurden die Bauteile mit einem innenliegenden Spannstab vorgespannt (Bild 22). Die vertikale Verformung der Versuchskörper wurde über Wegaufnehmer erfasst. Während der Versuche wurde der Bereich zwischen Auflager und Lasteinleitung mit dem Photogrammetriesystem ARAMIS überwacht. Zudem wurden Dehnungsmessstreifen in den Schubfeldern sowie an der Ober- und Unterkante der Versuchskörper angeordnet.

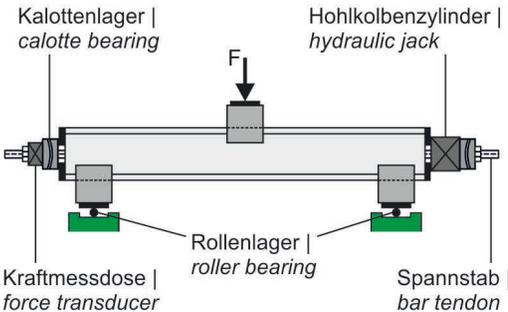


Bild 22: Versuchsaufbau für die Biege- und Querkraftversuche an dünnwandigen Betonhohlbauteilen und Messtechnik | Fig. 22: Test setup for bending and shear tests on thin-walled hollow concrete members and measurement

In allen Versuchen wurden Betonhohlbauteile mit einem Verhältnis von Wandstärke zu Durchmesser von $t/D = 1/10$ geprüft. Die Mikrobewehrung ($\varnothing 1$ mm, Maschenweite 20 mm) wurde über den Ansatz zur Ermittlung der Mindestbewehrung für ein duktiler Bauteilverhalten (vgl. Abschnitt 4.3.1) dimensioniert. Neben einer Variation der Laststellung und damit der Schubschlankheit a/d wurde in zwei Versuchen eine zusätzliche Normalkraftbeanspruchung N aufgebracht (Tabelle 5).

6 Load-bearing behaviour of thin-walled, micro-reinforced hollow concrete members under bending and shear forces

6.1 Test setup and test specimens

The load-bearing behaviour of thin-walled, micro-reinforced hollow concrete members was investigated by means of four 3-point bending tests. In two tests, a normal force typical for truss structures was applied using a bar tendon (Fig. 22). The deflection of the specimens was measured using displacement transducers. During the tests, the area between support and loading was monitored by the photogrammetric ARAMIS system. In addition, strain gauges were arranged in the shear spans and on the upper and lower edges of the specimens.



Hollow concrete members with a wall thickness to diameter ratio of $t/D = 1/10$ were used in all tests. The micro-reinforcement ($\varnothing 1$ mm, mesh size 20 mm) was dimensioned using the previously described approach to determine the minimum reinforcement (cf. section 4.3.1). In addition to a variation of the load position and thus of the shear slenderness a/d , a normal force N was applied in two tests (Table 5).

Versuchskörper Specimen	Schubslankheit Shear slenderness a/d [-]	Normalkraft Normal force N [kN]	Konstante Parameter Constant parameters
KR1	3,0	-	Wandstärke Wall thickness $t = 3,5$ cm Durchmesser Diameter $D = 35$ cm Bewehrung Reinforcement $MR, n = 7$ Bewehrungsgrad Reinforcement ratio $\rho_{s,l} = \rho_{s,w} = 0,79$ %
KR2	2,0	500	
KR3	3,0	-	
KR4	2,0	500	

Tabelle 5: Konfiguration der Versuchskörper für Biegeversuche an dünnwandigen Betonhohlbauteilen | **Table 5:** Configuration of bending tests on thin-walled hollow concrete members

6.2 Versuchsergebnisse

Das Last-Verformungs-Verhalten der dünnwandigen Betonhohlbauteile wurde maßgeblich durch die einwirkende Normalkraft bestimmt. Während die Last-Verformungs-Kurven der Versuche KR1 und KR3 ähnlich zu den Kurven der Biegeversuche (Bild 12) verlaufen, konnte bei einer zusätzlichen Normalkraftbeanspruchung ein deutlich steiferes Tragverhalten beobachtet werden (Bild 23). Eine entsprechende Abhängigkeit der Rissbildung konnte ebenfalls beobachtet werden. Bei den Versuchen ohne Normalkraftbeanspruchung bildeten sich, ausgehend von der Bauteilunterkante, multiple Biegerisse. Infolge der Normalkraftbeanspruchung kam es, insbesondere bei einer reduzierten Schubslankheit, zu einer ausgeprägten Schrägrissbildung (Bild 24).

Bei den Versuchen ohne Normalkraftbeanspruchung traten sehr große Durchbiegungen auf, die von den Auflagerkonstruktionen nicht mehr aufgenommen werden konnten. Daher mussten die Versuche abgebrochen werden. Die Verformungen sowie das Rissbild deuteten jedoch auf ein bevorstehendes Biegezugversagen hin. Bei den Versuchen mit Normalkraftbeanspruchung kam es zu einem schlagartigen Biegedruckversagen (Bild 25).

6.3 Auswertung

6.3.1 Nachrechnung der Versuche

Die Querschnittstragfähigkeit der dünnwandigen Betonhohlbauteile wurde, aufbauend auf den vorherigen Untersuchungen, in Anlehnung

6.2 Test results

The load-deformation behaviour of the thin-walled hollow concrete members was significantly determined by the applied normal force. While the progression of the load-deflection curves of the KR1 and KR3 tests is similar to those of the bending tests (Fig. 12), a significantly stiffer behaviour was observed in the case of an additional normal force (Fig. 23 and Fig. 24). A corresponding dependence of the crack formation could also be observed. During the tests without normal force multiple bending cracks formed, starting from the lower edge of the member. As a result of the normal force a pronounced inclined crack formation occurred, especially with a reduced shear slenderness (Fig. 24).

During the tests without normal force very large deflections occurred and exceeded the limita-

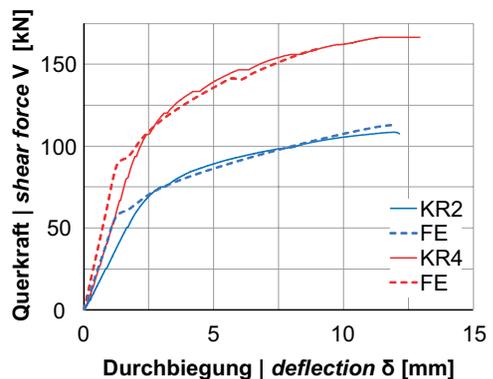
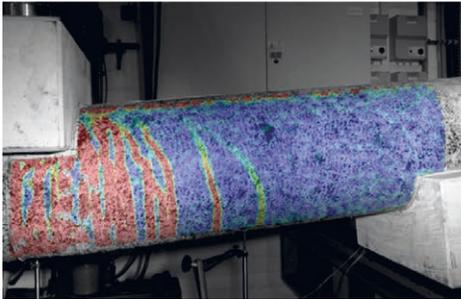


Bild 23: Last-Verformungs-Kurven der Versuche mit $N = 500$ kN und entsprechende FE-Ergebnisse | **Fig. 23:** Load-deflection curves of tests with $N = 500$ kN and corresponding FE results

Versuch | test KR1 (a/D = 3,0 kN; N = 0 kN)



Versuch | test KR4 (a/D = 2,0; N = 500 kN)

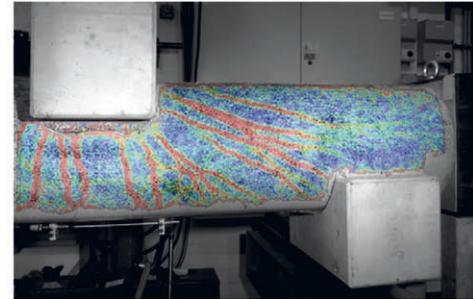


Bild 24: Rissbildung bei den Versuchskörpern KR1 und KR4, Hauptformänderung ϵ_1 , aufgezeichnet mit ARAMIS | Fig. 24: Crack formation of specimens KR1 and KR4, principal deformation strain ϵ_1 , recorded by ARAMIS

an das Berechnungsmodell des EC2/NA bestimmt. Ein Vergleich der Berechnung mit den Versuchsergebnissen (Bild 26) zeigt, dass die Momententragfähigkeit $M_{R,EC2/NA}$ konservativ abgeschätzt werden kann (vgl. Abschnitt 4.3.1). Die rechnerische Querkrafttragfähigkeit der Versuchskörper KR1 und KR3 (dargestellt als Moment bei Erreichen der Querkrafttragfähigkeit $M_{R,V,EC2/NA}$) liegt über bzw. im Bereich der maximalen Versuchslast. Mit dem Modell nach EC2/NA wird demnach ein Biegeversagen zutreffend vorhergesagt. Bei den Versuchen KR2 und KR4 wird eine gegenüber der Momententragfähigkeit deutlich geringere Querkrafttragfähigkeit ermittelt. Da in den Versuchen jedoch kein Querkraftversagen beobachtet wurde, ist davon auszugehen, dass der Einfluss einer Normalkraftbeanspruchung auf den Querkraftwiderstand der dünnwandigen Betonhohlbauteile unterschätzt wird.



Bild 25: Versagensmodus des Versuchskörpers KR4 (Biegedruckversagen) | Fig. 25: Failure characteristics of specimen KR4 (failure of concrete in compression)

tions given by the roller bearings. Therefore, the experiments had to be aborted. However, the deformations and the crack formation indicated an imminent bending failure. During the tests with normal forces a sudden failure of the compression zone occurred (Fig. 25).

6.3 Evaluation

6.3.1 Recalculation of tests

On the basis of the previous investigations the load-bearing capacity of the thin-walled hollow concrete members was determined according to EC2/NA ($M_{R,EC2/NA}$). A comparison of the calculated bending capacities with the test results shows a conservative assessment (Fig. 26, cf. section 4.3.1). The calculated shear capacity of the specimens KR1 and KR3 (shown as the applied moment when reaching the shear capacity $M_{R,V,EC2/NA}$) is above or in the range of the ultimate experimental loads. Thus, the EC2/NA model accurately predicts a bending failure. A considerably lower shear capacity compared to the bending capacity is determined for specimens KR2 and KR4. However, since no shear force failure was observed in the tests, it can be assumed that the influence of a normal force on the shear capacity of the thin-walled hollow concrete members is underestimated.

In accordance with [26], a modified calculation model can therefore be proposed in which, in contrast to EC2/NA, an additive concrete member $V_{R,c}$ is taken into account:

In Anlehnung an [26] kann daher ein modifiziertes Berechnungsmodell vorgeschlagen werden, bei dem, abweichend zum Modell nach EC2/NA, ein additiver Betontraganteil $V_{R,c}$ in Gl. (7) berücksichtigt wird. Dieser wird aus dem EC2/NA entnommen (Gl. (8)).

$$V_{R,mod} = \min(V_{R,c} + V_{R,s}; V_{R,max}) \quad (7)$$

Mit:

$$V_{R,c} = \left[0,15 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,12 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot 2 \cdot t \cdot d \quad (8)$$

sowie:

k	Maßstabsfaktor
ρ_l	Längsbewehrungsgrad
f_{ck}	charakteristische Betondruckfestigkeit
σ_{cp}	Betonspannung infolge Normalkraft
t	Wandstärke
d	statische Nutzhöhe
$\cot\beta$	Rissneigung

Insgesamt kann mit dem vorgeschlagenen Modell eine verbesserte Vorhersagegenauigkeit und Erfassung der Versagensmodi erreicht werden (vgl. $M_{R,V,mod}$ in Bild 26).

Für eine genauere Nachrechnung der Versuche wurde das bereits beschriebene FE-Modell angewandt. Die Versuchskörper wurden hierbei mit zweidimensionalen Schalenelementen modelliert, die mit Kontaktelementen (*interfaces*) an die Auflagerblöcke angeschlossen wurden. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass sowohl die Last-Verformungs-Kurven als auch die Versagensmodi zutreffend erfasst werden konnten (Bild 23).

6.3.2 Bewertung der Ergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass:

- die Erkenntnisse zum Biegetragverhalten mikrobewehrter Betonbauteile auf dünnwandige Betonhohlbauteile übertragen werden können,
- sich aufgrund der geringen Wandstärken bei zusätzlicher Normalkraftbeanspruchung ein

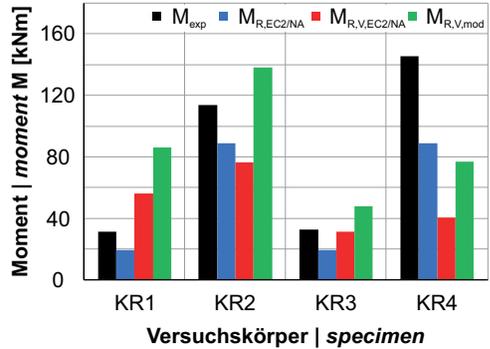


Bild 26: Vergleich der Momenten Tragfähigkeit M_R bzw. -beanspruchung $M_{R,V}$ bei Erreichen der Querkrafttragfähigkeit nach EC2/NA bzw. dem modifiziertem Modell mit Versuchsergebnissen M_{exp} | **Fig. 26:** Comparison of ultimate moment capacity M_R or moment when reaching ultimate shear force $M_{R,V}$ as by EC2/NA or modified approach and test results M_{exp}

Therefore, the shear capacity of members without shear reinforcement according to EC2/NA is considered:

$$V_{R,mod} = \min(V_{R,c} + V_{R,s}; V_{R,max}) \quad (7)$$

with:

$$V_{R,c} = \left[0,15 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,12 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot 2 \cdot t \cdot d \quad (8)$$

and:

k	factor considering the size-effect
ρ_l	longitudinal reinforcement ratio
f_{ck}	characteristic compressive strength of the concrete
σ_{cp}	compressive stress in the concrete due to normal force
t	wall thickness
d	effective depth
$\cot\beta$	crack inclination

Overall, an improved prediction accuracy and detection of the failure modes can be achieved through the proposed model (cf. $M_{R,V,mod}$ in Fig. 26).

The FE model described above was used for a more precise re-calculation of the tests. The specimens were modelled using two-dimensional shell elements that were connected to

schlagartiges Betondruckzonenversagen einstellt,

- die Momententragfähigkeit der dünnwandigen Betonhohlbauteile mit dem Modell nach EC2/NA sicher abgeschätzt werden kann,
- die Querkrafttragfähigkeit unter Beachtung der vorgeschlagenen Anpassungen gut, jedoch nicht vollständig erfasst wird und
- mit dem verwendeten FE-Modell sowohl die Last-Verformungs-Kurven als auch die Versagensmodi zutreffend erfasst werden können.

7 Tragverhalten dünnwandiger, mikrobewehrter Betonhohlbauteile unter Torsionsbeanspruchung

7.1 Versuchskonzept

Abschließend wurde das Torsionstragverhalten der dünnwandigen, mikrobewehrten Betonhohlbauteile untersucht (Bild 27). Um einen vorhandenen Versuchsstand nutzen zu können (vgl. [28]), wurden die dünnwandigen Versuchskörper monolithisch mit quadratischen Lasteinleitungsblöcken verbunden (Bild 6). Während der Versuche wurde die Verdrehung der Lasteinleitungsblöcke mit diagonalen Wegaufnehmern aufgezeichnet. Das Verformungsverhalten des dünnwandigen Prüfbereichs wurde über Dehnungsmessstreifen und mit ARAMIS überwacht. Insgesamt wurden vier Torsionsversuche durchgeführt, bei denen der Bewehrungsgrad sowie die aufgebrachte Normalkraft variiert wurden (Tabelle 6).



Bild 27: Versuchsaufbau für die Torsionsversuche an dünnwandigen Betonhohlbauteilen und Messtechnik | **Fig. 27:** Test setup for torsional tests on thin-walled hollow concrete members and measurement

the three-dimensional supports via interfaces. The calculation results show that both the load-deflection curves and the failure modes were accurately captured (Fig. 23).

6.3.2 Assessment of the results

The tests on the bending and shear behaviour of thin-walled hollow concrete members have shown that:

- the findings on the bending behaviour of micro-reinforced concrete members can be transferred to thin-walled hollow concrete members,
- due to the low wall thicknesses a sudden failure of the compression zone occurs when an additional normal force is applied,
- the bending capacity of the thin-walled hollow concrete members can be reliably estimated according to EC2/NA,
- when the proposed adjustments are taken into account, the shear capacity is adequately assessed, but not in its entirety, and that
- both the load-deformation curves and the failure modes can be accurately computed with the FE model used.

7 Load-bearing behaviour of thin-walled, micro-reinforced hollow concrete members under torsion

7.1 Test setup and test specimens

Finally, the torsional behaviour of the thin-walled, micro-reinforced hollow concrete members was investigated (Fig. 27). In order to enable the use of an existing test setup Fig. 28, the thin-walled specimens were connected monolithically to square loading areas (Fig. 6). During the tests the rotation of the loading areas was recorded by diagonally installed displacement transducers. The deformation behaviour of the thin-walled test area was monitored using strain gauges and the photogrammetric ARAMIS system. A total of four torsion tests were carried out, in which the reinforcement ratio and the applied normal force were varied (Table 6).

Versuchskörper Specimen	Abmessungen		Dimensions		Bewehrung Reinforcement		Normalkraft Normal force N [kN]	
	Wandstärke Wall thickness		Durchmesser Diameter		Bewehrungsgrad Reinforcement ratio			
	t [cm]		D [cm]		$\rho_{s,l}$ [%]	$\rho_{s,w}$ [%]		
T1	3,0		35		MR, n = 4	1,15	1,05	0
T2	3,0		35		MR, n = 7	2,00	1,83	0
T3	3,0		35		MR, n = 7	2,00	1,83	400
T4	3,0		35		MR, n = 7	2,00	1,83	800

Tabelle 6: Konfiguration der Versuchskörper für Torsionsversuche an dünnwandigen Betonhohlbauteilen | **Table 6:** Configuration of torsional tests on thin-walled hollow concrete members

7.2 Versuchsergebnisse

In allen Versuchen wurde ein vergleichbares Last-Verformungs-Verhalten beobachtet. Bis zum Erreichen der Torsionsrisslast wurden geringe, linear zunehmende Verdrehungen beobachtet. Nach Bildung der ersten Risse nahmen diese nichtlinear zu (Bild 28). Infolge der Normalkraftbeanspruchung konnten bei den Versuchen T3 und T4 erhöhte Torsionsrissmomente erreicht werden. Bei allen Versuchen wurde ein ähnliches Rissbild mit diagonal umlaufenden Rissen im Abstand von 2 bis 4 cm beobachtet. Während die Risse bei den Versuchskörpern T1 und T2 um etwa 40° gegen die Bauteilachse geneigt waren, stellten sich bei Normalkraftbeanspruchung deutlich flachere Risswinkel von etwa 20–25° ein (Bild 29). Das Versagen wurde durchgehend durch ein Versagen des Betons eingeleitet. Während bei den Versuchen T1 und T2 dem Versagen große Verdrehungen und damit Betondehnungen vorausgingen, kam es bei

7.2 Test results

A comparable load-deformation behaviour was observed in all tests. Linearly increasing twists were displayed until the torsional cracking moment was reached. In comparison to the T1 and T2 tests the additional normal forces of tests T3 and T4 lead to increased torsional cracking moments. After the first cracks formed, the twists increased non-linearly (Fig. 28). For all tests a similar crack pattern with inclined, circumferential cracks at a spacing of 2.0 to 4.0 cm was observed. While the cracks in the T1 and T2 test bodies were inclined at an angle of about 40° to the member's axis, significantly reduced crack angles of about 20–25° occurred in case of additionally applied normal forces (Fig. 29). At all times the failure was caused by a failure of the concrete. While the failure of tests T1 and T2 was preceded by large twists and thus large concrete strains, a sudden concrete failure occurred in tests T3 and T4 (Fig. 29).

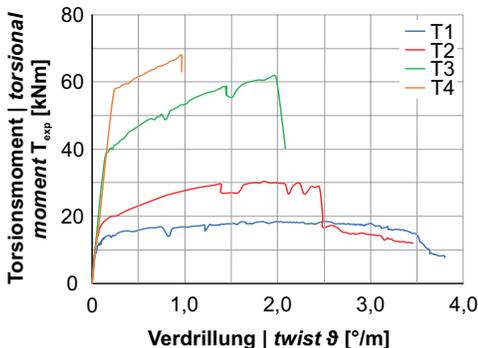


Bild 28: Torsionsmoment-Verdrillungs-Kurven der Torsionsversuche | **Fig. 28:** Torsional moment-twist curves of torsional tests

7.3 Evaluation

7.3.1 Recalculation of tests

The torsional capacity of the thin-walled hollow concrete members was determined according to EC2/NA (Fig. 30). It was found that the results of T1 and T2 were accurately predicted by the torsional capacity of the reinforcement $T_{R,S}$ although a failure of the concrete occurred. This can be explained by the fact that the torsion moments could not be increased after reaching the yield strength of the micro-

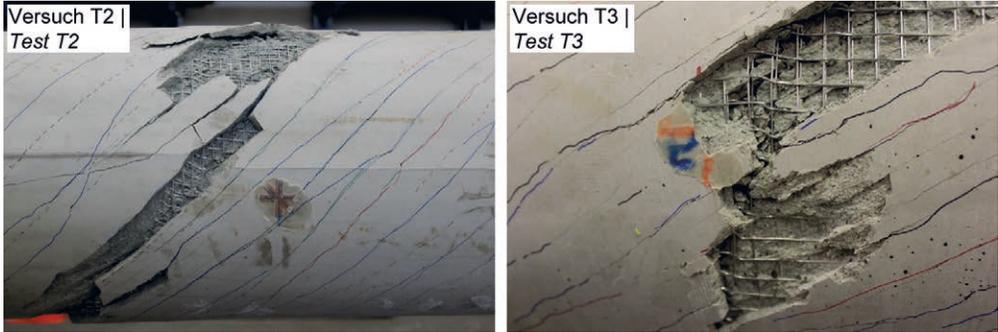


Bild 29: Rissbildung und Versagensmodi der Versuchskörper T2 und T3 (Betondruckversagen) | Fig. 29: Crack formations and failure characteristics of specimens T2 and T3 (failure of concrete in compression)

den Versuchen T3 und T4 zu einem schlagartigen Betonversagen (Bild 29).

7.3 Auswertung

7.3.1 Nachrechnung der Versuche

Die Torsionstragfähigkeit der dünnwandigen Betonhohlbauteile wurde in Anlehnung an das Modell nach EC2/NA ermittelt (Bild 30). Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Versuche T1 und T2, obgleich ein Betonversagen beobachtet wurde, mit dem Nachweis der Zugstreben­tragfähigkeit $T_{R,s}$ sehr gut abgebildet werden können. Dies kann damit begründet werden, dass die Torsionsmomente nach Erreichen der Streckgrenze der Mikrobewehrung nicht mehr gesteigert werden konnten. Bei den Versuchen T3 und T4 ist der Nachweis der Betondruckstreben­tragfähigkeit $T_{R,c}$ maßgebend. Diese wird nach EC2/NA jedoch leicht überschätzt. Analog zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit (Gl. (6)) ist zur Ermittlung von $T_{R,c}$ ein Abminderungsbeiwert $v_{1,T}$ zu beachten. Dieser ergibt sich bei Torsion nach EC2/NA zu:

$$v_{1,T} = 0,525 \cdot \left(1,1 - \frac{f_{ck} = 86,0}{500} \right) = 0,49 \quad (9)$$

Anhand der Tests konnten nun Abminderungsbeiwerte ermittelt werden, die sich entsprechend zu 0,37 für T3 und 0,44 für T4 ergaben. Dementsprechend wird für mikrobewehrte Betonhohlbauteile ein reduzierter Abminderungsbeiwert $v_{1,T} = 0,35$ vorgeschlagen ($T_{R,c,mod}$ in Bild 30).

reinforcement. The torsional capacity of the concrete $T_{R,c}$ is decisive looking at T3 and T4. However, the test results are slightly overestimated. As in the case of the determination of the shear capacity (Eq. (6)), a strength reduction factor $v_{1,T}$ must be incorporated for the determination of the concrete compression capacity $T_{R,c}$. According to EC2/NA the following applies:

$$v_{1,T} = 0.525 \cdot \left(1.1 - \frac{f_{ck} = 86.0}{500} \right) = 0.49 \quad (9)$$

The reduction coefficients were determined on the basis of the tests. A factor of 0.37 was obtained for T3 and of 0.44 for T4. Accordingly, a reduced strength reduction factor $v_{1,T} = 0.35$ can be proposed for micro-reinforced hollow concrete members ($T_{R,c,mod}$ in Fig. 30).

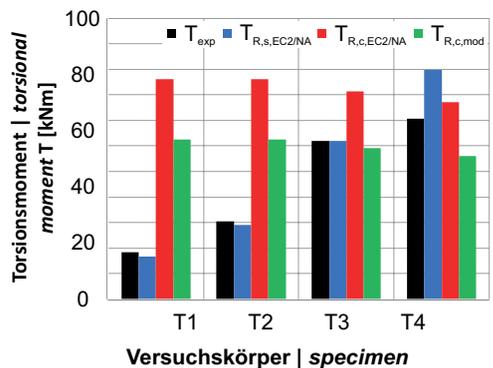


Bild 30: Vergleich der Torsionstragfähigkeit $T_{R,s}$ bzw. $T_{R,c}$ nach EC2/NA und modifiziertem Modell mit Versuchsergebnissen T_{exp} | Fig. 30: Comparison of ultimate torsional capacity $T_{R,s}$ or $T_{R,c}$ as by EC2/NA or modified approach and test results T_{exp}

7.3.2 Bewertung der Ergebnisse

Mit den Torsionsversuchen konnten die zuvor gewonnenen Erkenntnisse zum Tragverhalten dünnwandiger, mikrobewehrter Betonhohlbauteile bestätigt und erweitert werden:

- Torsionstragverhalten und Torsionsrissbildung werden maßgeblich durch eine zusätzlich einwirkende Normalkraft beeinflusst, vor allem stellt sich dann eine deutlich flachere Neigung der umlaufenden Risse ein.
- In allen Tests leitete ein Versagen des Betons das Bauteilversagen ein. Das Versagen selbst erfolgt zunächst duktil, jedoch mit zunehmender Normalkraftbeanspruchung schlagartig.
- Die Nachrechnung der Versuche bestätigt, dass der Abminderungsbeiwert $v_{1,T}$ zur Erfassung der Reduktion der Betondruckfestigkeit bei Rissbildung eine entscheidende Rolle bei der Ermittlung der Torsionstragfähigkeit der dünnwandigen Betonhohlbauteile einnimmt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ wurden am iBMB, Fachgebiet Massivbau der TU Braunschweig umfangreiche Untersuchungen zur Herstellung und zum Tragverhalten „Ultraleichter, dünnwandiger stabförmiger Betonhohlbauteile“ unter Normalkraft-, Biege-, Querkraft- und Torsionsbeanspruchung durchgeführt. Zusammenfassend können hierzu folgende Punkte festgehalten werden:

- Die Herstellung ultraleichter, dünnwandiger Betonhohlbauteile mit Wandstärken von nur 25 mm ist in hoher und reproduzierbarer Qualität möglich.
- Als Bewehrung in den geringen Wandstärken eignet sich besonders eine mehrlagige Mikrobewehrung, die im Vergleich zu Bewehrungsstäben eine erhöhte Flexibilität ermöglicht.
- Beim Biege- und Querkrafttragverhalten mikrobewehrter Betonbauteile bestehen deutliche Ähnlichkeiten zu Stahlbetonbauteilen, daher ist eine Berechnung in Anlehnung an die aus dem Stahlbetonbau bekannten Modelle und Verfah-

7.3.2 Assessment of the results

The torsion tests confirmed and extended the knowledge gained in previous studies on the load-bearing behaviour of thin-walled, micro-reinforced hollow concrete members:

- The torsional behaviour and the crack formation are significantly influenced by an additional normal force. While a large number of circumferential inclined cracks formed in all tests, their inclination became significantly lower with a normal force acting.
- In all tests a failure of the concrete is responsible for the failure of the members. A ductile failure occurred without additional normal force, but a sudden failure was observed with increasing normal force.
- The recalculation of the tests confirms that the strength reduction factor $v_{1,T}$ is decisive for the determination of the torsional capacity of the thin-walled hollow concrete members.

8 Summary and outlook

Within the scope of SPP 1542 “Concrete Light” extensive investigations on the manufacturing of “Ultra-light, thin-walled hollow concrete members” and their load-bearing behaviour under normal force, bending, shear and torsion were carried out at the iBMB, Division of Concrete Construction of the TU Braunschweig. In summary, the following aspects can be noted:

- The manufacturing of ultra-light, thin-walled hollow concrete members with wall thicknesses of only 25 mm is possible in high and reproducible quality.
- Multi-layer micro-reinforcement is particularly suitable as reinforcement in the low wall thicknesses due to its increased flexibility.
- The bending and shear force behaviour of micro-reinforced concrete members is clearly similar to that of reinforced concrete. Therefore a calculation based on the models and methods known from reinforced concrete construction is possible. Due to the increased ductility and the resulting increased deformation

ren möglich. Infolge der erhöhten Duktilität und der hieraus resultierenden erhöhten Verformungskapazität des mikrobewehrten Betons wurden Anpassungen der Modelle nach EC2/NA vorgeschlagen.

- In Torsionsversuchen wurde der Einfluss der erhöhten Duktilität der Mikrobewehrung auf die Bauteilverformungen und die hieraus resultierende Abminderung der Betondruckfestigkeit bei Rissbildung bestätigt. Die Torsionstragfähigkeit kann ebenfalls mit einer Modifikation des Ansatzes nach EC2/NA ermittelt werden.

Insgesamt konnten mit den Untersuchungen in der 1. und 2. Förderperiode des SPP 1542 die Grundlagen für eine praktische Anwendung ultraleichter, dünnwandiger, stabförmiger Betonhohlbauteile gelegt werden. Mit Blick auf den Einsatz der Bauteile in zwei- und dreidimensionalen Strukturen sind weitergehende Untersuchungen zur Verbindung der Bauteile untereinander (Stoß) bzw. zum Anschluss an Fundamente erforderlich. In einem zweiten Schritt ist die Entwicklung universell einsetzbarer Knotenelemente mit einer frei geformten, an den Kraftfluss angepassten Mikrobewehrung von Interesse. Ferner sind Untersuchungen zu Sicherheitsaspekten (z. B. Bestimmung von Teilsicherheitsbeiwerten) sowie zu konstruktiven Fragestellungen (z. B. Übergreifungs- und Verankerungslängen) erforderlich.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts (Projektnummer 198434790) innerhalb des SPP 1542. Zudem bedanken sich die Autoren bei den Firmen Dyckerhoff und Grace für die Unterstützung während der Bearbeitung.

Literatur | References

- [1] Busse, D.; Sawicki, P.; Empelmann, M.: Ultraleichte, dünnwandige Betonhohlbauteile aus hochfestem Feinkornbeton. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 36–47 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171364>
- [2] Busse, D., Empelmann, M.: Tragverhalten dünnwandiger Betonhohlbauteile aus hochfestem Feinkornbeton. Bautechnik 92 (2015) 1, S. 46–56 – DOI: 10.1002/bate.201400055
- [3] Mander, J. B.: Seismic design of bridge piers. Diss., University of Canterbury, Christchurch (Neuseeland), 1983

capacity of the micro-reinforced concrete, adaptations of the models according to EC2/NA were proposed.

- In torsion tests, the influence of the increased ductility of the micro-reinforcement on the member's deformations and the resulting reduction of the concrete compressive strength due to the crack formation was confirmed. The torsional strength can also be predicted by modifying the approach according to EC2/NA.

The investigations carried out during the first and second funding period of the SPP 1542 laid the foundations for the practical application of “ultra-light, thin-walled hollow concrete members“. With regard to the use of the members in two- and three-dimensional structures, further investigations are required to connect the components to each other (joint) or to connect them to foundations. In a second step, the development of universally applicable nodal elements with a freely formed micro-reinforcement adapted to the flow of forces is of interest. Furthermore, investigations are required on safety aspects (e.g. determination of partial safety factors) as well as on design issues (e.g. lap and anchorage lengths).

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project within the Priority Programme SPP 1542, project number 198434790. Furthermore, the authors would like to thank the companies Dyckerhoff and Grace for their support during the project.

- [4] Dhakal, R. P.; Maekawa, K.: Modeling for Postyield Buckling of Reinforcement. *Journal of Structural Engineering* 128 (2002) 9, S. 1139–1147
- [5] Busse, D.; Sawicki, P.; Empelmann, M.: Dünnwandige Betonhohlbauteile aus hochfestem Feinkornbeton. *beton* 66 (2016) 1+2, S. 30–35
- [6] Busse, D.; Empelmann, M.: Ultra-lightweight, tubular concrete members for three-dimensional truss structures. In: KIVI (Hrsg.): *Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp.* 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-523542 (publiziert auf USB-Stick: 12 S.)
- [7] DIN EN 1992-1-1:2011-01 und DIN EN 1992-1-1/A1: 2015-03: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010 und DIN EN 1992-1-1/A1:2014.
- [8] DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04 und DIN EN 1992-1-1/NA/A1:2015-12 – Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; inkl. Änderung A1.
- [9] DIN EN 12390-3:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009.
- [10] DIN EN 196-1:2005-05: Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:2005.
- [11] Gutsch, A.-W.: Stoffeigenschaften des jungen Betons – Versuche und Modelle. Diss., TU Braunschweig, 1998
- [12] DIN EN 12390-6:2010-09: Prüfung von Festbeton – Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-6:2009.
- [13] DIN EN 12390-5:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-5:2009.
- [14] Empelmann, M.; Sawicki, P.: Ultra-lightweight concrete members inspired by bamboo. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): *Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering*, 22.–25.07.2012 in Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 291–296
- [15] Busse, D.; Empelmann, M.: Ultra-light Concrete Members Inspired by Bamboo. Stang, H.; Braestrup, M. (Hrsg.): *Proc. of fib Symp.* 2015, 18.–20.05.2015 in Kopenhagen (Dänemark), Kopenhagen: Danish Concrete Society, 2015, S. 199–200 (Abstract; Langfassung auf CD: 8 S.)
- [16] Steven, G.; Empelmann, M.: Gedrungene Stützen aus UHPFRC mit hochfester Längsbewehrung. *Beton- und Stahlbetonbau* 109 (2014) 5, S. 344–354 – DOI: 10.1002/best.201300090
- [17] Busse, D.; Empelmann, M.: Bending behaviour of high-performance, micro-reinforced concrete. *Structural Concrete* 20 (2019) 2, S. 720–729 – DOI: 10.1002/suco201700246
- [18] American Concrete Institute (ACI): *State-of-the-Art Report on Ferrocement*. ACI-Report 549R-97, 01/1997
- [19] Schnellenbach-Held, M.; Prager, M.: Mikrobewehrter Ultrahochleistungsbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011) 11, S. 770–778 – DOI: 10.1002/best.201100030
- [20] Busse, D.; Empelmann, M.: Dünnwandige, mikrobewehrte Betonbauteile unter Querkraftbeanspruchung. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 12, S. 840–850 – DOI: 10.1002/best.201600043
- [21] Busse, D.; Empelmann, M.: Shear Strength of Thin-Walled, Micro-Reinforced Concrete Members. In: Norwegian Concrete Association (Hrsg.): *Proc. of HPC/CIC 2017*, 06.–08.03.2017 in Tromsø (Norwegen), Oslo: Norwegian Concrete Association, S. 14 (Abstract, Langfassung auf USB-Stick: 10 S.)
- [22] Busse, D.; Empelmann, M.: Shear strength of thin-walled concrete members with micro-reinforcement. Kohoutková, A. et al. (Hrsg.): *Proc. of the 12th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering*, 29.–31.08.2018 in Prag (Tschechien), Beitrag auf USB-Stick: 8 S.
- [23] Vecchio, F. J.; Collins, M. P.: Compression Response of Cracked Reinforced Concrete. *Journal of Structural Engineering* 119 (1993) 12, S. 3590–3610
- [24] Zedler, T.: *Zum Tragverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken unter Torsion*. Diss., RWTH Aachen University, 2011
- [25] Busse, D.; Eckfeldt, L.; Empelmann, M.: Assessing the reliability of existing concrete bridges in terms of shear strength. In: Zingoni, A. (Hrsg.): *Research and applications in structural engineering, mechanics and computation – Proc. of SEMC 2013*, 02.–04.09.2013 in Kapstadt (Südafrika), Boca Raton, FL: CRC Press, S. 1497–1502
- [26] Herbrand, M.; Kueres, D.; Claßen, M.; Hegger, J.: Einheitliches Querkraftmodell zur Bemessung von Stahl- und Spannbetonbrücken im Bestand. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 2, S. 58–67 – DOI: 10.1002/best.201500055
- [27] Reineck, K.-H.: Hintergründe zur Querkraftbemessung in DIN 1045-1 für Bauteile aus Konstruktionsbeton mit Querkraftbewehrung. *Bauingenieur* 76 (2001) 4, S. 168–179
- [28] Oettel, V.; Empelmann, M.: Druckstreben tragfähigkeit von vorgespannten UHPFRC-Hohlkästen unter Torsion und kombinierter Beanspruchung. *Beton- und Stahlbetonbau* 109 (2014) 3, S. 182–192 – DOI: 10.1002/best.201300061

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1–5, 7–11, 13–15, 17–22, 25–30: Daniel Busse
- Bild | Picture 6: Daniel Busse, Patricia Sawicki
- Bilder | Pictures 12, 23: Daniel Busse, Stefan Ehrke
- Bild | Picture 16: Daniel Busse, Felix Riemenschneider
- Bild | Picture 24: Daniel Busse, Sina Kalus

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Ultraleichte, dünnwandige stabförmige Betonhohlbauteile (Phase I)

Ultraleichte, dünnwandige stabförmige Betonhohlbauteile unter Querkraft- und Torsionsbeanspruchung (Phase II)

Ultra-light, thin-walled hollow concrete members (1st phase)

Ultra-light, thin-walled hollow concrete members under shear and torsion (2nd phase)

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Martin Empelmann Leiter des Fachgebiets Massivbau Head of Division of Concrete Construction
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	EM 203/6-1/2 (Projektnummer Project number: 198434790)
Adresse Address:	TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), FG Massivbau, Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig
Kontakt Contact:	+49 531 391 5409 massivbau@ibmb.tu-bs.de www.ibmb.tu-bs.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Förderphase I Funding period I: 01.07.2011–30.06.2014 Förderphase II Funding period II: 01.10.2014–30.09.2017 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 30.11.2017
Team Team:	Daniel Busse (03/2013–06/2014, 10/2014–11/2017) Patricia Sawicki (07/2011–06/2013)
Partner Partners:	Dyckerhoff GmbH, Wiesbaden Grace Bauprodukte GmbH /GCP Germany GmbH, Lügde

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Empelmann, M.; Sawicki, P.: Ultra-lightweight concrete members inspired by bamboo. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 in Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 291–296
- Busse, D.; Sawicki, P.; Empelmann, M.: Ultraleichte, dünnwandige Betonhohlbauteile aus hochfestem Feinkornbeton. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 36–47 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171364>
- Busse, D.; Empelmann, M.: Tragverhalten dünnwandiger Betonhohlbauteile aus hochfestem Feinkornbeton. Bautechnik 92 (2015) 1, S. 46–56 – DOI: 10.1002/bate.201400055
- Busse, D.; Empelmann, M.: Ultra-light Concrete Members Inspired by Bamboo. Stang, H.; Braestrup, M. (Hrsg.): Proc. of fib Symp. 2015, 18.–20.05.2015 in Kopenhagen (Dänemark), Kopenhagen: Danish Concrete Society, 2015, S. 199–200 (Abstract), Langfassung auf CD: 8 S.
- Busse, D.; Empelmann, M.: Ultra-lightweight, tubular concrete members for three-dimensional truss structures. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-523542, publ. auf USB-Stick: 12 S.
- Busse, D.; Sawicki, P.; Empelmann, M.: Dünnwandige Betonhohlbauteile aus hochfestem Feinkornbeton. beton 66 (2016) 1+2, S. 30–35
- Busse, D.; Empelmann, M.: Dünnwandige, mikrobewehrte Betonbauteile unter Querkraftbeanspruchung. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 840–850 – DOI: 10.1002/best.201600043
- Busse, D.; Empelmann, M.: Shear Strength of Thin-Walled, Micro-Reinforced Concrete Members. In: Norwegian Concrete Association (Hrsg.): Proc. of HPC/CIC 2017, 06.–08.03.2017 in Tromsø (Norwegen), Oslo: Norwegian Concrete Association, S. 14 (Abstract), Langfassung auf USB-Stick: 10 S.
- Busse, D.; Empelmann, M.: Bending behavior of high-performance, micro-reinforced concrete. Structural Concrete 20 (2019) 2, S. 720–729 – <https://doi.org/10.1002/suco.201700246>
- Busse, D.; Empelmann, M.: Shear strength of thin-walled concrete members with micro-reinforcement. Kohoutková, A. et al. (Hrsg.): Proc. of the 12th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 29.–31.08.2018 in Prag (Tschechien), Beitrag auf USB-Stick: 8 S.

- Empelmann, M.; Busse, D.: Micro-reinforced precast members – Potentials of an almost forgotten construction method. Mikrobewehrte Fertigteile – Potenziale einer fast vergessenen Bauweise. Betonwerk + Fertigteil-Technik (BFT) International 85 (2019) 2, S. 93

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Busse, D.: Querkrafttragverhalten dünnwandiger, mikrobewehrter Betonbauteile. Diss., 2019

Studienarbeiten | Student's research projects

- Kertscher, T.: Verbindungen für modulare Betonfertigteilstabwerke. 2013
- Stute, K.-M.: Untersuchungen zum kraftflussoptimierten Bauen in Anlehnung an bionische Vorbilder. 2013
- Baumgarten, V.: Formoptimierung von Betonbauteilen. 2014
- Drees, S.: Untersuchungen zu Lochblechen als Bewehrung für dünnwandige Betonrohre. 2014
- Ilkaya, S.: Bewehren dünnwandiger Stahlbetonbauteile. 2014
- Wilke, D.: Untersuchung von Maßstabeffekten auf Versagensmechanismen dünnwandiger Betonquerschnitte. 2014
- Ringe, T.: Querkraftnachweis von dünnwandigen, stahlfaserbewehrten Betonbauteilen. 2015
- Wang, A.: Bewehren dünnwandiger Stahlbetonbauteile. 2015
- Franzen, L.: Zugfestigkeit hochfester Feinkornbetone. 2016
- Herrmann, E.: Tragverhalten von hochfestem, mikrobewehrtem Beton. 2016
- Höper, S.: Querkraftverhalten von mikrobewehrtem Beton. 2016
- Kramer, S.: Querkrafttragverhalten von hochfestem, mikrobewehrtem Beton. 2016
- Niehaus, D.: Querkraftnachweis von Stahlbetonbauteilen mit Kreis- und Kreisringquerschnitt nach DIN EN 1992. 2016
- Oberstuke, F.: Biegeschubtragverhalten von mikrobewehrtem Beton. 2016.
- Ehrke, S.: Tragverhalten von hochfestem, mikrobewehrtem Beton. 2017
- Jahns, H.: Last-Verformungs-Verhalten von hochfestem, mikrobewehrtem Beton bei Biegebeanspruchung. 2017
- Kalus, S.: Querkrafttragfähigkeit dünnwandiger Kreisringquerschnitte. 2017
- Recksiek, H.: Querkraftnachweis von Stahlbetonbauteilen mit Kreis- und Kreisringquerschnitt. 2017
- Riemenschneider, F.: Torsionstragverhalten dünnwandiger Betonhohlbauteile. 2017
- Schmidt, F.: Tragverhalten von hochfestem, mikrobewehrtem Beton. 2017

Bachelorarbeiten | Bachelor's Theses

- Keie, J.: Einsatz von hochfestem Beton für stabförmige Druckglieder. 2012
- Kalus, S.: Tragverhalten von hochfestem, mikrobewehrtem Beton. 2015

Masterarbeiten | Master's Theses

- Akinci, K.: Untersuchungen zur Stabilitätsgefährdung von dünnwandigen Stahlbetonwerken. 2013
- Christens, H.: Querkrafttragfähigkeit von Betonbauteilen mit Kreis- und Kreisringquerschnitt. 2017
- Franzen, L.: Ermittlung der Schubbrisslast mikrobewehrter Betonbauteile. 2017
- Riemenschneider, F.: Entwicklung eines Berechnungs-Tools für die Biegebemessung dünnwandiger, mikrobewehrter Betonbauteile. 2017
- Ehrke, S.: Dünnwandige, mikrobewehrte Betonhohlbauteile unter Biege- und Querkraftbeanspruchung. 2018
- Kalus, S.: Bemessungsmodelle für dünnwandige, mikrobewehrte Betonhohlbauteile. 2018

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation des SPP-Jahrestreffens in Braunschweig im November 2012 | Organization of the SPP annual meeting in Braunschweig, November 2012
- Herstellung des Demonstrators Uni.Con² (in Kooperation mit dem Projektteam Budelmann/Kloft, Februar 2017 | Production of the demonstrator Uni.Con² (in cooperation with the project team Budelmann & Kloft, February 2017

Formoptimierte filigrane Stäbe aus UHPC und korrosionsfreier CFK-Bewehrung für variable räumliche Stabtragwerke | Shape optimized filigree rods made of UHPC and non-corrosive CFRP reinforcement for variable three-dimensional trusses

- ▶ Michael Henke, Oliver Fischer
- ▶ Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München (TUM)

1 Projektidee und Zielsetzung

Die Vision bei diesem Projekt bestand darin, zukünftig anstelle massiver Betontragsysteme mit meist ungleichmäßiger Materialausnutzung am Kraftfluss orientierte, filigrane, stabartige Tragwerke zu entwerfen, die sich neben der Gewichtsreduktion und einer höheren Transparenz auch durch eine bessere Ressourcennutzung auszeichnen. Dabei wurde eine modulare Bauweise angestrebt, bei der die Einzelkomponenten Druckstab und vorgespannter Zugstab sowie Teile des Verbindungsknotenelements vorgefertigt und am Einsatzort zusammengefügt werden. Sowohl im Hinblick auf die Tragfähigkeits- und Verbundeigenschaften als auch auf die Dauerhaftigkeit sollten die Stäbe aus faserverstärktem Ultrahochleistungsbeton (UHPFRC) hergestellt sowie ausschließlich mit nichtmetallischen Elementen aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) bewehrt bzw. vorgespannt werden. Im geförderten Zeitraum lag das Hauptaugenmerk auf der Entwicklung filigraner, formoptimierter Druck- und vorgespannter Zugstäbe. Zum Knotenelement wurden theoretische Überlegungen sowie erste Tastversuche angestellt.

1 Vision and objective

The vision of this project was to replace massive concrete structures with mostly inhomogeneous material utilization in the future by designing filigree concrete truss supporting structures in accordance with the principle *form follows force* instead. Thus, besides weight reduction and a higher transparency also a higher resource efficiency can be achieved. A modular construction method, in which the components compression strut, prestressed tie and connection joint elements are prefabricated and joined together at the construction site, was aspired. With regard to load-bearing capacity and bonding behaviour as well as durability, the struts and ties are made of Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC) and are reinforced or prestressed exclusively with non-metallic elements made of fibre-reinforced polymers (FRP). Within the funding period, the focus was on the development of filigree, shape-optimized struts and prestressed ties. Regarding the connection joint element, theoretical considerations were made and first basic tests were carried out.

2 Vorgespannte Zugstäbe

Ziel war die Entwicklung möglichst schlanker, unter Gebrauchslasten ungerissener Zugstäbe, um große Verformungen des Gesamtragwerks zu vermeiden. Die Zugstäbe sollten daher planmäßig mit Stäben aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) im sofortigen Verbund vorgespannt werden. Aufgrund der geringen realisierbaren Betondeckungen bei filigranen Bauteilen sowie den guten mechanischen Eigenschaften war CFK für den Einsatz prädestiniert. Ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt lag auf der Minimierung der Spannkrafteinleitungslänge, um geometrisch kleine Stabwerksknotenelemente zu verwirklichen. Die Verwendung von UHPFRC bietet sich abgesehen von den exzellenten Dauerhaftigkeitseigenschaften daher auch aufgrund der hohen Verbundfestigkeiten an.

2.1 Materialien

2.1.1 Faserverstärkter Ultrahochleistungsbeton (UHPFRC)

Um auf Ergebnissen des SPP 1182 „Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem Beton“ aufbauen zu können, wurde zunächst die Feinkornmischung M2Qb nach [1] als UHPFRC-Standardmischung festgelegt. Im Verlauf des Projekts wurde diese zugunsten verbesserter Verarbeitungseigenschaften durch die modifizierte Mischung M4Q ersetzt, die am Centrum Baustoffe und Materialprüfung der

2 Prestressed ties

The aim was to develop ties as slender as possible that remain uncracked under service loads in order to avoid large deformations of the overall structure. Therefore the ties should be prestressed by single rods made of carbon fibre-reinforced polymers (CFRP). Non-corrosive CFRP was predestined for this application due to the thin realisable concrete covers in filigree components and the good mechanical properties. One major research focus was on minimising the transfer length in order to be able to realise geometrically small connection joint elements. Thus, apart from the excellent durability properties, the use of UHPFRC is also suitable due to its high bond strengths.

2.1 Materials

2.1.1 Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)

In order to be able to build on the results of SPP 1182 “Building Sustainable with Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)”, the fine-grained mixture M2Qb according to [1] was chosen as standard mixture in the beginning. In favour of better processing properties, this mixture was replaced in the course of the project by the modified mixture M4Q, which was developed at the Centre of Building Materials of the TU München (cf. [2]). The concrete mixes and the properties of hardened concrete are given in Tables 1 and 2.

Rohstoff Raw material	Produkt Product	Menge Amount [kg/dm ³]	
		M2Qb	M4Q
Zement Cement	CEM I 52,5 R-HS/NA	832	680
Quarzsand Quartz sand	H33 0,125–0,5 mm	975	990
Quarzmehl Quartz powder	Millisil® W12	207	–
	Sikron® SF500	–	360
Mikrosilika Silica fume	Elkem Microsilica® 971	135	138
Wasser Water	–	166	164
Fließmittel Superplasticizer	BASF, Master Glenium® 51	30,4	35,0
Stahlfasern Steel fibres (2,5 Vol.-%)	Weidacon FM 0,15/9	192	192
w/b-Wert Water-binder ratio	–	0,19	0,23

Tabelle 1: Mischungszusammensetzungen | Table 1: Concrete mixes

Eigenschaft Property	M2Qb	M4Q
Druckfestigkeit Compressive strength f_{cm} [N/mm ²]	168,4	172,8
Elastizitätsmodul Young's modulus E_{cm} [N/mm ²]	47.860	46.973
Zentrische Zugfestigkeit Uniaxial tensile strength f_{ct} [N/mm ²]	-	8,4

Tabelle 2: Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen | **Table 2:** Properties of hardened concrete after 28 days

TU München entwickelt wurde (vgl. [2]). Die Mischungszusammensetzungen sowie die Festbetoneigenschaften sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengestellt.

2.1.2 Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)

Basierend auf einer Produktrecherche wurden zunächst die CFK-Stäbe Carbopree® HS (Sireg Group) als Spannbewehrung ausgewählt. Diese weisen an der Oberfläche entweder eine Quarzsandschicht (HS 7,5s) zur Verbundverbesserung oder ggf. zusätzlich ein spiralförmig angebrachtes Kunststoffband (HS 5,5 / 7,5) auf (Bild 1, oben links). Aufgrund unbefriedigender Ergebnisse bei den Spannkrafteinleitungsversuchen (s. Abschnitt 2.3) wurden weitere Tests mit dem glatten CFK-Stab CarboDur® BC8 (Sika, Bild 1, oben rechts) sowie einer selbst modifizierten Variante dieses Stabes durchgeführt, bei der mit einem Gewindeschneider eine geriffelte Oberflächenstruktur erzeugt wurde (Bild 1, unten links). Als kostengünstigere Alternative zu CFK-Stäben als schlaaffe Bewehrung für die Druckstäbe wurde außerdem das Verbundverhalten der Stäbe REBAR Ø6-B und Ø10-B (solidian GmbH) aus basaltfaser-

2.1.2 Fibre-reinforced polymers (FRP)

Based on a product research, CFRP bars Carbopree® HS (Sireg Group) were initially chosen as prestressing reinforcement. To improve the bond properties, these bars either have a layer of quartz sand (HS 7,5s) on the surface, or additionally a spirally attached plastic strapping (HS 5,5 / 7,5) (Fig. 1, top left). Due to unsatisfactory results in the transfer length tests (cf. section 2.3), further tests with the smooth CFRP bar CarboDur® BC8 (Sika, Fig. 1, top right) as well as with a self-modified variant of this bar, in which a grooved surface structure was created with a tap (Fig. 1, bottom left), were carried out. Furthermore, as a more cost-efficient alternative to CFRP bars as conventional reinforcement for the struts, the bond behaviour of the bars REBAR Ø6-B and Ø10-B (solidian GmbH) made of basalt fibre-reinforced polymers (BFRP) with a ribbed surface at rib heights of ~0.1 mm was also investigated (Fig. 1, bottom right). The most important specifications of the used CFRP and BFRP bars are summarized in Table 3.

Spezifikation Specification	sireg Carbopree® HS	Sika® CarboDur®	solidian® REBAR
Bezeichnung Denotation	5,5 / 7,5 / 7,5s	BC8 / BC8 mod.	Ø6-B / Ø10-B
Material Material	CFK CFRP	CFK CFRP	BFK BFRP
Gemessener Durchmesser Measured diameter d_m [mm]	6,3 / 8,1 / 8,1	8,0 / 7,5	5,3 / 10,1
Effektiver Durchmesser Effective diameter d_{eff} [mm]	5,5 / 7,5 / 7,5	8,0 / 7,5	5,2 / 10,0
Zugfestigkeit Tensile strength f_t [N/mm ²]	2.300	3.100	1.200 / 1.400
Rechnerische Versagenslast Calculated failure load $F_{t,cal} = d_{eff}^2 / 4 \cdot \pi \cdot f_t$ [kN]	55 / 102 / 102	156 / 137	25 / 112
Elastizitätsmodul Young's modulus [N/mm ²]	130.000	148.000	62.000
Bruchdehnung Fracture strain [%]	1,8	1,7	2,2

Tabelle 3: Spezifikationen der verwendeten FVK-Stäbe | **Table 3:** Specifications of the used FRP bars

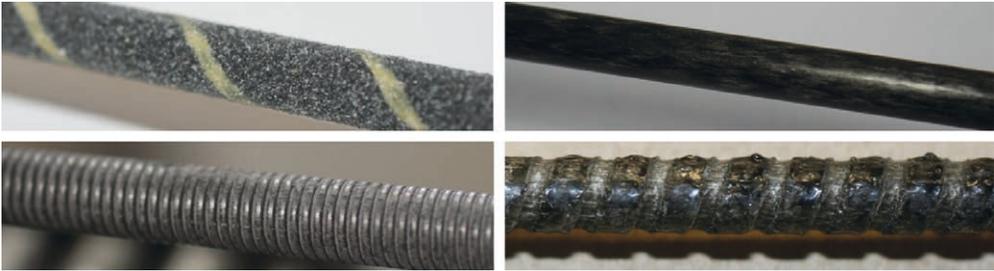


Bild 1: FVK-Stäbe (von links oben nach rechts unten): sireg Carbopree® HS 7,5, Sika® CarboDur® BC8, Sika® CarboDur® BC8 mod., solidian® REBAR Ø6-B | **Fig. 1:** FRP bars (top left to bottom right): sireg Carbopree® HS 7,5, Sika® CarboDur® BC8, Sika® CarboDur® BC8 mod., solidian® BAR Ø6-B

verstärktem Kunststoff (BFK) mit einer gerippten Oberfläche bei Rippenhöhen von ~0,1 mm untersucht (Bild 1, unten rechts). Die wichtigsten Spezifikationen der CFK- und BFK-Stäbe sind in Tabelle 3 aufgeführt.

2.2 Ausziehversuche mit FVK-Bewehrung

Zur Beurteilung der grundsätzlichen Eignung der CFK-Stäbe als Spannbewehrung bzw. der BFK-Stäbe als schlaaffe Bewehrung in UHPFRC wurden die Verbundeigenschaften anhand von insgesamt 84 Ausziehversuchen unter Varia-

2.2 Pull-out tests with FRP reinforcement

In order to evaluate the general suitability of the CFRP bars as prestressing resp. the BFRP bars as conventional reinforcement in UHPFRC, the bond properties were investigated in 84 pull-out tests under variation of the parameters bar diameter d_{eff} , surface condition, bond length l_b , concrete age and strength f_{cm} and concrete cover c . For each parameter set, 3 or 4 pull-out tests were carried out and the mean bond stress τ_{bm} was determined (Table 4).

Stab Bar	Beton Concrete	Effektiver Stabdurchmesser Effective bar diameter d_{eff}	Druckfestigkeit Compressive strength f_{cm}	Bezogene Verbundlänge Referred bond length $l_b^{*1)}$	Bezogene Betondeckung Referred concrete cover $c^{*2)}$	Mittlere Verbundspannung Mean bond stress $\tau_{bm}^{*3)}$
	[-]	[mm]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[N/mm ²]
Carbopree® HS 5,5	M2Q	5,5	115,2 88,1 121,9	3 8 3 3 6	~ 10 2 3 2	32,57 25,67 27,85 28,49 31,59 28,24
Carbopree® HS 7,5	M2Q	7,5	115,2 88,1 121,9	3 8 3 3 6	~ 9,5 2 3 2	24,00 20,38 24,24 24,53 26,86 23,24
Carbopree® HS 7,5s	M2Q	7,5	115,2 88,1 121,9	3 8 3 3 6	~ 9,5 2 3 2	27,82 23,48 29,83 29,49 30,34 27,08
CarboDur® BC8	M4Q	8,0	91,3	3	2	1,31
CarboDur® BC8 mod.	M4Q	7,5	91,3	3	2	16,03
REBAR Ø6-B	M4Q	5,2	154,2 154,2	6	2 3	26,57 29,59 24,17 26,95
REBAR Ø10-B	M4Q	10,0	161,3	3	2 3	17,94 18,50

¹⁾ $l_b^* = l_b / d_{eff}$, ²⁾ $c^* = c / d_{eff}$, ³⁾ Mittelwert aus 3 bzw. 4 Einzelversuchen | Mean value of 3 resp. 4 single tests

Tabelle 4: Ergebnisse der Ausziehversuche | **Table 4:** Results of pull-out tests

tion der Parameter Stabdurchmesser d_{eff} , Oberflächenbeschaffenheit, Verbundlänge l_b , Betonalter, Betonfestigkeit f_{cm} und Betondeckung c untersucht. Je Parameterkonfiguration wurden 3 bzw. 4 Ausziehversuche durchgeführt und aus den Ergebnissen eine mittlere Verbundspannung τ_{bm} bestimmt (Tabelle 4).

Die Versuche mit Carbpree®- und REBAR-Stäben zeigten, dass die mittlere Verbundspannung τ_{bm} zwar unabhängig von Stabart und -oberfläche mit steigender Verbundlänge abnimmt, dies jedoch selbst bei einer Verdoppelung der Verbundlänge nur in relativ geringem Maße. Während bei den Carbpree®-Stäben kein wesentlicher Einfluss der Betondeckung auf τ_b festgestellt werden konnte, zeigten die Tests mit den gerippten BFK-Stäben REBAR Ø6-B eine relevante Abnahme der übertragbaren Verbundspannung bei einer Reduzierung der Betondeckung von $3 d_{eff}$ auf $2 d_{eff}$. Dies war in der Regel mit der Ausbildung eines Risses in der Betondeckung ausgehend vom Stab verbunden (Bild 2, rechts). Trotz Rissbildung zeigten die Verbundspannungs-Schlupf-Kurven jedoch keinen signifikanten Abfall von τ_b , wie es bei einem Sprengrissversagen zu erwarten gewesen wäre, sondern ähneln den Verläufen der Versuche mit einer Betondeckung von $3 d_{eff}$, bei denen keine Rissbildung auftrat (Bild 2, links).

The pull-out tests with Carbpree® and REBAR bars showed that, regardless of bar type and surface, the mean bond stress τ_{bm} decreases with increasing bond length, but only to a relatively small extent even when the bond length is doubled. While for the Carbpree® bars no significant influence of the concrete cover on τ_b was found, the tests with the ribbed BFRP bars REBAR Ø6-B showed a relevant decrease of the transmissible bond stress as the concrete cover is reduced from $3 d_{eff}$ to $2 d_{eff}$. This was usually accompanied with the formation of a crack in the concrete cover starting from the bar (Fig. 2, right). Despite crack formation, however, the bond stress-slip curves did not show a significant decrease of τ_b as expected in the case of a splitting crack failure, but had similar shapes as the curves from tests with a concrete cover of $3 d_{eff}$, where no crack formation was observed (Fig. 2, left).

In general, all Carbpree® bars and the smooth CarboDur® BC8 bars showed a very low slip until the maximum bond stress was reached. Due to the lack of a discrete mechanical interlocking (no ribs), it appeared that the major part of the force between concrete and bar was transmitted by adhesion and friction. As expected, the transmissible bond stress of the smooth CarboDur® bar was very low at only 1.31 N/mm^2 .

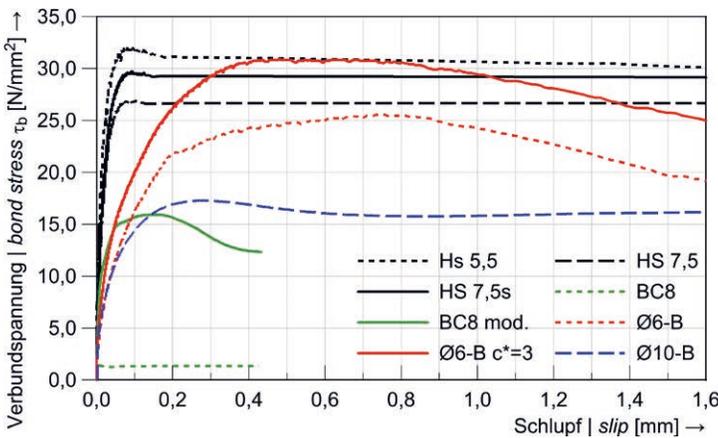


Bild 2: Exemplarische Verbundspannungs-Schlupf-Kurven je Stabart bei $l_b^* = 3$ und $c^* = 2$ (REBAR Ø6-B zusätzlich $l_b^* = 3$ und $c^* = 3$) (links); Rissbildung bei REBAR Ø6-B, $c^* = 2$ (rechts) | **Fig. 2:** Exemplary bond stress-slip curves for each bar type with $l_b^* = 3$ and $c^* = 2$ (REBAR Ø6-B also $l_b^* = 3$ and $c^* = 3$) (left); crack formation for REBAR Ø6-B, $c^* = 2$ (right)

Generell wiesen sämtliche Carbopree®-Stäbe sowie die glatten Stäbe CarboDur® BC8 einen sehr geringen Schlupf bis zum Erreichen der maximal übertragbaren Verbundspannung auf. Mangels einer diskreten mechanischen Verzahnung (keine Rippen) erfolgte offenbar ein Großteil der Kraftübertragung zwischen Beton und Stab mittels Adhäsion und Reibung. Die übertragbare Verbundspannung beim glatten CarboDur®-Stab war dabei mit $1,31 \text{ N/mm}^2$ erwartungsgemäß sehr gering. Bei den geriffelten Stäben CarboDur® BC8 mod. und den gerippten BFK-Stäben REBAR Ø6-B lag hingegen auch ein Traganteil aus mechanischer Verzahnung vor, was sowohl am größeren Schlupf als auch am deutlichen Abfall der Verbundspannung nach Erreichen des Maximalwertes erkennbar ist. Die Rippung der BFK-Stäbe REBAR Ø10-B schien hingegen nicht ausreichend ausgeprägt zu sein, um eine deutliche Tragkomponente aus mechanischer Verzahnung zu aktivieren. Dies zeigt die deutlich geringere mittlere Verbundspannung im Vergleich zu REBAR Ø6-B.

Trotz einzelner Rissbildung konnte stets ein Ausziehversagen nach Erreichen der maximal übertragbaren Verbundspannung beobachtet werden. Bei den Carbopree®-Stäben aus CFK und den BFK-Stäben wurde das Versagen durch eine Delamination der obersten Stabschicht hervorgerufen, die sich vom restlichen Stab löste und am UHPFRC haften blieb. Abgesehen vom glatten CFK-Stab CarboDur® BC8 wiesen alle getesteten Stäbe gute Verbundeigenschaften auf und sind potentiell als (Spann-)Bewehrung in UHPFRC geeignet, für weiterführende Details zu den Ausziehversuchen s. [3]–[5].

2.3 Spannkrafteinleitungsversuche

Zur Bestimmung der erforderlichen Übertragungslänge l_{pt} und der erforderlichen Mindestbetondeckung c_{min} zur rissfreien Einleitung der vollen Spannkraft in den UHPFRC wurden Spannkrafteinleitungsversuche durchgeführt. Im Vorfeld wurde eine Klemmverankerung entwickelt, die ein sicheres Vorspannen der querdrukempfindlichen CFK-Stäbe ermöglicht (Bild 3). Diese bestand aus zwei Aluminiumplatten

In contrast, the grooved CarboDur® BC8 mod. bars and the ribbed BFRP bars REBAR Ø6-B also showed a load-bearing contribution of mechanical interlocking, which can be seen both in the larger slip and the significant drop of the bond stress after reaching the maximum value. The ribs of the BFRP bars REBAR Ø10-B, however, did not seem to be sufficiently pronounced to activate a significant load-bearing component of mechanical interlocking, as the significantly lower mean bond stress compared to REBAR Ø6-B shows.

Despite isolated crack formation, a pull-out failure was always observed after reaching the maximum transmittable bond stress. In the case of the Carbopree® and the BFRP bars, failure was caused by delamination of the outermost bar layer, which peeled off from the rest of the bar and adhered to the UHPFRC. Apart from the smooth CFRP bar CarboDur® BC8, all tested bars showed good bond properties and are potentially suitable for the use as (prestressing) reinforcement in UHPFRC. For further details on the pull-out tests see [3]–[5].

2.3 Transfer length tests

To determine the required transfer length l_{pt} and the necessary minimum concrete cover c_{min} for a crack-free transmission of the full prestressing force into the UHPFRC, transfer length tests were carried out. In advance, a clamping anchorage was developed which allows safe prestressing of the lateral pressure-sensitive CFRP bars (Fig. 3). This anchorage consisted of two aluminium plates with a milled groove in the middle for the CFRP bar, which were pressed together by two rows of 5 bolts each at a defined tightening torque. In addition, two steel plates were used to realise a uniform distribution of the lateral pressure as well as two spring washers per bolt to ensure the required lateral pressure even if the bar deforms transversely. In short-term tensile tests with the bar Carbopree® HS 7.5, this clamping anchorage was able to transfer maximum tensile forces in the range of 91 to 98% of the calculated tensile force $F_{t,cal}$ acc. to Table 3 to the bar at a slip between ~ 0.15 and 0.3 mm .

mit mittig eingefräster Nut zur Aufnahme des CFK-Stabes, die durch zwei Schraubenreihen à 5 Stück mit definiertem Anziehmoment zusammengespreßt wurden. Zudem wurden zwei Stahlplatten zur gleichmäßigeren Verteilung des Querdrucks eingesetzt sowie zwei Spannscheiben pro Schraube, um die erforderliche Querspreßung auch bei einer Querverformung des Stabes sicherzustellen. In Kurzzeitzugversuchen mit dem Stab Carbopree® HS 7,5 konnten mit diesem System maximale Zugkräfte im Bereich von 91 bis 98 % der rechnerischen Versagenslast $F_{t,cal}$ nach Tabelle 3 bei einem Schlupf zwischen ~0,15 und 0,3 mm auf den Stab übertragen werden.

Mit der entwickelten Klemmverankerung wurde im Spannbett eine Vorspannung σ_p zwischen 1.250 und 1.470 N/mm² auf den jeweils mittig im 1.500 mm langen Versuchskörper angeordneten CFK-Stab aufgebracht, die nach Erhärten des UHPFRC im Betonalter von ~3 Tagen in 6 Stufen langsam abgelassen wurde. Bei jeder Laststufe wurden die Betonstauchungen entlang der Probe mit einem Setzdehnungsmesser ermittelt. Zusätzlich wurde an beiden Probekörperenden kontinuierlich der Endschlupf Δs des CFK-Stabes mit induktiven Wegaufnehmern gemessen.

Zuerst wurde der CFK-Stab Carbopree® HS 7,5 mit einer bezogenen Betondeckung c^* von 3 bzw. 4 getestet. Trotz ausbleibender sichtbarer Rissbildung zeigten sich bereits bei abgelassenen Vorspannkräften zwischen 30 bis 60 % (je nach Versuch) deutliche Schlupfanstiege und nur noch geringe Betonstauchungszunahmen. Die aufgeschnittenen Versuchskörper ließen analog zu den Ausziehversuchen eine Delamination der Stäbe erkennen (Bild 4). Die besandete oberste Schicht löste sich vom Stab und blieb am UHPFRC haften. Vermutlich wurde der Verbund innerhalb des CFK-Stabes bereits durch das Vorspannen vorgeschwächt, weshalb die Delamination bereits bei relativ geringen Ablasstufen einsetzte.

Aufgrund der negativen Ergebnisse wurden weitere Tests mit den Stabtypen CarboDur® BC8 und BC8 mod. durchgeführt. Der Versuch mit

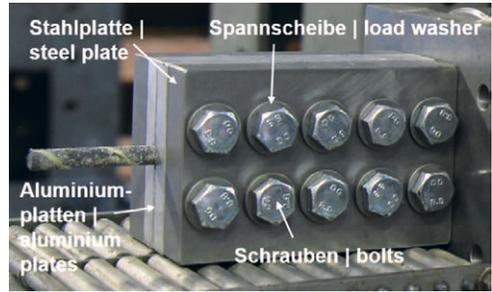


Bild 3: Klemmverankerung mit eingebautem Stab Carbopree® HS 7,5 | Fig. 3: Clamping anchorage with Carbopree® HS 7,5

By using the developed clamping anchorage, a stress σ_p between 1,250 and 1,470 N/mm² was applied in the prestressing bed to the CFRP bar, which was positioned centrally in the 1,500 mm long specimen. After hardening of the UHPFRC, the prestressing was slowly released in six steps at a concrete age of ~3 days. At each load level, the concrete strain along the specimen was measured using a mechanical extensometer. In addition, the slip Δs of the CFRP bar was continuously measured at both ends of the specimen using inductive displacement transducers.

First, the CFRP bar Carbopree® HS 7.5 was tested with a specific concrete cover c^* of 3 resp. 4. Despite the absence of visible crack formation, significant increases in slip and only slight increases of the concrete strain were already observed at released prestressing forces between 30 and 60% (depending on the test). Analogous to the pull-out tests, the cut open test specimens showed a delamination of the bars (Fig. 4). The sanded outermost layer peeled off from



Bild 4: Aufgeschnittener Versuchskörper nach Spannkrafteinleitungsversuch | Fig. 4: Sliced specimen after transfer length test

dem glatten BC8-Stab diente dabei als Referenz für die selbst hergestellten, geriffelten Stäbe BC8 mod. Erwartungsgemäß kam es beim glatten Stab bereits ab der ersten Ablassstufe um 20 % der maximal aufgebracht Vorspannkraft zu einem Durchrutschen des Stabes. Beim ersten Versuch mit BC8 mod. konnte die Vorspannkraft hingegen bis zur dritten Ablassstufe um 60 % wie gewünscht in den UHPFRC übertragen werden. Anschließend versagte offenbar der Verbund in den Endbereichen und die Betonstauchungen erhöhten sich nur noch im mittleren Bereich der Probe. Als Ursache hierfür wurden in den Endbereichen des Versuchskörpers vermehrte Luftporen und Fehlstellen in der Kontaktzone zum CFK-Stab ausgemacht. Bei der Wiederholung des Versuchs mit gleichen Parametern riss der CFK-Stab bereits 24 h nach dem Vorspannen. Zusätzliche Zugversuche wiesen auf lokale Schädigungen des Stabes bei der Erzeugung des Gewindes (vgl. Abschnitt 2.1) hin. Deshalb wurde die Vorspannung auf 1.250 N/mm² gesenkt. Der anschließende Versuch lieferte gemischte Resultate. Während am linken Probekörperende ab etwa 60 % abgelassener Vorspannkraft keine weitere Kraftübertragung auf den Beton mehr möglich war, konnte im rechten Endbereich die volle Spannkraft in den UHPFRC eingeleitet werden. Hierbei lag der Endschlupf bei 1,2 mm und die Übertragungslänge wurde

the bar and adhered to the UHPFRC. Presumably, the bond within the CFRP bar was already weakened by the prestressing process, which is why delamination already set in at relatively low release levels.

Due to the negative results, further tests with the bar types CarboDur® BC8 and BC8 mod. were carried out. The test with the smooth BC8 bar served as a reference for the self-modified, grooved bars BC8 mod. As expected, the smooth bar already slipped through from the first release step at 20% of the maximum applied prestressing force. In the first test with BC8 mod., however, the prestressing force could be transferred to the UHPFRC up to the third release step at 60% as desired. Subsequently, the bond at the ends apparently failed and the concrete strains only continued to increase in the middle section of the specimen. This was caused by increased air voids and defects in the contact zone to the CFRP in the end areas of the specimen. When repeating the test with the same parameters, the CFRP bar already failed 24 hours after prestressing. Additional tensile tests indicated local damage to the bars during thread production (cf. section 2.1). Therefore, the prestressing was reduced to 1,250 N/mm². The subsequent test showed mixed results. While at the left end of the specimen no further force transmission

Effektiver Stabdurchmesser Effective bar diameter d_{eff}	Vorspannung Prestressing σ_p	Druckfestigkeit Compressive strength f_{cm}	E-Modul Young's modulus E_{cm}	Endschlupf Slip at end Δs 1)		Übertragungslänge Transfer length l_{pt}	
				l	r	l	r
[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[cm]	[cm]
Stab Bar Carbobree® HS 7,5; Beton Concrete M2Q							
7,5	1.470	117,5 104,1 104,1	42.772 37.653 37.653	5,3 3,7 4,4	5,2 2) 3,2 4,5	-	-
Stab Bar CarboDur® BC8; Beton Concrete M4Q							
8,0	1.300	91,3	36.729	1,8 2)	1,8 2)	-	-
Stab Bar CarboDur® BC8 mod.; Beton Concrete M4Q							
7,5	1.470 1.250 1.250	116,4 106,1 109,0	41.537 40.075 40.416	# 3,8 0,9	# 1,2 0,4	- - 30,4	- 30,4 20,3

1) Bezogene Betondeckung $c^* = 3$ bzw. 4 | Referred concrete cover $c^* = 3$ resp. 4; 2) Messung bis 80 % | Measuring up to 80%; #: Schlupfmessung ausgefallen | Slip measurement failed; l = links | left; r = rechts | right

Tabelle 5: Ergebnisse der Spannkrafteinleitungsversuche | Table 5: Results of the transfer length tests

nach [6] mit 30,4 cm bestimmt. Ein abschließender Test mit gleichen Parametern lieferte an beiden Enden zufriedenstellende Ergebnisse mit Übertragungslängen von 30,4 und 20,3 cm bei Endschlupfmaßen von 0,9 und 0,4 mm (Tabelle 5). Aufgrund der bereits angesprochenen lokalen Stabschädigungen, der unvermeidbar streuenden Oberflächenstruktur in Verbindung mit dem händischen, nicht vollständig reproduzierbaren und zeitaufwendigen Herstellprozess sowie der betragsmäßig relativ hohen Übertragungslängen sind die Stäbe BC8 mod. dennoch nur bedingt als Spannbewehrung für schlanke UHPFRC-Zugstäbe mit einer Bauteillänge von 2 bis 3 m geeignet.

Abschließend ist auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen festzuhalten, dass das Vorspannen schlanker UHPFRC-Bauteile mit CFK-Stäben bei geeigneter Oberflächenbeschaffenheit und innerer Stabstruktur grundsätzlich realisierbar ist. Die im Rahmen des Forschungsprojekts getesteten CFK-Stäbe sind jedoch für die vorgesehene Anwendung nur bedingt geeignet. Hier besteht daher noch weiterer FuE-Bedarf

3 Formoptimierte Druckstäbe

Der Fokus bei der Druckstabentwicklung lag auf der optimalen Formgebung von Stäben mit Kreisquerschnitt gemäß dem Prinzip *form follows force* und der Herstellung der filigranen formoptimierten Stäbe. Aufgrund seiner hohen Druckfestigkeit wurde UHPFRC als Werkstoff gewählt.

3.1 Formoptimierungsprozess

Mit steigender Schlankheit eines Druckgliedes gewinnt neben dem Spannungsversagen das Stabilitätsversagen zunehmend an Bedeutung. Das zentrale Ziel der Formoptimierung bestand daher in der Annäherung des Lastniveaus beider Versagensszenarien, um eine optimale Materialverteilung in Stablängsrichtung zu erzielen. Durch numerische, materiell lineare Berechnungen mit Hilfe der Software optiSLang

to the concrete was possible after approx. 60% of the prestressing force was released, the full prestressing force could be transferred to the UHPFRC at the right end. The final slip was 1.2 mm, and the transfer length was determined to be 30.4 cm according to [6]. A final test with the same parameters led to satisfactory results with transfer lengths of 30.4 and 20.3 cm at final slips of 0.9 resp. 0.4 mm (Table 5). Nevertheless, due to the local bar damages (cf. above) and the unavoidable scattering surface structure related to the manual, not completely reproducible and time-consuming manufacturing process as well as the relatively high transfer lengths, the bars BC8 mod. are only conditionally suitable as prestressing reinforcement for slender UHPFRC ties with lengths between 2 and 3 m.

In conclusion, based on the investigations carried out, it can be stated that prestressing of UHPFRC components with CFRP bars is generally feasible, if the bars have a suitable surface finish and internal bar texture. However, the CFRP bars tested within the scope of this research project are only conditionally suitable for the intended application. Hence, there is still a need for further R&D.

3 Shape-optimized struts

The focus regarding the strut development was on the optimal shaping of struts with a circular cross-section in accordance with the principle *form follows force* and the production of filigree shape-optimized struts. Due to its high compressive strength, UHPFRC was chosen as material.

3.1 Shape optimization

With increasing slenderness of a compression member, stability failure becomes increasingly important in addition to a failure due to exceeded stresses. Therefore, the main objective of the optimization process was to approach the load levels of these two failure criteria in order to achieve an optimized material distribution in longitudinal direction of the strut. By extensive numerical, physically linear calculations

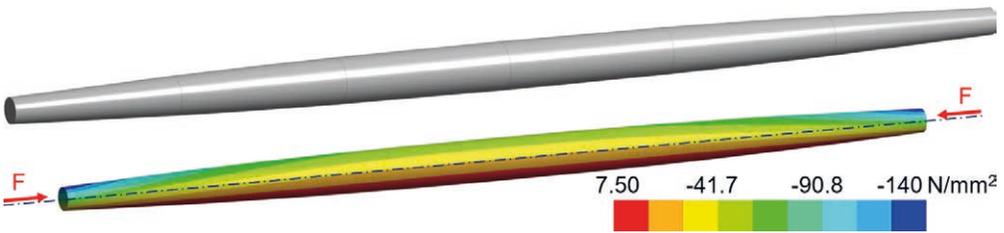


Bild 5: Stabform aus den Optimierungsberechnungen ($l = 2,0$ m, $\lambda_{eq} = 102$, $e/d = 0,1$) mit einer Traglast $F_{max} = 154,8$ kN und zugehöriger Normalspannungsverlauf | **Fig. 5:** Strut shape from optimization computations ($l = 2,0$ m; $\lambda_{eq} = 102$; $e/d = 0,1$) with an ultimate load $F_{max} = 154,8$ kN and normal stresses

in Verbindung mit dem FE-Programm ANSYS Workbench wurden optimierte Stabformen für unterschiedliche Lagerungsfälle, Stablängen $l = 2,0$ und $3,0$ m, äquivalente Schlankheiten $\lambda_{eq} = 90 \dots 145$ sowie auf den Stabenddurchmesser bezogene Lastexzentrizitäten $e/d = 0 \dots 0,15$ gefunden. Dabei ist λ_{eq} die Schlankheit eines volumengleichen Stabes mit konstantem Kreisquerschnitt. Im Fokus der Analysen stand der beidseitig gelenkig gelagerte Druckstab (Bild 5). Als Materialparameter wurden eine Druckfestigkeit f_c von 140 N/mm², ein E-Modul E_c von 44.000 N/mm² sowie eine zentrische Zugfestigkeit f_{ct} von $7,5$ N/mm² vorgegeben.

Die gefundenen Formen orientierten sich erwartungsgemäß an der Knickfigur bzw. an den Momentenverläufen nach Theorie II. Ordnung. Bei gleicher Stablänge l und gleichem λ_{eq} weichen die Formen für Exzentrizitätsverhältnisse e/d zwischen 0 und $0,1$ nur geringfügig voneinander ab und folgen, abgesehen von den Endbereichen, der von Blasius in [7] analytisch hergeleiteten Funktion für die ideale Form des zentrisch gedrückten, elastischen Stabes (Bild 6), mit der nach [7] eine maximale Traglaststeigerung um $1/3$ gegenüber einem volumengleichen Stab mit konstantem Durchmesser erzielt werden kann:

$$\xi = \frac{x}{l} = \frac{1}{\pi} \left(\arcsin\left(\frac{r(\xi)}{r_0}\right) - \frac{r(\xi)}{r_0} \sqrt{1 - \left(\frac{r(\xi)}{r_0}\right)^2} \right)$$

Mit: $r(\xi)$ Radius an der Stelle $\xi = x/l$
 r_0 maximaler Radius

with: $r(\xi)$ radius at position $\xi = x/l$
 r_0 maximum radius

Unabhängig von l und λ_{eq} zeigen die optimierten Stäbe bei $e/d = 0 \dots 0,1$ eine Ausnutzung der

using the software optiSLang in combination with the FEA software ANSYS Workbench, optimized strut shapes for varying support conditions, strut lengths $l = 2.0$ and 3.0 m, equivalent slendernesses $\lambda_{eq} = 90 \dots 145$ as well as load eccentricities related to the strut end diameters $e/d = 0 \dots 0.15$ were found. λ_{eq} is defined as the slenderness of a strut with equal volume but constant circular cross-section. The focus of the analyses was on the simply supported strut (Fig. 5). As material parameters, a uniaxial compressive strength f_c of 140 N/mm², a Young’s modulus E_c of $44,000$ N/mm² and a uniaxial tensile strength f_{ct} of 7.5 N/mm² were set.

As expected, the calculated shapes adapt to the buckling shape resp. the bending moment diagram according to theory of 2nd order. For the same strut length and the same λ_{eq} , the shapes for eccentricity ratios e/d between 0.0 and 0.1 vary only slightly and correspond, apart from the end areas, to the analytically derived function by Blasius [7] for the ideal shape of a centrally compressed, linear-elastic strut (Fig. 6), with which a maximum increase in ultimate load capacity of $1/3$, compared to a strut of equal volume and with constant diameter, can be achieved:

Independent of l and λ_{eq} , the optimized struts show a utilisation of the compressive strength f_c

Druckfestigkeit f_c an den Stabenden sowie mit steigendem e/d -Verhältnis und damit anwachsendem planmäßigem Moment nach Theorie I. Ordnung ($M = N \cdot e$) auch der Zugfestigkeit f_{ct} über einen zunehmend längeren Stabbereich ausgehend von der Stabmitte (vgl. Bild 5 unten). Für $e/d = 0,15$ ist das planmäßige Moment schließlich so groß, dass f_{ct} über die komplette Stablänge erreicht wird und keine optimale Form mehr gefunden werden kann, bei der gleichzeitig Druck- und Zugfestigkeit ausgenutzt werden. Die gefundene Form weicht daher deutlich von den übrigen Formen ab und nähert sich dem Verlauf des äquivalenten zylindrischen Stabes mit konstantem Querschnitt an (Bild 6). Für detailliertere Informationen zum Optimierungsprozess und zu den erhaltenen Formen wird auf [3]–[5] und [8] verwiesen.

3.2 Kurzzeitdruckversuche mit CFK-Umschnürungsbewehrung

Mit Blick auf die hoch belasteten reduzierten Querschnittsbereiche der formoptimierten Druckstäbe an den Stabenden (vgl. Bild 5) wurden statische Kurzzeitdruckversuche zur Untersuchung der Traglaststeigerung durch eine einbetonierte CFK-Umschnürungsbewehrung durchgeführt. Zur Festlegung einer sinnvollen Bewehrungsgeometrie wurden in einer ersten Versuchsserie TS1 insgesamt 28 zylindrische Probekörper mit einbetonierten CFK-Bewehrungskörben geprüft. In Tabelle 6 sind die Versuchsparameter und Ergebnisse zusammengefasst. Die Versuche zeigten, dass die Traglast in Abhängigkeit der Umschnürungsdicke t_s be-

at the strut ends for $e/d = 0 \dots 0.1$ as well as, with increasing e/d -ratio and thus increasing moment of 1st order ($M = N \cdot e$), of the tensile strength f_{ct} over an increasingly longer strut section starting from the centre of the strut (cf. Fig. 5 below). Finally, for $e/d = 0.15$, the bending moment of 1st order is so high that f_{ct} is reached over the entire strut length and an optimal shape can no longer be found, in which compressive and tensile strength are utilised simultaneously. Therefore, the calculated shape for $e/d = 0.15$ deviates significantly from the other shapes and approaches the shape of the equivalent cylindrical strut with constant cross-section (Fig. 6). For more detailed information on the optimization process and the shapes obtained, please refer to [3]–[5] and [8].

3.2 Short-term compressive tests with CFRP confinement reinforcement

With regard to the highly stressed areas of the shape-optimized struts with reduced cross-sections at the strut ends (cf. Fig. 5), short-term compressive tests were carried out to investigate the increase in ultimate load capacity due to an embedded CFRP confinement reinforcement. In order to determine a suitable reinforcement geometry, 28 cylindrical specimens with embedded CFRP reinforcement cages were tested in a first test series TS1. The test parameters and results are summarized in Table 6. The test showed that the ultimate load can be increased considerably – between 35 and 93% on average – depending on the confinement thickness t_s and that the brittle failure by rupture of the CFRP confinement is indicated by large axial deformations as

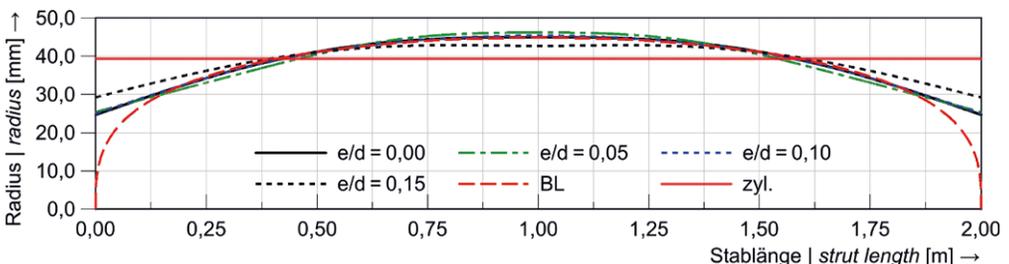


Bild 6: Optimierte Stabformen für $l = 2,0$ m; $\lambda_{eq} = 102$ und $e/d = 0 \dots 0,15$ im Vergleich zur volumengleichen zylindrischen Form mit konstantem Querschnitt (zyl) sowie zur analytischen Funktion nach Blasius (BL) | **Fig. 6:** Optimized strut shapes for $l = 2.0$ m; $\lambda_{eq} = 102$ and $e/d = 0 \dots 0.15$ in comparison to the shape with equivalent volume and constant diameter (zyl) and the analytical function by Blasius (BL)

Serie Series	Proben-geometrie Sample geometry d/h [mm]	Proben-anzahl Specimen number [-]	Umschnürungsbewehrung Confinement reinforcement			Mittlere Beton-festigkeit Mean concrete strength f_{cm} [N/mm ²]	Tragfähigkeit Carrying capacity		
			Innendurch-messer Inner diameter d_{is} [mm]	Dicke Thick-ness t_s [mm]	Durch-messer Diameter d_s [mm]		Getestet Tested $F_{max,m}$ ¹⁾ [kN]	Betonkern Concrete $F_{cal,s}$ ²⁾ [kN]	Steigerungs-faktor In-crease factor $F_{max,m}/F_{cal,s}$ [-]
TS1	100/295	16	81	3,0	84	144,0	1.132	798	1,42
				4,0	85	144,0	1.197	817	1,47
				5,0	86	151,0	1.600	877	1,82
				6,0	87	151,0	1.734	898	1,93
	127/375	12	106	4,0	110	144,0	1.841	1.369	1,34
				5,0	111	151,0	2.315	1.461	1,58
127/375	4	106	106	6,0	112	144,0	2.323	1.419	1,64
				6,0	112	172,7	2.930	1.701	1,72
TS2	100/295	4	81	5,0	86	178,2	1.854	1.035	1,79
	127/375	4	106	6,0	112	172,7	2.930	1.701	1,72

¹⁾ Mittelwert aus 4 bzw. 5 Einzelversuchen | Mean value of 4 resp. 5 pull-out tests; ²⁾ rechnerische Traglast des umschnürten Betonkerns | calculated load capacity of the confined concrete core: $F_{cal,s} = f_{cm} \cdot (d_{is} + t_s)^2 \cdot \pi / 4$

Tabelle 6: Ergebnisse der Kurzzeitdruckversuche mit CFK-Umschnürungsbewehrung, Beton M2Q | **Table 6:** Results of short-term compressive tests with CFRP confinement reinforcement, concrete M2Q

trächtlich – zwischen 35 und 93 % im Mittel – gesteigert werden kann und dass sich das spröde Versagen durch Reißen der CFK-Umschnürung durch große axiale Verformungen sowie Risse in der Betondeckung ankündigt. Für eine ausführlichere Darstellung wird auf [3]–[5] verwiesen.

Die zweite Versuchsserie TS2 mit insgesamt 8 Tests diente v. a. zur Bestimmung der Belastung für die Kriechversuche (vgl. Abschnitt 3.3). Basierend auf TS1 wurde für die einbetonierten CFK-Körbe die Umschnürungsdicke t_s von 5,0 bzw. 6,0 mm festgelegt. Verglichen mit den zugehörigen Tests aus TS1 ergaben sich um 16 bzw. 26 % höhere Traglasten, was auf einen höheren Fasergehalt beim Herstellprozess und somit verbesserte CFK-Festigkeiten zurückzuführen ist. Der Steigerungsfaktor fällt jedoch aufgrund der deutlich höheren Betonfestigkeit um 2 % geringer bzw. um nur 5 % höher aus.

3.3 Kriech- und Schwindversuche mit und ohne CFK-Bewehrung

Zusätzlich wurden Kriech- und begleitende Schwindversuche zur Untersuchung des Langzeittragverhaltens von umschnürten Probekörpern sowie unbewehrten Referenzproben aus UHPFRC M2Q durchgeführt.

well as cracks in the concrete cover. For a more detailed description, please refer to [3]–[5].

The second test series TS2 with a total of 8 tests was mainly used to determine the loading for the creep tests (cf. section 3.3). Based on TS1, a confinement thickness t_s of 5.0 resp. 6.0 mm was chosen for the embedded CFRP cages. Compared to the corresponding tests from TS1, the ultimate loads were 16 resp. 26% higher, which is attributed to a higher fibre content in the manufacturing process and thus improved CFRP strengths. However, the increase factor is 2% lower resp. only 5% higher due to the significantly higher concrete strength.

3.3 Creep and shrinkage tests with and without CFRP reinforcement

In addition, creep and accompanying shrinkage tests were carried out to investigate the long-term load-bearing behaviour of confined and unreinforced reference specimens made of UHPFRC M2Q.

In order to cover influences of the specimen geometry, 20 cylindrical specimen with dimensions $d/h = 100/295$ [mm] as well as 14 with $d/h = 127/375$ [mm] were tested analogously to section 3.2. The embedded CFRP reinforce-

Um Einflüsse der Probekörpergeometrie zu erfassen, wurden analog zu Abschnitt 3.2 20 zylindrische Probekörper mit den Abmessungen $d/h = 100/295$ [mm] und 14 mit $d/h = 127/375$ [mm] geprüft. Die einbetonierten CFK-Bewehrungskörbe entsprachen denen der Versuchsserie TS2. Die Last wurde bei den unbewehrten Referenzkörpern (Typ K) vollflächig und bei den bewehrten Körpern (Typen A bzw. B) über Lasteinleitungsstempel ($\varnothing = 75$ bzw. 100 mm) lediglich auf den umschnürten Betonkern aufgebracht. Das Probenalter betrug 29...34 Tage. Der Belastungsgrad σ^* wurde zwischen 0,4 und 0,9 bezogen auf die rechnerische Traglast $F_{cal} (= f_{cm} \cdot d^2 \cdot \pi / 4)$ bei Typ K bzw. $F_{cal,s}$ (Tabelle 6) bei Typ A und B variiert. Die Messung der Schwindverformungen begann 26 h nach der Betonage. Die Ergebnisse der Schwind- und Kriechversuche sind in Bild 7 zu sehen. Den mittleren Schwindkurven liegen drei Einzelversuche, den Kriechkurven zwei oder drei Tests zugrunde.

In Übereinstimmung mit [9] zeigte sich weder bei den Schwindverformungen noch beim Kriechmaß – ähnliches Belastungsniveau σ^* vorausgesetzt – ein wesentlicher Einfluss der Probekörpergeometrie. Während die einbetonierten CFK-Körbe, die sowohl bei Typ A als auch B etwa 11 % des Gesamtvolumens ausmachten, bei den Schwindversuchen zu etwa

ment cages corresponded to those of test series TS2. In the case of the unreinforced reference specimen (type K) the load was applied to the full surface of the unreinforced reference specimen (type K) and in the case of the reinforced specimen (type A and B) only to the confined concrete core via load application plates ($\varnothing = 75$ resp. 100 mm). The sample age was 29...34 days. The load level σ^* was varied between 0.4 and 0.9 in relation to the calculated ultimate load $F_{cal} (= f_{cm} \cdot d^2 \cdot \pi / 4)$ for type K resp. $F_{cal,s}$ (Table 6) for types A and B. The measurement of shrinkage deformations started 26 h after concreting. The results of the shrinkage and creep tests are shown in Fig. 7. The mean shrinkage curves are based on three individual tests, the creep curves on two or three tests.

In accordance with [9], neither the shrinkage deformations nor the specific creep – assuming similar load levels σ^* – showed a significant influence of the specimen geometry. While the embedded CFRP cages, which made up about 11% of the total volume for both type A and B, resulted in about 35% lower shrinkage deformations, no significant differences in specific creep between reinforced and unreinforced specimen could be observed for $\sigma^* \leq 0.55$. However, at high load levels σ^* the supporting effect of the CFRP reinforcement seems to have more impact

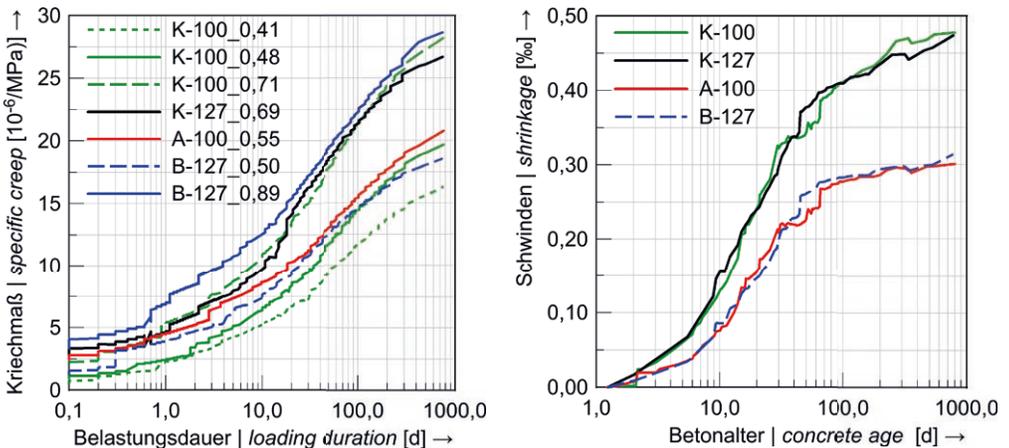


Bild 7: Kriechmaß bei verschiedenen Belastungsgraden σ^* (links) sowie Schwindverformungen bewehrter (A / B) und unbewehrter (K) Probekörper mit $d = 100$ bzw. 127 mm (rechts) | **Fig. 7:** Specific creep for different load levels σ^* (left) and shrinkage of reinforced (A / B) and unreinforced (K) specimens with $d = 100$ resp. 127 mm (right)

35 % geringeren Verformungen führten, konnten beim Kriechmaß für $\sigma^* \leq 0,55$ keine signifikanten Unterschiede zwischen bewehrten und unbewehrten Körpern beobachtet werden. Bei hohen Belastungsgraden σ^* scheint sich die Stützwirkung der CFK-Bewehrung hingegen deutlicher bemerkbar zu machen und tendenziell zu geringeren Kriechmaßen zu führen, was anhand der nur etwas oberhalb von K-127_0,69 und K-100_0,71 verlaufenden Kurve B-127_0,89 gemutmaßt werden kann. Zur Überprüfung dieser Aussage wären jedoch weitere Versuche erforderlich, da insbesondere die Ergebnisse der bewehrten Körper bei hohem σ^* starken Streuungen unterlagen.

3.4 Bauteilversuche an formoptimierten Druckstäben

Zur Verifizierung der Traglaststeigerung durch die optimierte Formgebung wurden Bauteilversuche an 48 formoptimierten (opt.) Druckstäben sowie 27 Referenzversuche an kreiszylindrischen (zyl.) Stäben unter Variation von Stablänge, Lastexzentrizität und Bewehrung durchgeführt (Tabelle 7). Die zylindrischen Stäbe wiesen das gleiche Volumen V wie die zugehörigen optimierten Stäbe auf. Die jeweiligen Durchmesser in Stabmitte d_M und am Stabende d_E sind in Tabelle 7 aufgeführt. Zudem ist die Anzahl N der Versuche je Lastexzentrizität angegeben.

Als Beton wurde der UHPFRC M4Q nach Tab. 1 verwendet. Er wurde mit einer Mörtelpumpe

and tends to result in lower creep, which can be assumed based on curve B-127_0,89 running only slightly above K-127_0,69 and K-100_0,71. However, further experiments would be necessary to verify this assumption, as especially the results of the reinforced specimen were subject to strong scatter at high σ^* .

3.4 Component tests on shape-optimized struts

To verify the increase in ultimate load capacity due to the optimized design, component tests on 48 shape-optimized (opt.) struts and 27 reference tests on cylindrical struts (cyl.) under variation of strut length, load eccentricity and reinforcement were carried out (Table 7). The cylindrical struts had a constant diameter and the same volume V as the corresponding optimized struts. The diameters in the middle d_M and at the end d_E of the struts are listed in Table 7. Furthermore, the number N of tests per load eccentricity is given.

As concrete, the UHPFRC M4Q according to Table 1 was used. It was pumped into the upright standing CNC-milled formwork from the bottom with a mortar pump and compacted using external vibrators. While most struts were produced without any conventional reinforcement, 15 optimized and 9 cylindrical struts with a length of 2.0 m were produced with embedded reinforcement cages made of CFRP rings and six BFRP bars (REBAR Ø6-B) each (Fig. 8).

Länge Length	Volumen Volume V	Stäbe Struts				Lastexzentrizität Load eccentricity e	Bewehrung Reinforcement	Anzahl Versuche Number of tests N
		Form Shape	Schlankheit Slenderness λ	Durchmesser Diameter	Diameter			
[m]	[-]	[-]	[-]	Stabenden Strut ends d_E	Stabmitte Middle d_M	[mm]	[-]	[-]
2,0	V_1	zyl.	102	79	79	0,0 5,0 7,5	-	3 5 4
							+	3 3 3
		opt.	-	50	90		-	7 11 9
							+	5 5 5
3,0	V_2	zyl.	102	118	118	0 7,55	-	3 3
							opt.	-

Tabelle 7: Versuchsprogramm der Bauteilversuche an Druckstäben, Beton M4Q | Table 7: Test scheme of component tests on struts, concrete M4Q

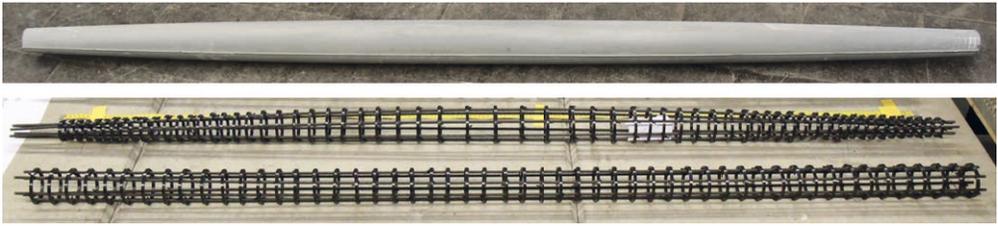


Bild 8: Optimierter, 2 m langer Druckstab und Bewehrungskörbe aus CFK-Ringen und BFK-Stäben | **Fig. 8:** Optimized 2 m long strut and reinforcement of CFRP rings and BFRP rods

von unten in die stehende CNC-gefräste Schalung eingepumpt und mittels Außenrüttlern verdichtet. Während die meisten Stäbe ohne diskrete Bewehrung hergestellt wurden, wurden bei 15 optimierten und 9 zylindrischen Stäben mit 2,0 m Länge Bewehrungskörbe aus CFK-Ringen und je 6 BFK-Stäben (REBAR Ø6-B) einbetoniert (Bild 8).

Die Stäbe wurden i. d. R. im Alter von 11 bis 12 Tagen geprüft. Die mittlere Druckfestigkeit betrug 145,4 N/mm², der E-Modul 43.559 N/mm² und die zentrische Zugfestigkeit 8,39 N/mm². Bei den weggesteuerten Versuchen wurden beide Stabenden jeweils mit Pendelrollenla-

Usually, the struts were tested at an age of 11 to 12 days. The mean compressive strength was 145.4 N/mm², the mean Young's modulus 43,559 N/mm² and the mean uniaxial tensile strength 8.39 N/mm². In the displacement controlled tests both strut ends were supported by spherical roller bearings. The experimental setup as well as some exemplary test results (force F and corresponding deflection in the middle of the strut w_M) are shown in Fig. 9.

Both the load-bearing behaviour of the cylindrical as well as the optimized struts were characterized almost without exception by a failure due to a loss of stability without any signs of a

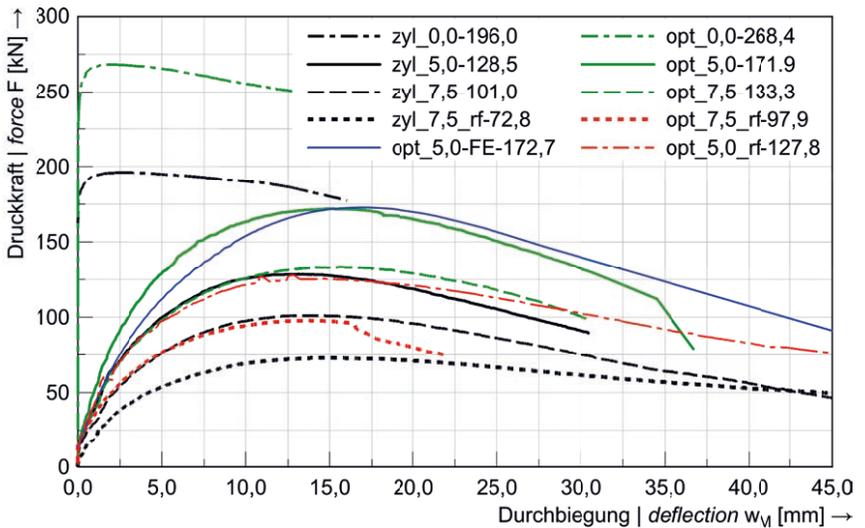


Bild 9: Versuchsaufbau und $F-w_M$ -Kurven aus Bauteilversuchen an bewehrten (rf) und unbewehrten optimierten (opt) Druckstäben (hier: $l = 2,0$ m; Exzentrizitäten $e = 0,0 / 5,0 / 7,5$ mm), Referenztests an volumengleichen zylindrischen (zyl) Druckstäben sowie FE-Berechnung (FE) | **Fig. 9:** Experimental setup and $F-w_M$ curves of component tests with reinforced (rf) and unreinforced optimized (opt) struts (here: $l = 2.0$ m; eccentricity $e = 0.0 / 5.0 / 7.5$ mm), reference tests with cylindrical (zyl) struts (equal volume) and FE analysis (FE)

gern gelenkig gelagert. Der Versuchsaufbau ist in Bild 9 links dargestellt. Einige exemplarische Versuchsergebnisse (Belastung F und zugehörige Durchbiegung in Stabmitte w_M) werden in Bild 9 gezeigt.

Sowohl das Tragverhalten der zylindrischen als auch der optimierten Stäbe war nahezu ausnahmslos durch ein Stabilitätsversagen ohne Anzeichen eines Materialversagens bis zum Erreichen der Maximallast F_{\max} gekennzeichnet und wird somit hauptsächlich von der Bauteilsteifigkeit $E \cdot I$ beeinflusst. Unabhängig von der Exzentrizität weisen die optimierten, unbewehrten Druckstäbe in Bild 9 eine Traglaststeigerung zwischen 32 und 37 % gegenüber den volumengleichen zylindrischen Referenzstäben auf. Die von Blasius analytisch hergeleitete, maximale mögliche Steigerung von 33,3 % (vgl. Abschnitt 3.1) konnte folglich in den Versuchen bestätigt werden. Auch bei den in Bild 9 dargestellten bewehrten Stäben (rf) mit $e = 7,5$ mm ergab sich eine Traglastzunahme von 34 % durch die Formoptimierung. Generell unterlagen die Traglasten der bewehrten Druckstäbe jedoch deutlich stärkeren Streuungen als die der unbewehrten Stäbe, wodurch es bei anderen Prüferien teilweise zu erheblich größeren, aber auch zu geringeren Steigerungen kam. Grundsätzlich wiesen die bewehrten Stäbe stets ein weiches Tragverhalten und deutlich geringere Traglasten, aber i. d. R. auch ein duktileres Nachbruchverhalten als die korrespondierenden unbewehrten Stäbe auf. Die geringere Bauteilsteifigkeit ist voraussichtlich auf zahlreiche, äußerlich sichtbare Schwindrisse zurückzuführen, die die nur etwa 3,5 mm dicke Betondeckung im Bereich der CFK-Ringe durchzogen. Auch bei den Stäben mit 3,0 m Länge konnten deutliche Traglaststeigerungen durch die optimierte Formgebung erzielt werden. Allerdings lagen diese mit im Mittel 28 % bei den zentrischen und 20 % bei den exzentrischen Versuchen unterhalb der Werte der 2,0 m langen Stäbe. Gründe waren v. a. Herstellungsschwierigkeiten (z. B. Entlüftung) sowie der kompliziertere Einbau der längeren Stäbe in den Versuchsstand. Während die 2-m-Stäbe problemlos von Hand in die Maschine eingebaut

material failure until the ultimate load F_{\max} was reached. Thus, it is mainly influenced by the bending stiffness $E \cdot I$ of the struts. Irrespective of the eccentricity, the optimized, unreinforced struts in Fig. 9 show an increase in ultimate load capacity between 32 and 37% compared to the cylindrical reference struts of equal volume. Thus, the maximum possible increase of 33.3% derived analytically by Blasius (cf. section 3.1) could be confirmed in the tests. The reinforced bars (rf) with $e = 7.5$ mm shown in Fig. 9 also showed an increase in ultimate load capacity of 34% due to the shape optimization. However, in general, the ultimate loads of the reinforced struts were subject to significantly greater scatter compared to the unreinforced struts, so in other test series considerably higher, but also smaller increases were obtained. Generally, the reinforced struts always showed a softer load-bearing behaviour with significantly lower ultimate loads, but at the same time also a more ductile post-peak behaviour than the corresponding unreinforced struts. The lower bending stiffness most likely resulted from numerous, visible shrinkage cracks in the only 3.5 mm thin concrete cover near the CFRP rings. The struts with a length of 3.0 m also showed significant increases in ultimate load capacity due to the optimized design. However, the mean increase of 28% for the tests with centric and 20% for the tests with eccentric loading were below the values of the 2.0 m long struts. The main reasons were manufacturing difficulties (e.g. venting) and the more complicated installation of the longer struts in the test rig. While the 2 m long struts could easily be installed in the machine by hand and precisely aligned, the 3 m long samples were installed using a forklift truck, which made exact alignment significantly more difficult, cf. [5].

3.5 Numerical analyses

To investigate the load-bearing behaviour of shape-optimized struts with further equivalent slendernesses λ_{eq} , extensive physically nonlinear FE-calculations using the software ANSYS Classic were carried out. Here, the symmetry of the struts was used and only half a strut with

und präzise ausgerichtet werden konnten, erfolgte der Einbau bei den 3-m-Stäben mit Hilfe eines Gabelstaplers, was eine exakte Ausrichtung deutlich erschwerte, vgl. [5].

3.5 Numerische Untersuchungen

Zur Untersuchung des Tragverhaltens von form-optimierten Stäben bei weiteren äquivalenten Schlankheiten λ_{eq} wurden umfangreiche materiell nichtlineare FE-Berechnungen mit der Software ANSYS Classic durchgeführt. Hierbei wurde die Symmetrie der Druckstäbe genutzt und nur ein halber Stab mit $l/2$ modelliert. Für die Abbildung des nichtlinearen UHPFRC-Verhaltens im Zug- und Druckbereich wurde das Materialmodell Law14 aus der Materialbibliothek multiPlas verwendet, das zuvor an Kleinversuchen kalibriert und validiert worden war. Zur Verifizierung des FE-Modells wurden die unbewehrten Bauteilversuche mit 2,0 m Länge nachgerechnet. Dabei zeigte sich grundsätzlich eine gute Übereinstimmung der FE-Berechnungen mit den Versuchskurven (blaue Linie in Bild 9). Die Abweichungen der Traglast lagen sowohl für die optimierten als auch für die zylindrischen Stäbe i. d. R. zwischen 2,0 und 6,0 %. Bei den Durchbiegungen in Stabmitte wurden etwas größere Abweichungen zwischen 8 und 20 % festgestellt.

Im Anschluss wurden numerische Analysen an unbewehrten, optimierten Stäben für unterschiedliche Stablängen $l = 2,0$ und $3,0$ m, äquivalente Schlankheiten $\lambda_{eq} = 90 \dots 145$ und bezogene Lastexzentrizitäten $e/d_e = 0 \dots 0,1$ durchgeführt. Unabhängig von λ_{eq} , Stablänge und Exzentrizität ergaben sich hierbei Traglaststeigerungen zwischen 29 und 33 % gegenüber den zylindrischen Referenzstäben, wobei die Traglast stets durch ein Stabilitätsversagen bestimmt wurde. Die FE-Berechnungen bestätigen somit die Ergebnisse der zugehörigen Bauteilversuche und zeigen, dass die verwendete Formfindungsmethode auch für andere Schlankheiten und Stablängen zu optimierten Druckstäben führt, die sich gegenüber volumengleichen zylindrischen Stäben durch eine Traglaststeigerung im Bereich der analytisch maximal möglichen

$l/2$ was modelled. The nonlinear behaviour of the UHPFRC was simulated using the material model Law14 from the material library multiPlas, which was previously calibrated and validated by small-scale tests. To verify the FE model, post-test computations of the unreinforced component tests with a length of 2.0 m were done. Generally, the FE-computations showed a good agreement with the test curves (blue line in Fig. 9). The deviations of the ultimate load for both the optimized and the cylindrical struts were usually between 2.0 and 6.0%. Slightly larger deviations between 8 and 20% were found for the deflections in the middle of the struts.

Subsequently, numerical analyses on unreinforced, optimized struts for different strut lengths $l = 2.0$ and 3.0 m, equivalent slendernesses $\lambda_{eq} = 90 \dots 145$ and related load eccentricities $e/d_e = 0 \dots 0.1$ were performed. Irrespective of λ_{eq} , strut length and eccentricity, increases in ultimate load capacity between 29 and 33% compared to the cylindrical reference struts were obtained, whereby the ultimate load was always determined by a stability failure. Thus, the FE computations confirm the results of the component tests and show that the form finding method used also leads to optimized struts, which are characterized by an increase in ultimate load capacity in the range of the analytically maximum possible increase of 33.3% compared to cylindrical struts of equal volume, for other slendernesses and strut lengths. However, further tests are necessary to verify the numerical results. A more detailed description and explanation of the FE calculations can be found in [5].

4 Connection joint element

The force-locked connection of the bar elements should be realised in a spatially confined, e.g. with CFRP, connection joint element grouted with expansive high-performance mortar, so that a favourable multi-axial state of stress for an improved introduction and transfer of the tensile and compressive forces is created. For

Zunahme von 33,3 % auszeichnen. Zur Absicherung der numerischen Ergebnisse wären jedoch weitere Versuche erforderlich. Eine ausführlichere Beschreibung und Erläuterung zu den FE-Berechnungen findet sich in [5].

4 Knotenelement

Die kraftschlüssige Verbindung der Stabelemente sollte in einem räumlich bspw. mit CFK umschnürten und mit expansivem Hochleistungsmörtel vergossenen Knotenelement erfolgen, so dass ein zur Einleitung und Übertragung der Stabzug- und -druckkräfte günstiger mehraxialer Spannungszustand im Knoten erzeugt wird. Zur Beurteilung geeigneter Quellmörtel bzw. Quellzementzusätze für diese Anwendung wurden umschnürte Ausziehversuche durchgeführt. Hierbei wurde ein Stabstahl ($\varnothing = 10 \text{ mm}$) mit einer Verbundlänge von 50 mm mittig in ein rundes, luftdicht abgeschlossenes PVC-Rohr eingebracht, in das anschließend das jeweilige Füllmaterial durch ein Ventil eingepresst wurde. Die Entlüftung erfolgte durch ein zweites Ventil, das nach vollständiger Befüllung des Rohrs zum Nachverpressen mit 5 bar geschlossen wurde. Die getesteten Materialkombinationen aus Basisprodukt und Quellzusatz inklusive Dosierungsangabe sind in Tabelle 8 aufgeführt und wurden basierend auf vorangegangenen Untersuchungen ausgewählt. Je Füllmaterial wurden drei Ausziehversuche durchgeführt und die mittlere Verbundfestigkeit τ_{bm} ermittelt. Begleitend wur-

the evaluation of suitable swelling mortars or expanding cement additives for this application, confined pull-out tests were carried out. For this purpose, a steel bar ($\varnothing = 10 \text{ mm}$) with a bond length of 50 mm was placed centrally in a round, airtight sealed PVC pipe, into which the respective grouting material was then pressed through a valve. Venting was ensured by a second valve, which was closed for post-grouting at 5 bar after the pipe was completely filled. The tested material combinations of basic product and swelling additive including dosage information are given in Table 8. They were selected based on previous investigations. For each grouting material, 3 pull-out tests were performed and the mean bond strength τ_{bm} was determined. In addition, the compressive strength f_{cm} on standard prisms ($b/h/l = 40/40/160 \text{ mm}$) as well as the swelling behaviour both with shrinkage drains from Schleibinger (SSR) and with the Graf-Kaufmann (GK) method on water-stored standard prisms according to DIN 52450 [10] were determined. The mean characteristic values are given in Table 8.

The results show that an additional dosage of the hydrogen gas-forming aluminium powder STANDART® SK I / NE to the grout rheoment®, which is already part of the base mixture, does not increase the bond strength. With the expanding cement additives CSA #20 and Namex XA, on the other hand, whose swelling mechanisms are based on the formation of ettringite resp. magnesium hydroxide, increases of

Basisprodukt Basic product	Quellzusatz Additive	Dosierung Dosage [M.-%]	Quellen Swelling		Mittlere Druckfestigkeit Mean compressive strength f_{cm} [N/mm ²]	Mittlere Verbundfestigkeit Mean bond strength τ_{bm} [N/mm ²]
			SSR ¹⁾ [%o]	GK ²⁾ [%o]		
rheoment®	-	-	0,02	0,21	84,0	14,0
	STANDART® SK I / NE	0,01	0,22	0,34	90,5	12,5
CEM I 52,5 R	-	-	-0,35	-0,21	73,6	9,1
	CSA #20	10,0	2,76	3,91	49,0	11,8
	Namex XA	14,0	1,03	1,46	47,2	11,1

¹⁾ Feuchtlagerung | Moisture storage; ²⁾ Wasserlagerung | Water storage

Tabelle 8: Ergebnisse der umschnürten Ausziehversuche mit Quellzementen/-mörteln | **Table 8:** Results of confined pull-out tests with expanding cement/mortar

den die Druckfestigkeiten f_{cm} an Normprismen ($b/h/l = 40/40/160$ mm) sowie das Quellverhalten mit Schwindrinnen der Firma Schleibinger (SSR) und mit dem Verfahren nach Graf-Kaufmann (GK) an wassergelagerten Normprismen gemäß DIN 52450 [10] bestimmt. Die mittleren Kennwerte sind in Tabelle 8 angegeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine zusätzliche Zugabe des wasserstoffgasbildenden Aluminimpulvers STANDART® SK I / NE zum Einpressmörtel rheoment®, dessen Grundmischung dieses bereits enthält, keine Steigerung der Verbundfestigkeit bewirkt. Mit den Quellzementzusätzen CSA #20 und Namex XA, deren Quellmechanismen auf Ettringit- bzw. Magnesiumhydroxidbildung beruhen, konnten hingegen Verbundfestigkeitssteigerungen von 30 bzw. 22 % trotz Druckfestigkeitseinbußen von 33 bzw. 36 % gegenüber dem reinen Zementstein erzielt werden. Zudem schien der Quellvorgang des Namex XA zum Zeitpunkt der Ausziehversuche noch nicht abgeschlossen zu sein, weshalb dieser Quellzementzusatz ggf. weiteres Steigerungspotential birgt.

Als Fazit der Tastversuche kann festgehalten werden, dass sich mit der Hilfe von Quellzementen offenbar mehraxiale Spannungszustände in vollflächig umschnürten Systemen erzeugen lassen, wodurch die Zugkrafteinleitung in einem Knotenelement ggf. verbessert werden kann.

5 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Untersuchungen zu schlanken, formoptimierten Druckstäben und vorgespannten Zugstäben aus UHPFRC und FVK-Bewehrung als Hauptkomponenten zukünftiger filigraner Betonstabtragwerke vorgenommen.

Anhand von Ausziehversuchen wurde gezeigt, dass FVK-Stäbe bei entsprechender Oberflächenbeschaffenheit sehr gute Verbundeigenschaften in UHPFRC aufweisen. Während die Eignung als schlaife Bewehrung somit grundsätzlich gegeben ist, offenbarten die durch-

the bond strength of 33 resp. 22% could be achieved, despite losses of the compressive strength of 33 resp. 36% compared to the pure cement stone. Moreover, the swelling process of Namex XA did not seem to be completed at the time of the pull-out tests, so this expanding cement additive may have further potential for increase.

As a conclusion of the fundamental tests, it can be stated that by using expanding cement multi-axial states of stress can be generated in fully confined systems, which can improve the introduction of tensile forces in a connection joint element.

5 Summary and conclusion

Within the scope of the research project, investigations on slender, shape-optimized struts and prestressed ties made of UHPFRC and FRP reinforcement as main components of future filigree concrete truss supporting structures were carried out.

Based on pull-out tests, it was shown that FRP bars with appropriate surface finish have very good bond properties. While the applicability as conventional reinforcement is thus basically given, the transfer length tests showed that the tested CFRP bars are only conditionally suitable for prestressing UHPFRC components. Tests on cylindrical UHPFRC specimen with embedded CFRP confinement reinforcement showed that the load-bearing capacity can be increased considerably depending on the confinement thickness. The creep behaviour, on the other hand, seems to be positively influenced by the CFRP confinement only at high load levels.

By means of numerical optimization computations, optimized shapes for simply supported struts with circular cross-section under centric and eccentric loading were found, which largely correspond to analytically derived shape functions by Blasius, and result, within the investigated slenderness and eccen-

geführten Spannkrafteinleitungsversuche, dass die getesteten CFK-Stäbe nur bedingt zum Vorspannen der UHPFRC-Bauteile geeignet sind. In Versuchen an UHPFRC-Zylindern mit einbetonierter CFK-Umschnürungsbewehrung wurde nachgewiesen, dass die Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Umschnürungsdicke beträchtlich gesteigert werden kann. Das Kriechverhalten scheint hingegen nur bei hohen Belastungsgraden positiv durch die CFK-Umschnürung beeinflusst zu werden.

Mittels numerischer Optimierungsberechnungen wurden optimierte Stabformen für beidseitig gelenkig gelagerte Druckstäbe mit Kreisquerschnitt unter zentrischer und exzentrischer Belastung gefunden, die weitestgehend mit analytisch hergeleiteten Formfunktionen von Blasius übereinstimmen und im untersuchten Schlankheits- und Exzentrizitätsbereich zu Traglaststeigerungen von etwa 30 % gegenüber volumengleichen zylindrischen Stäben mit konstantem Durchmesser führen. Das Traglaststeigerungspotenzial konnte anhand von Bauteilversuchen verifiziert werden.

Die Ergebnisse des Projekts zeigen deutlich das große Potential schlanker UHPFRC-Druckglieder mit optimierter Formgebung in Bezug auf Materialausnutzung und Ästhetik auf. Insbesondere bei Druckstäben mit größeren Längen und Stäben mit Bewehrung besteht jedoch, u. a. hinsichtlich des Herstellungsprozesses, noch Forschungsbedarf.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung (Projekt-Nr. 198111225 und 257612823) innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

tricity range, in increases of the ultimate load capacity of about 30% compared to cylindrical struts with equal volume and constant diameter. This potential of increase in ultimate load capacity could be verified by component tests.

The results of the project clearly show the great potential of slender UHPFRC struts with optimized shape in terms of material utilization and aesthetics. However, there is still a need for further research, especially for struts with greater lengths or with conventional reinforcement, i.a. with regard to the manufacturing process.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding (project numbers 198111225 and 257612823) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Schmidt, M.; Fehling, E.; Fröhlich, S.; Tiemicke, J. (Hrsg.): Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 22, Kassel: kassel university press, 2014
- [2] Lowke, D.; Stengel, T.; Schiessl, P.; Gehlen, C.: Control of Rheology, Strength and Fibre Bond of UHPC with Additions – Effect of Packing Density and Addition Type. In: Schmidt, M.; Fehling, E.; Glotzbach, C.; Fröhlich, S.; Piotrowski, S. (Hrsg.): Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 19, Kassel: kassel university press, 2012, S. 215–224
- [3] Henke, M.; Fischer, O.: Leicht Bauen mit Beton – Räumliche filigrane Stabtragwerke aus ultrahochfestem Beton und CFK-Bewehrung. Bauingenieur 88 (2013) 11, S. 453–462
- [4] Henke, M.; Fischer, O.: Formoptimierte filigrane Stäbe aus UHPC und korrosionsfreier CFK-Bewehrung für variable räumliche Stabtragwerke. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 48–59 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171370>
- [5] Henke, M.: Tragverhalten von formoptimierten Druckgliedern aus stahlfaserverstärktem ultrahochfesten Beton (UHPRFC). Diss., TU München, 2021
- [6] DIBt: Richtlinie für die Prüfung von Spannstählen auf ihre Eignung zur Verankerung durch sofortigen Verbund. Mitteilungen Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 1980
- [7] Blasius, H.: Träger kleinster Durchbiegung und Stäbe größter Knickfestigkeit bei gegebenem Materialverbrauch. Zeitschrift für Mathematik und Physik – Organ für angewandte Mathematik 62 (1914), S. 182–197
- [8] Schmidt, A.; Curbach, M.; Henke, M.; Fischer, O.: Formvariationen von Druckgliedern. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 792–803 – DOI: 10.1002/best.201300053
- [9] Anders, I.; Müller, H.: Materialgesetze zum Spannungs-Dehnungs-Zeitverhalten von ultrahochfestem Beton. In: [1], S. 393–421
- [10] DIN 52450:1985-08: Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe; Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern.

Bildnachweis | Picture credit

Alle Abbildungen | All illustrations: Michael Henke

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Formoptimierte filigrane Stäbe aus UHPC und korrosionsfreier CFK-Bewehrung für variable räumliche Stabtragwerke (Phase I)

Füge- und Entwurfsprinzipien für ebene und räumliche Stabtragssysteme aus formoptimierten filigranen Stäben aus UHPC und korrosionsfreier CFK-Bewehrung (Phase II)

Shape optimized filigree rods made of UHPC and non-corrosive CFRP-reinforcement for variable three-dimensional trusses (1st phase)

Joining and design principles for two- and three-dimensional filigree trusses constructed of form-optimized UHPC rod members and corrosion-free CFRP-reinforcement (2nd phase)

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer Ordinarius am Lehrstuhl für Massivbau Professor at the Chair of Concrete and Masonry Structures
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	FI 1720/2-1 und FI 1720/4-1 (Projektnummern Project numbers: 198111225 und 257612823)
Adresse Address:	TU München, Lehrstuhl für Massivbau, Theresienstraße 90, Gebäude N6, 80333 München
Kontakt Contact:	+49 89 289.23039 massivbau@tum.de www.mb.bgu.tum.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Förderphase I Funding period I: 01.08.2011–31.07.2014 Förderphase II (Auslauffinanzierung) bis Funding period II (phase-out funding) up to: 31.07.2015
Team Team:	Michael Henke Roland Niedermeier

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Henke, M.: Shape optimized, filigree rods out of UHPC and non-corrosive CFRP-reinforcement for variable spatial frameworks. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 317–321
- Fischer, O.; Lechner, Th.; Henke, M.: Schlanke Betontragstrukturen aus UHPC: Stabilitätsfragen, Formgebung und Verbindung der Bauteile. In: Krawtschuk, A.; Zimmermann, T.; Strauss, A. (Hrsg.): Werkstoffe und Konstruktionen – Innovative Ansätze 2013, Festschrift zu Ehren von o.Univ.-Prof. DI Dr.techn. Dr.phil. Dr.-Ing.e.h. Konrad Bergmeister, MSc., Berlin: Ernst & Sohn, 2013, S. 27–33
- Henke, M.; Fischer, O.: Leicht Bauen mit Beton – Räumliche filigrane Stabtragwerke aus ultrahochfestem Beton und CFK-Bewehrung. Bauingenieur 88 (2013) 11, S. 453–462
- Schmidt, A.; Curbach, M.; Henke, M.; Fischer, O.: Formvariationen von Druckgliedern. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 792–803 – DOI: 10.1002/best.201300053
- Henke, M.; Fischer, O.: DFG-Schwerpunktprogramm "Leicht Bauen mit Beton" – theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Verwendung neuartiger Materialien für stabförmige Tragglieder. In: Fischer, O. (Hrsg.): Tagungsband Münchener Massivbauseminar 2013, 22.11.2013 in München, München: Förderverein Massivbau der TU München e.V., 2013, S. 29–37
- Henke, M.; Fischer, O.: Formoptimierte filigrane Stäbe aus UHPC und korrosionsfreier CFK-Bewehrung für variable räumliche Stabtragwerke. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 48–59 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171370>

- Henke, M.; Fischer, O.: Shape optimized struts made of ultra-high performance concrete. In: Stang, H.; Braestrup, M. (Hrsg.): Concrete – Innovation and Design – Proc. of fib Symp. 2015, 18.–20.05.2015 in Kopenhagen (Dänemark), Lausanne: fib, 2015, Beitrag Nr. 342, S. 211–212 (extended abstract), Langfassung auf USB-Stick, 14 S.
- Henke, M.; Fischer, O.: Shape optimized struts made of UHPC. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-523963, publ. auf USB stick, 12 S.
- Henke, M.; Fischer, O.: Load-bearing behavior of shape-optimized struts made of UHPC. In: Beushausen, H. (Hrsg.): Performance-Based Approaches for Concrete Structures – Proc. of fib Symp. 2016, 21.–23.11.2016 in Kapstadt (Südafrika), Lausanne: fib, 2016, Beitrag Nr. 032, S. 165–166 (extended abstract), Langfassung auf CD, 10 S.
- Henke, M.; Gehrlein, S.; Fischer, O.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Stabilität schlanker hochbelasteter Stützen aus ultra-hochfestem Beton. In: Fischer, O. (Hrsg.): Tagungsband Münchener Massivbau-seminar 2016, 25.11.2016 in München, München: Förderverein Massivbau der TU München e.V., 2016, S. 39–49

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Henke, M.: Tragverhalten von formoptimierten Druckgliedern aus stahlfaserverstärktem ultrahochfesten Beton (UHPFRC). 2021

Bachelorarbeiten | Bachelor's Theses

- Probst, M.: Bisherige Untersuchungen zum Verbundverhalten von CFK-Stäben in UHPC. 2013
- Peschl, M.: Experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten von CFK-Stäben in ultrahochfestem Beton (UHPC). 2014
- Aigner, M.: Formfindung von Druckstäben mit dem Ritz-Verfahren. 2014
- Pirzer, T.: Experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten von CFK-Stäben in ultrahochfestem Beton (UHPC) bei variierender Betondeckung. 2014
- Rühling, F.: Entwicklung einer Verankerungsmöglichkeit zur Vorspannung von CFK-Stäben. 2014
- Vogl, S.: Untersuchungen zur Traglaststeigerung von UHPC-Zylindern durch einbetonierte Carbongelege. 2014
- Bender, K.: Verbundverhalten von vorgespannten CFK-Stäben in UHPC – Teil 2: Auswertung von Spannkrafteinleitungsversuchen. 2015
- Förstl, F.: Untersuchungen zum Kriechverhalten von ultrahochfestem Beton mit und ohne CFK-Umschnürung. 2015
- Schuster, S.: Berechnungen zum Tragverhalten ausmittig beanspruchter Stahlbetondruckglieder aus UHPC. 2015
- Walter, G.: Parameterstudie zur Formoptimierung schlanker Druckstäbe aus UHPC. 2015
- Mair, T.: Untersuchungen zur Faserorientierung in stahlfaserverstärktem ultrahochfestem Beton (UHPFRC). 2016
- Mayerle, L.: Verbundverhalten von vorgespannten CFK-Stäben in UHPC – Teil 3: Spannkrafteinleitungsversuche mit geriffelten CFK-Stäben. 2016
- Sundermann, C.: Bemessung von schlanken Druckgliedern aus UHPC – Vergleich verschiedener Bemessungsansätze. 2016
- Kriechbaumer, M.: Untersuchungen zum Tragverhalten von formoptimierten Druckstäben aus UHPC – Teil 5: Einfluss der Bewehrung bei zentrischer und exzentrischer Belastung. 2017

Masterarbeiten | Master's Theses

- Grözingler, S.: Numerische Untersuchungen zur Formoptimierung von schlanken Druckstäben aus ultrahochfestem Beton. 2012

- Eckerlein, D.: Formoptimierung schlanker Druckstäbe aus ultrahochfestem Beton unter Berücksichtigung geometrischer Nichtlinearitäten und Imperfektionen. 2013
- Gramaglia, A.: Untersuchungen zur Traglaststeigerung von UHPC-Zylindern durch eine einbetonierte CFK-Umschnürungsbewehrung. 2013
- Salihi, H.: Untersuchungen zum Kriechverhalten von ultrahochfestem Beton mit CFK-Umschnürung. 2014
- Wenzel, M.: Untersuchungen zum Tragverhalten von formoptimierten Druckstäben aus UHPC – Teil 1: Theorie und Versuchsvorbereitung. 2014
- Egger, J.: Numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von formoptimierten Druckstäben aus UHPC – Teil 2: Modellvalidierung und Versuchsnachrechnung. 2015
- Haikala, J.: Verbundverhalten von vorgespannten CFK-Stäben in UHPC – Teil 1: Verankerungs- und Spannkrafteinleitungsversuche. 2015
- Kaynar, U.: Numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von formoptimierten Druckstäben aus UHPC – Teil 1: Theorie und Modellierung. 2015
- Rudolph, M.: Untersuchungen zum Tragverhalten von formoptimierten Druckstäben aus UHPC – Teil 2: Versuchsvorbereitung und -durchführung. 2015
- Altmann, J.: Untersuchungen zum Tragverhalten von formoptimierten Druckstäben aus UHPC – Teil 4: Einfluss der Lastexzentrizität und der Stablänge. 2016
- Scheitzenender, F.: Untersuchungen zum Tragverhalten von formoptimierten Druckstäben aus UHPC – Teil 3: Schlanke Druckstäbe unter exzentrischer Belastung. 2016
- Ettenhuber, J.: Numerische Untersuchungen zum Einfluss spezieller Aspekte auf das Tragverhalten von formoptimierten Druckstäben. 2017
- Kretzmann, A.: Quellszementzusätze – Experimentelle Untersuchungen zum Quellverhalten und dessen Einfluss auf die Verbundfestigkeit in umschnürten Systemen. 2017

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- 02.04.2012: Organisation des 2. Arbeitsgruppentreffens (AG 1D und AG Fügen) in München | Organization of the 2nd meeting of the working groups 1D and Joining in Munich
- Organisation von zwei Individualseminaren der Dynardo GmbH zum Thema "Betonmodellierung in ANSYS und multiPlas" vom 16./17.04.2013 und 06./07.05.2013 in Weimar | Organization of two workshops by the Dynardo GmbH on the topic "Modelling of concrete in ANSYS and multiPlas" from 16./17.04.2013 and 06./07.05.2013 in Weimar

Effiziente automatisierte Herstellung multifunktional gradierter Bauteile mit mineralischen Hohlkörpern | Efficient automated production of multifunctional graded components with mineral hollow bodies

► Daniel Schmeer¹, Mark Wörner², Harald Garrecht³, Oliver Sawodny², Werner Sobek¹

► ¹ Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart

► ² Institut für Systemdynamik (ISYS), Universität Stuttgart

► ³ Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), Universität Stuttgart

1 Einführung und Zielsetzung

Das Bauwesen steht in den kommenden Jahren vor der Herausforderung, für eine steigende Weltbevölkerung Habitate und Infrastruktursysteme zu errichten – unter Berücksichtigung abnehmenden Ressourcenvorkommens. Dies erfordert die Erforschung und Entwicklung neuer, innovativer Leichtbautechnologien für die Baubranche, die auf ein möglichst leichtes Bauen, die Minimierung des Verbrauchs an fossil erzeugter Energie sowie eine recyclinggerechte Bauweise abzielen [1]. Eine Möglichkeit im Bereich des Bauens mit Beton ist die von Werner Sobek entwickelte Technologie des Gradientenbetons. Dieser technologische Ansatz befasst sich erstmalig mit der Optimierung des Bauteilinnenraums und verfolgt das Ziel, die im Bauteil vorherrschenden Spannungsfelder durch die gezielte Platzierung von Hohlräumen zu homogenisieren. Dies ermöglicht die Herstellung von gewichtsminimalen, sortenrein rezyklierbaren und multifunktionalen Bauteilen aus Beton.

Die grundlegende Frage, wie ein gradiertes Bauteil entworfen und reproduzierbar in einer automatisierten Fertigung hergestellt werden kann, konnte bereits im Vorgängerprojekt *Optimalstrukturen aus funktional gradierten*

1 Introduction and objectives

For years to come, the construction industry will be faced with the challenge of building habitats and infrastructure systems for an increasing world population – with regard to dwindling resources. This requires the research and development of new, innovative lightweight-construction technologies for the building sector that aim at constructions that are as light as possible, minimize the consumption of fossil-based energy and are designed for recycling [1]. One possibility to meet these requirements in the field of concrete construction is the technology of graded concrete which was invented by Werner Sobek. This technological approach focuses for the first time on the optimisation of the component's interior and pursues the goal of homogenizing the stress fields prevailing in the component through the targeted placement of cavities. This enables the production of minimal-weight, mono-material and multifunctional components.

The fundamental question of how to design a graded component and manufacture it reproducibly in an automated procedure has already been answered in the SPP project *Optimal Structures made out of Functionally*

Betonbauteilen der ersten Förderphase des DFG-SPP 1542 beantwortet werden, s. S. 642 ff. Die Ergebnisse des Projekts zeigten, dass das vollständige ökonomische und ökologische Potential der Technologie nur dann ausgeschöpft werden kann, wenn in der weiterführenden Forschung die entwickelte Gradientenbetontechnologie um die folgenden Aspekte erweitert wird:

- Adaption des Spektrums der Betoneigenschaften zur Steigerung der Massenreduktion,
- Kopplung von Entwurf und Fertigung zu einem integralen Gesamtprozess,
- Verbesserung der Effizienz des automatisierten Herstellungsverfahrens.

Diese Schwerpunkte wurden in einer interdisziplinären Kooperation zwischen den Instituten für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Systemdynamik (ISYS) und Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart im Rahmen des abgeschlossenen Projekts in der zweiten Förderphase des DFG-SPP 1542 erfolgreich bearbeitet. Die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

2 Gradierungsansätze zur Gestaltung des Bauteilinnenraumes

Das Grundprinzip der Gradierung von Betonbauteilen besteht in der Platzierung von Hohlräumen im Inneren des Bauteils, deren Form und Größe sich nach dem vorherrschenden Beanspruchungszustand richten, um das Eigengewicht und somit den Materialverbrauch einer tragenden Konstruktion zu reduzieren. Die damit einhergehende Anordnung unterschiedlichen Steifigkeiten entlang der drei Raumachsen im Bauteil kennzeichnet die Gradiententechnologie. Die Anfänge dieses Ansatzes gehen zurück auf das Jahr 1972 mit der Erforschung gradierter Variationen von Fasern und deren Ausrichtung in Polymermatrizen [2]. Diese Technologie wurde in Europa maßgeblich durch die Arbeiten im DFG-SPP 733 *Gradientenwerkstoffe* weiter erforscht [3]. Im Hinblick auf eine

Graded Concrete during the first funding phase of the German Research Foundation's Priority Programme 1542 (DFG-SPP 1542), see page 642 et seq. The results of the project indicate that the technology's economic and ecological potential can only be exploited entirely if further research adds the following aspects to the developed technology of graded concrete:

- Adaptation of the range of concrete properties to increase mass reduction,
- Interlinking design and production to create an integral process,
- Efficiency improvement of the automated processing technique.

During the second funding phase of the DFG-SPP 1542, these key aspects were successfully dealt within the interdisciplinary cooperation between three institutes at the University of Stuttgart, namely the Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK), the Institute for System Dynamics (ISYS), and the Institute for Construction Materials (IWB). The results achieved are summarized and presented in the following.

2 Gradation approaches for designing the component's interior

The basic principle of graded concrete components consists of the placing of cavities in the component's interior, which form and size are dependent on the prevailing stress conditions, to reduce the construction's dead weight and consequently the material consumption in its construction. The accompanying arrangement of different degrees of material stiffness along the three spatial axes of a component can be described as gradation. The beginnings of this material technology reach back to 1972, when initial research was conducted into graded variations of fibres and their alignment in polymer matrices [2]. In Europe, substantial further research into this technology took place as part of the German Research Foundation's Priority Programme 733 on *Functionally Graded Mate-*

ideale Anpassung der Steifigkeitsverteilungen innerhalb eines Bauteils erwiesen sich hierbei Multimaterialtechnologien als zielführender Ansatz. Aufgrund der kraft- und formschlüssigen Verbindung der eingesetzten Hochleistungsverbundwerkstoffe entstehen jedoch bei dieser Technologie zwangsläufig Recyclingprobleme.

Die Forschungsarbeiten der Autoren zur Gestaltung der Innenräume von Betonbauteilen widmen sich folglich den Monomaterialtechnologien, damit die jederzeitige Rezyklierbarkeit des Bauteils sichergestellt ist. Die Gradierung der Bauteile wird durch zwei technologische Strategien möglich, die auch kombiniert werden können (Bild 1). Bei der ersten Strategie, der sogenannten Mikrogradierung, wird die Steifigkeit der Betonmatrix durch die Zugabe von Leichtzuschlägen und/oder schaubildenden Technologien (1–10 mm Porengröße) manipuliert. Dies führt jedoch dazu, dass selbst in den niedrig bis gar nicht beanspruchten Bereichen des Bauteils immer noch Material zu platzieren ist, das nicht für den Lastabtrag benötigt wird. Aus diesem Grund soll mit der zweiten Strategie, der sogenannten Mesogradierung, die Porengröße deutlich erhöht werden. Bei diesem Ansatz werden mineralische Hohlkörper (10–250 mm Durchmesser) im Inneren des Bauteils platziert, wodurch das Eigengewicht des Bauteils nochmals reduziert werden kann – bei gleichzeitiger Gewährleistung der sortenreinen Rezyklierbarkeit.

rials (DFG-SPP 733 *Gradientenwerkstoffe*) [3]. Multi-material technologies proved to be a purposeful approach with regard to the ideal adaptation of stiffness distributions within a component. However, these high-performance composite materials have inevitably a recycling problem, since this technology uses a combination of frictional-locked and form-fit.

As a consequence, the authors' research into the design of concrete component's interior structure is devoted to mono-material technologies to ensure that components can be recycled at all times. The gradation of the component is enabled through two technological strategies, which can also be combined with each other (Fig. 1). In the case of the first strategy, the so-called micro gradation, the stiffness of the concrete matrix is manipulated by adding lightweight aggregates and/or applying foaming technologies (1–10 mm pore size). However, this leads to the circumstance that even in those zones of the component that are subjected to low stress, or no stress whatsoever, material is to be placed that is not required for the load bearing capacity. For this reason, the second strategy, defined as meso gradation, serves the purpose of significantly increasing the pore size. With this approach, mineral hollow bodies (from 10 mm up to now 250 mm in diameter) are placed inside the component, thereby further reducing the dead weight of the component – while at the same time ensuring recyclability by type.

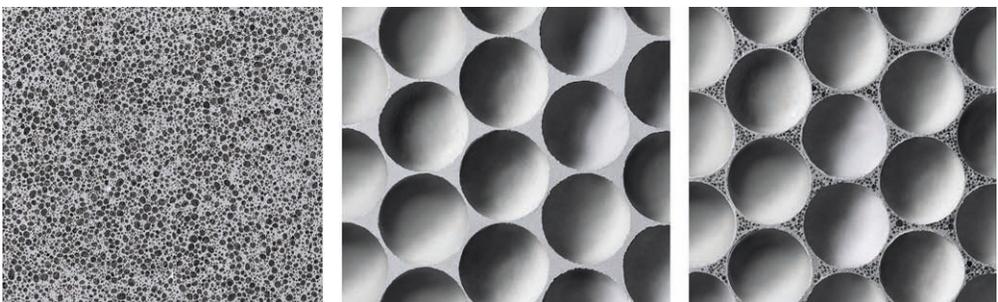


Bild 1: Mikrogradierung durch Leichtzuschläge (links), Mesogradierung durch mineralische Hohlkörper (Mitte) und Kombination der beiden Strategien (rechts) | **Fig. 1:** Micro gradation with lightweight aggregates (left), meso gradation with mineral hollow spheres (center) and combination of both strategies (right)

3 Entwurfs- und Berechnungsmethoden für Betonbauteile mit Mikrogrädierung (ILEK)

3.1 Numerische Berechnungsmethoden für mikrogradierte Betonbauteile

Für die Berechnung und Bemessung mikrogrädierter Betonbauteile eignet sich die Finite-Element-Methode (FEM), mit der eine realitätsnahe Abbildung des Tragverhaltens erzielt werden kann. Die numerische Berechnung des Tragverhaltens wird mittels der FE-Software *ABAQUS* durchgeführt und am Beispiel von skalierten Probekörpern verdeutlicht. Die in der Simulation gewählte Probekörpergeometrie ($1,2 \times 0,1 \times 0,1$ m) und die aufgebrachte 4-Punkt-Biegebelastung ergeben sich aus den durchgeführten experimentellen Bauteilversuchen aus dem Vorgängerprojekt (vgl. S. 642 ff.). Das Bauteil wird als dreidimensionaler Volumenkörper mit achtknotigen Kontinuumelementen *C3D8I* modelliert (Bild 2) und mit einer Elementgröße von 5 mm vernetzt. Die Bewehrung wird als verschmierte Fläche mit *Surface*-Elementen vom Typ *SFM3D4* in das Kontinuum eingebettet. Bei diesem Ansatz wird die gesamte Bewehrungsmenge als äquivalente Fläche über die Gesamtbreite des Bauteils approximiert. Zusätzlich wird von einem vollständigen Verbund zwischen den Materialien ausgegangen [4]. Die Lagerung sowie die verschiebungsgesteuerte Lastaufbringung erfolgt über vollständig steife Elemente mit einer Breite von 10 mm. Die statisch bestimmte Lagerung wird durch Ausnutzung der Achssymmetrie in Balkenmitte (x-Richtung) und durch unverschiebliche Linienlager (y- und z-Richtung) gebildet.

3 Design and calculation methods for micro graded concrete components (ILEK)

3.1 Numerical calculation methods for micro graded concrete components

The finite element method is suitable for calculating and dimensioning functionally graded concrete components and enables a realistic representation of their load-bearing performance. The numerical calculation of the load-bearing behaviour of graded components is carried out using the FE software *ABAQUS* and is illustrated by scaled test specimens as an example. The test specimen's geometry selected in the simulation ($1.2 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$) and the load position follow the experimental four-point bending tests performed in the previous project (see page 642 seq.). The component is modelled as a three-dimensional solid body with eight-nodal continuum elements *C3D8I* (Fig. 2) and meshed with an element size of 5 mm. The reinforcement is embedded in the continuum as a smeared surface with elements of the type *SFM3D4*. In this approach, the entire reinforcement is approximated as an equivalent area over the total width of the component. Additionally, a full bond is assumed between the materials [4]. The support, as well as the displacement-controlled application of load, is executed through rigid elements with a width of 10 mm. The statically determined support is achieved by utilizing the axis symmetry at the centre of the beam (x-direction) and through the fixed line supports (y- and z-direction).

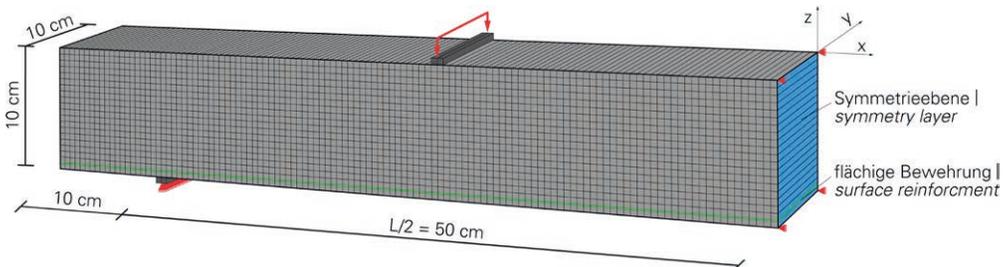


Bild 2: FE-Modell des skalierten Probekörpers | Fig. 2: FE model of the scaled test specimen

Mit dem in der FE-Software zur Verfügung stehenden Materialgesetz *Concrete Damaged Plasticity* [4] ist es möglich, das nichtlineare Materialverhalten von bewehrtem sowie unbewehrtem Beton abzubilden. Dieses elastisch-plastische Schädigungsmodell basiert auf der Weiterentwicklung der Drucker-Prager-Fließbedingung [5], [6] und wird in [7] ausführlich beschrieben. Für den Bewehrungsstahl, dessen Spannungs-Dehnungsbeziehung durch ein linear-elastisches Verhalten bis zum Erreichen der Fließgrenze und einen anschließenden plastischen Bereich gekennzeichnet ist, wird ein elastisch-plastisches Materialgesetz mit isotroper Verfestigung verwendet [8].

Mit dem beschriebenen numerischen FE-Modell werden unter Berücksichtigung der vorgestellten Materialgesetze für Beton und Bewehrung die Versuchsserien RL₅₅ und KL₅₅ aus dem Projekt der ersten Förderphase nachgerechnet. RL₅₅ beschreibt einen Referenzprobekörper mit homogener Materialverteilung und Stabstahlbewehrung. Das gradierte, stabstahlbewehrte Bauteil KL₅₅ besteht aus einer oberen und unteren Deckschicht zur Aufnahme des Biegemomentes und einem dreifach abgestuften Kern, der entsprechend der im Bauteil herrschenden Querkraft dimensioniert ist. Bild 3 stellt die Ergebnisse der nichtlinearen numerischen Simulation und die Ergebnisse der Bauteilversuche zusammenfassend dar. Die Simulation des Tragverhaltens des massiven Referenzbauteils zeigt eine hinreichend genaue Übereinstimmung mit den experimentellen Versuchen und bestätigt somit den gewählten Ansatz zur Modellierung. Durch den systematischen Übertrag der identifizierten Modellierungsparameter auf gradierte Betonbauteile konnte das experimentell ermittelte Tragverhalten in der Simulation ebenfalls hinreichend genau abgebildet werden. Beim Kammerlayout wird im linear-elastischen Zustand I das Tragverhalten geringfügig unterschätzt. Diese Abweichung kann durch den automatisierten schicht- und zonenweisen Herstellungsprozess begründet werden. Bei den Übergangsbereichen zwischen den Zonen einer Schicht wird aufgrund des charakteristischen Materialauftrags des Spritzbetons primär das höherfeste Material

The material law of *concrete damaged plasticity* [4], which is made available by the FE software, enables the reproduction of the non-linear material behaviour of both, reinforced and non-reinforced concrete. This elastic-plastic damage model is based on the further development of the Drucker-Prager yield criterion [5], [6] and is described in detail in [7]. An elastic-plastic material law with isotropic hardening is applied for the reinforcing steel, whose stress-strain relationship is characterized by a linear-elastic behaviour until the yield point and a subsequent plastic zone [8].

The numerical FE model described above is used to calculate the RL₅₅ and KL₅₅ test series from the project of the first funding phase, taking into account the presented material laws pertaining to concrete and reinforcement. RL₅₅ describes a reference test specimen with homogeneous material distribution and steel rebar reinforcement. The graded, reinforced (steel rebar) component KL₅₅ consists of an upper and a lower cover layer to absorb the bending moment and a triple-graded core, which is dimensioned according to the shear force prevailing in the component. Fig. 3 summarizes the results of the non-linear numerical simulation and those of the component tests. The simulation of the load-bearing performance of the solid reference component exhibits a sufficiently exact consensus with the experimental tests, thus confirming the chosen calculation approach. The systematic transfer of the identified modelling parameters to graded concrete components also enabled the sufficiently accurate reproduction of the experimentally determined load-bearing performance in the simulation. In the case of the linear-elastic state I of the segmented layout, the load-bearing performance had been marginally underestimated. This deviation can be explained by the automated layer-by-layer and zone-by-zone production process. In the transition areas between the zones of a layer and on account of the characteristic material application of the shotcrete, a high-strength material is primarily installed. It follows from this, that non-linear FE simulation is able to reproduce – reliably and with sufficient

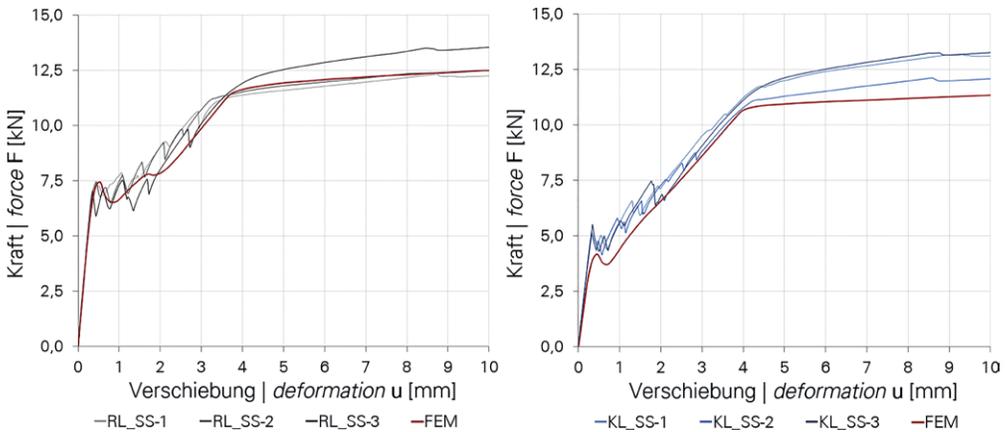


Bild 3: Gegenüberstellung von experimentell bestimmten Kraft-Verformungsdiagrammen aus den Versuchen der Serie RL_{SS} (grau) sowie KL_{SS} (blau) und den numerisch bestimmten Kraft-Verformungsdiagrammen (rot) | **Fig. 3:** Comparison of the experimental force displacement diagram for the test series RL_{SS} (grey) und KL_{SS} (blue) with the numerical force displacement diagram (red)

eingebaut. Daraus folgt, dass das Tragverhalten gradiert Betonbauteile auf charakteristischem Lastniveau durch die nichtlineare FE-Simulation auf der sicheren Seite liegend abgebildet wird. Entsprechend ermöglicht dieser Berechnungsansatz die Nachweisführung für das Bauteil in den Grenzzuständen von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit.

Innerhalb des Projekts wurden außerdem Versuche an gradierten Betonbauteilen mit unterschiedlichen Bewehrungen (Carbonfasergelege, Glasfasergelege, Glasfaserstab und Basaltfaserstab) durchgeführt und numerisch berechnet. In der Simulation wurde das elastisch-plastische Modell der Bewehrung entsprechend den eingesetzten Materialien adaptiert. Die Kraft-Verformungsdiagramme der Versuchsserien und die Simulationsergebnisse sind beispielhaft für das Kammerlayout mit Glasfaser- (KL_{GS}) und Basaltfaserbewehrung (KL_{BS}) in Bild 4 zusammengefasst. Das Kraft-Verformungsverhalten spiegelt sowohl für die Versuche als auch die Simulation den typischen Verlauf für faserverbundbewehrte Betonbauteile nach [9] wider. Die Untersuchungen verdeutlichen, dass für mikrogradierte Betonbauteile das Tragverhalten auch für unterschiedliche Bewehrungen durch die nichtlineare FE-Simulation sehr gut wiedergegeben wird.

accuracy – the load-bearing performance of graded concrete components at characteristic load levels. Accordingly, this method of calculation makes it possible to validate the component in the ultimate limit state and in the service limit state.

Furthermore, tests were carried out and numerically simulated as part of the project by using graded concrete components with different reinforcement types (textile reinforcements made of carbon or glass fibres and rebars made of glass or basalt fibres). In the simulation, the elastic-plastic model of the reinforcement was adjusted according to the material used. The force-displacement diagrams of the test series and simulation are summarized in Fig. 4 exemplary. It is illustrated for the segmented layout reinforced by a rebar made of glass fibre (KL_{GS}) and of basalt fibre (KL_{BS}). The force-displacement behaviour reflects the typical trend for fibre-reinforced concrete components according to [9] in the tests as well as in the simulation. The examinations show that non-linear FE simulation at characteristic load level is able to deliver a satisfactory representation of the load-bearing performance of graded concrete components with different reinforcements.

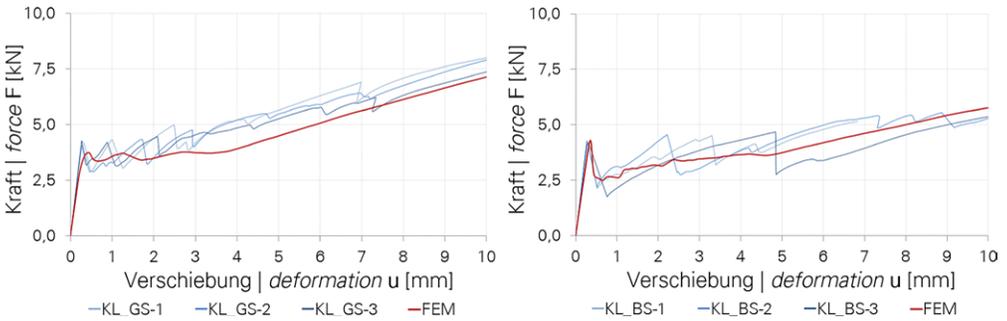


Bild 4: Gegenüberstellung von experimentell bestimmten Kraft-Verformungsdiagrammen aus den Versuchen der Serie KL_{GS} (blau, links) sowie KL_{BS} (blau, rechts) und den numerisch bestimmten Kraft-Verformungsdiagrammen (rot) | **Fig. 4:** Comparison of the experimental force displacement diagram for the test series KL_{GS} (blue, left) and KL_{BS} (blue, right) with the numerical force displacement diagram (red)

3.2 Entwurf mikrograderter Betonbauteile unter Berücksichtigung eines automatisierten Herstellungsprozesses

Der Entwurf funktional graderter Betonbauteile zielt auf die Bestimmung der idealen Steifigkeitsverhältnisse im Bauteil ab, sodass Spannungen homogenisiert und folglich der Materialeinsatz minimiert werden. Für eine detaillierte Beschreibung der Entwurfsgrundlagen sei sowohl auf den Buchbeitrag zum Vorgängerprojekt *Optimalstrukturen aus funktional graderten Betonbauteilen* als auch auf [10] verwiesen. Auf diesen Ergebnissen aufbauend wurde der Gesamtprozess des Entwurfs erweitert, um die Randbedingungen des automatisierten Herstellungsverfahrens mit einzubeziehen. Der iterative Ablauf des erweiterten Entwurfsprozesses ist in Bild 5 schematisch dargestellt. In einem ersten Schritt werden dabei die Entwurfsrandbedingungen festgelegt, die im Hochbau zumeist durch die Bauteilgeometrie, Belastung, Auflagersituation und das Material vorgegeben sind. Auf Grundlage der Entwurfsrandbedingungen erfolgt eine Vordimensionierung inklusive der Bewehrungsdimensionierung, die zur Aufnahme der Zugkräfte im Betonbauteil notwendig ist. Dementsprechend werden die Menge und der Querschnitt bei ebener Bewehrungsführung ermittelt. Auch wenn mit einer ebenen Anordnung der Bewehrung im Bauteil keine tragstrukturelle Optimalität erreichbar ist. Eine der Beanspruchung nachfolgende Bewehrungsführung, die sich beispielsweise aus

3.2 Design of micro graded concrete components considering an automated production process

The design of functionally graded concrete components aims at determining the ideal stiffness configuration within the component so that stress fields are homogenized and consequently the use of material is minimized. For a detailed description of the design fundamentals, please refer to both, the report regarding the previous project *Optimal Structures made out of Functionally Graded Concrete* and to [10]. Based on the previous results, the overall design process was advanced to include the boundary conditions of the automated production process. The iterative design process is schematically depicted in Fig. 5. As a first step, the design's boundary conditions are determined, which in building construction are usually pre-defined by the component's geometry, the loads, the support and the material. On the basis of these boundary conditions, a pre-dimensioning is carried out including the reinforcement design, which is necessary to absorb the tensile forces within the concrete component. Correspondingly, quantity and cross section of the reinforcement are dimensioned. Even if a planar arrangement of the reinforcement in the component does not achieve structural optimality. Research at the ILEK is currently focused on a reinforcement design following the stress state within the component, which can be derived from known strut and tie models or determined by topology optimisation.

bekanntes Stabwerksmodell ableiten oder mit Verfahren der Topologieoptimierung bestimmen lässt, ist derzeit Gegenstand der Forschung am ILEK.

Im nächsten Schritt wird das sogenannte Gradientenlayout ermittelt, welches die ideale Material- bzw. Porositätsverteilung im Inneren des Betonbauteils beschreibt. Das Ziel dieser Optimierung besteht in der Minimierung des Eigengewichts der Konstruktion unter Einhaltung der Anforderungen an die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit. Hierfür stehen zwei Entwurfsprinzipien zur Verfügung: zum einen das Prinzip *design for strength*, bei dem die Materialverteilung nach den im Bauteil vorliegenden Beanspruchungen erfolgt; zum anderen das Prinzip *design for deformation*, bei dem das

The following step determines the so-called graded layout, which describes the ideal material or porosity distribution within the concrete component. The goal of this optimisation is to minimize the construction's dead weight, while complying with the requirements regarding to ultimate limit state (ULS) and service limit state (SLS). For this purpose, two design principles are available: on the one hand, the *design for strength* approach, in which the material is distributed according to the stress state in the component; on the other hand, the *design for deformation* approach, in which the material is distributed on the basis of a maximized bending stiffness of the component, while observing an admissible deformation limit. The required objective functions, and their possible optimisation solution, are known from the previous

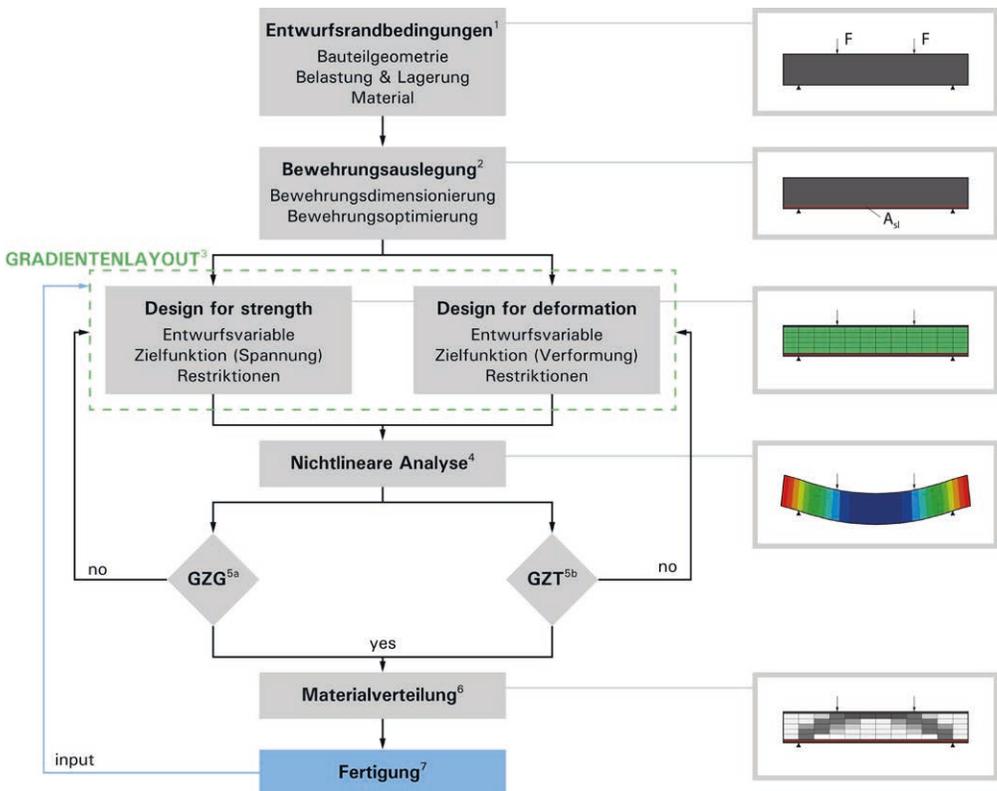


Bild 5: Ablaufdiagramm mit den einzelnen Phasen des Entwurfsprozesses | **Fig. 5:** Flow chart with the single design steps: ¹ design constraints; ² design of the reinforcement layout; ³ definition of the graded layout according to the principle design for strength or design for deformation; ⁴ non-linear finite element analysis; checking SLS ^{5a} and ULS ^{5b}; ⁶ final material distribution and ⁷ manufacturing

Material auf Basis einer Maximierung der Biegesteifigkeit des Bauteils bei einer zulässigen Grenzverformung verteilt wird. Die Formulierung der hierzu notwendigen Zielfunktionen und deren mögliche Optimierungslösung sind aus dem Vorgängerprojekt bekannt und auch in [10] ausführlicher beschrieben. In die zur Verfügung stehenden Optimierungsmethoden werden im Folgenden die Randbedingungen des automatisierten Fertigungsverfahrens sukzessive integriert, sodass ausschließlich herstellbare Materialverteilungen entworfen werden. Die materialspezifischen Optimierungsrandbedingungen können mit Hilfe des SIMP-Ansatzes im Bauteilentwurf berücksichtigt werden [10]. Dabei wird der zur Verfügung stehende Grenzbereich der Gradientenbetone über eine normierte E-Modul-Dichtebeziehung definiert. Diese Beziehung wird von der Basismischung MI mit einem E-Modul von 35.718 N/mm² bei zugehöriger Rohdichte von 2,21 kg/dm³ sowie der leichten Basismischung MII bei einer Rohdichte von 1,04 kg/dm³ und zugehörigem E-Modul von 7.754 N/mm² begrenzt. Zwischen diesen Grenzwerten kann der materialspezifische Anpassungsfaktor p frei gewählt werden. Im vorliegenden Fall werden für $p = 2$ die experimentell ermittelten Materialkennwerte sehr gut abgebildet (Bild 6), sodass nur herstellbare Dichten in der numerischen Simulation verwendet werden.

Die verfahrensbedingten Restriktionen der Schicht-zu-Schicht-Herstellung werden über eine Sektionierung des Entwurfsraumes berücksichtigt [11]. Durch die Zusammenfassung einzelner finiter Elemente zu Voxeln und deren Dichteoptimierung werden sprunghafte Eigenschaftsänderungen ausgeschlossen und kontinuierlich herstellbare Porositätsverläufe entworfen. Die Größe der Sektionen lässt sich je nach Auflösung des Materialauftrags individuell anpassen. Die Charakteristika des schichtweisen Fertigungsprozesses werden bei der Optimierung durch Anpassung des Dichtefilters erfasst. Der Filter ist so eingestellt, dass in der Horizontalen nur geglättete Materialübergänge möglich sind, wohingegen in der Vertikalen die Eigenschaftsänderungen nicht beschränkt werden. Darüber hinaus lässt sich die Material-

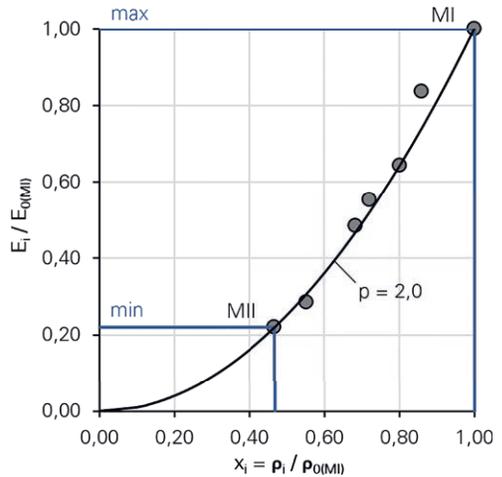


Bild 6: Anpassung des SIMP-Ansatzes an die Betoneigenschaften des automatisierten Trockenspritzverfahrens | Fig. 6: Adjustment of the SIMP approach to the concrete properties of the dry spraying technique

project and are also described in detail in [10]. To only design, such material distributions that are producible, the boundary conditions of the automated production process are successively integrated into the available optimisation methods. The material-related boundary conditions can be taken into account using the SIMP approach [10]. The available range for graded concretes is defined by a normalized relationship between Young's modulus and bulk density. This relationship is restricted to the base mixture MI, with a Young's modulus of 35,718 N/mm² at a corresponding bulk density of 2.21 kg/dm³, as well as the lightweight base mixture MII, with a bulk density of 1.04 kg/dm³ and corresponding Young's modulus of 7,754 N/mm². The material-related coefficient p can be freely selected between these limit values. In the present case, the experimentally determined material properties are mapped very well by a factor for $p = 2$ (Fig. 6), so that only producible densities are used in the numerical simulation.

The process-related restrictions of the layer-to-layer production are taken into account by sectioning the design space [11]. By combining individual finite elements to voxels, and opti-

verteilung bestimmter Voxel vorgeben, um konstruktive Randbedingungen bei der Optimierung abzudecken (z. B. die Betondeckung, den Bewehrungsverbund etc.). Zusätzlich kann die Anzahl an zur Verfügung stehenden Materialien unter Berücksichtigung der Bauteilgröße sowie der Dynamik des Misch-, Dosier- und Förderprozesses beschränkt werden.

Das aus der Optimierung mit linear-elastischem Materialverhalten resultierende Gradientenlayout wird abschließend durch die nichtlineare FE-Simulation auf Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit überprüft. Sollte einer dieser Nachweise nicht erfüllt sein, werden die Randbedingungen angepasst und die Optimierung erneut durchgeführt. Bild 7 zeigt beispielhafte Ergebnisse dieses Optimierungsprozesses. Bei der Materialverteilung ohne Einsatz des Dichtefilters ist ersichtlich, dass dieses Layout aufgrund der fein aufgelösten Materialverteilung (5 × 5 mm Elementgröße) mit der automatisierten Fertigung nicht realisierbar ist. Des Weiteren resultiert aus der nichtlinearen Berechnung ein frühzeitiges Querkraftversagen des Bauteils in Querschnittsmitte unter der Lasteinleitung. Durch Anpassung der Randbedingungen der Optimierung und den Einsatz des Dichtefilters kann diesen Problematiken begegnet werden. Daraus ergibt sich ein produzierbares Bauteil, das bei einer Gewichtsreduktion von 20 % allen Anforderungen der Standsicherheit gerecht wird.

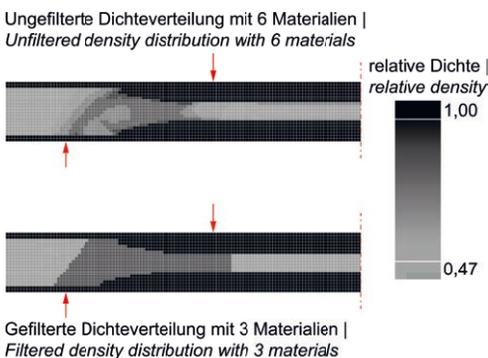


Bild 7: Dichteverteilung als Entwurfsergebnis der Optimierung ohne (oben) und mit Berücksichtigung von Verfahrensrandbedingungen | **Fig. 7:** Density distribution as an optimization result considering different boundary conditions

minimizing the latter's density, incoherent changes in properties are excluded and continuously producible porosity distributions are created. The size of the sections can be individually adjusted according to the resolution of the material application. During the optimisation, the characteristics of the layer-by-layer production are captured by adjusting the density filter. The filter is set in such a way that only smoothed material transitions are enabled in the horizontal direction, whereas property changes in the vertical direction are unlimited. Furthermore, the material distribution of specific voxels can be predefined to cover structural boundary conditions during the optimisation (such as the concrete cover, the bond condition, etc.). Additionally, the number of available materials can be determined taking into account the component size as well as the dynamics of the mixing, dosing and conveying process.

The graded layout resulting from the optimisation with linear-elastic material behaviour is finally verified with regard to its ULS and SLS through a non-linear FE simulation. If one of these verifications cannot be provided, the boundary conditions are adjusted, and the optimisation is carried out again. Figure 7 illustrates exemplary results from this optimisation process. In the case of the material distribution without the use of the density filter, it is evident that this layout (element size of 5 mm × 5 mm) cannot be realized by means of automated production owing to the fine resolved material application. Moreover, the non-linear calculation results in an early shear-force failure of the component in the core zone under the load application. These problems can be solved by adjusting the optimisation's boundary conditions and by using the density filter. The result is a reproducible component that meets all requirements of the limit states, while reducing its weight by 20%.

4 Verfahren zur Herstellung mikrograderter Betonbauteile (ISYS)

4.1 Automatisierte Herstellungsplattform

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die zuvor realisierte Anlagentechnik systematisch weiterentwickelt und optimiert. Zentral ist hierbei die Automatisierung und vollständige Integration der Wiege-, Dosier- und Mischtechnik in die Herstellungsplattform zu nennen. Dadurch können ein gleichmäßiger Mischprozess und ein stetiger Materialfluss erzeugt werden, welcher die kontinuierliche Materialausgabe sicherstellt. Das weiterentwickelte Gesamtkonzept zur automatisierten Herstellung und dessen Realisierung ist in Bild 8 dargestellt.

4 Production process for micro graded concrete components (ISYS)

4.1 Automated production system

As part of the research project, the previously realized machine technology was developed further and systematically optimised. At this, it is crucial to mention the automation and full integration of the weighing, metering and mixing technology into the system. In this way, a homogenous mixing process and constant material flow are enabled, which ensure a continuous material output. The refined overall concept of automated production and its realization is depicted in Fig. 8.

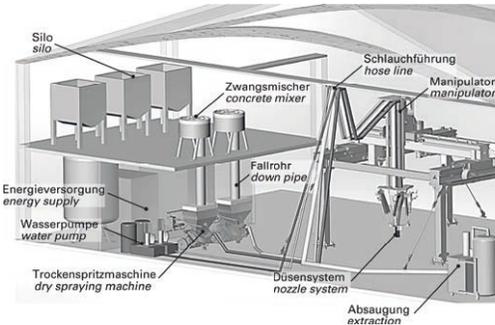


Bild 8: Gesamtkonzept und Realisierung der Plattform zur Herstellung funktional gradierter Betonbauteile | **Fig. 8:** Concept and realization of the whole manufacturing system to produce graded concrete components

Innerhalb des Gesamtprozesses werden in einem ersten Schritt die trockenen Ausgangsstoffe für die Betonrezepturen aus den Silos den Zwangsmischern zugeführt. Die Zwangsmischer sind mit Wägezellen ausgerüstet, die eine Dosierung der Ausgangsstoffe sowie eine Erfassung der Materialströme in das System ermöglichen. Nach abgeschlossenem Mischvorgang werden die Basismischungen über Fallrohre den Trockenspritzmaschinen zugeführt. Der Materialstrom der Betone wird durch die Vorgabe einer spezifischen Drehzahl eingestellt und mittels eines geregelten Luftdrucks und Volumenstroms zur Düse gefördert. Zur Sicherstellung definierter und maximaler Krümmungsradien der Förderschläuche ist eine passive Linearführung in die Herstellungsplat-

As the first step of the overall process, the raw materials of the concrete recipe are from the silos supplied to the compulsory mixers. The mixers are equipped with weighing cells which allow dosing of the raw materials and recording of the material flows into the system. After completing the mixing process, the base mixtures were supplied to the dry-spraying machines via downpipes. The material flow of concretes is adjusted by setting a specific rotational speed and conveyed to the nozzle through controlled air pressure and volume flow. A passive linear guideway is integrated into the production system to ensure defined and maximum radii of curvature in the conveying hoses. The dry materials are mixed with water by using two wetting units situated in front of and within the

form integriert. Durch zwei unabhängige Benetzungseinheiten kann vor und in der Düse die Durchmischung der trockenen Ausgangsstoffe mit Wasser erfolgen. Anschließend kann die Gradierung der Betone auf Basis zweier Mischkonzepte umgesetzt werden. Zum einen werden bei der Zwei-Düsenteknologie die beiden Sprühstrahle entsprechend den geforderten Eigenschaften im Betonbauteil überlagert. Zum anderen werden bei der Ein-Düsenteknologie nach Benetzung der trockenen Ausgangsstoffe die Basismischungen in einer vorgelagerten Mischeinheit mit stationärem Strömungskörper zusammengeführt [12]. Die Ausbringvorrichtung beider Konzepte wird mit dem Manipulator, bestehend aus Mehrachslinearsystem und Stewart-Gough-Plattform, zielgerichtet geführt und stellt den positionsgenauen Auftrag der Spritzbetone somit sicher. Durch die Integration einer Absaugvorrichtung können Rückprall ebenfalls entfernt werden. Ein Laserdistanzsensor ermöglicht die Vermessung der Topografie des applizierten Materials.

4.2 Modellierung des Gesamtprozesses

Die Vielzahl an Variationsparametern im Herstellungsprozess erfordert zur Umsetzung der entworfenen Gradientenlayouts ein ganzheitliches Simulationsmodell. Das zugrundeliegende Modell muss sowohl die Abbildung dreidimensionaler und ortsbezogener Materialverläufe im Bauteil als auch die dynamischen Prozesse der Herstellungsplattform in adäquater Berechnungszeit ermöglichen. Insbesondere bei komplexen Gradientenlayouts stoßen die bislang eingesetzten zweidimensionalen Überlagerungsmodelle, welche Spritzstreifen mit konstanten Prozessparametern und Zustandsgrößen superpositionieren, an ihre Grenzen. Daher werden auf Basis der analytischen Modellierung der Teilprozesse sowie empirischer Untersuchungen die approximativen Modelle der Betonverfahrenstechnik und des Manipulators abgeleitet. Auf Grundlage dieser Modelle kann letzten Endes der Applikationsprozess simuliert und von der Plattform zielgerichtet umgesetzt werden [12]. Die Analysen zeigten,

the concretes can then be graded on the basis of two mixing concepts. On the one hand, in the case of the dual-nozzle technology, the two spray jets are superimposed according to the properties required within the concrete component. On the other hand, in the case of the single-nozzle technology, once the dry material has been wetted, the base mixtures are brought together through an upstream mixing unit that includes a stationary flow body [12]. The spreading device of both concepts can purposefully be guided with the manipulator's help – which consists of a multi-axial linear system and a Stewart-Gough platform – thereby ensuring a precise application of the shotcrete. By integrating a suction device, dust can be absorbed and unavoidable rebound can be eliminated, as well. A laser distance sensor enables the measuring of the applied material's topography.

4.2 Modelling of the overall process

The multitude of variation parameters in the production process requires a holistic simulation model to realise the designed gradient layouts. The underlying model must enable, within an adequate calculation time, the mapping of the three-dimensional and site-specific layout of the concrete characteristics within the component as well as the dynamic processes of the production system. Especially with complex gradient layouts, the used two-dimensional superimposition models, which overlap spray strips with constant process parameters and state variables, reach their limits. Accordingly, the approximate models of concrete technology and the manipulator are derived, on the basis of the analytical modelling of sub-processes and empirical studies [12]. Analyses have shown that with sufficient mixing time of the raw materials, this sub-process has no influence on the subsequent processes of the graded dry spraying technique. Thus a reduced model (Fig. 9), consisting of the dosing and conveying process as well as the application process under consideration of the manipulator, is sufficient for the simulation of the manufacturing platform.

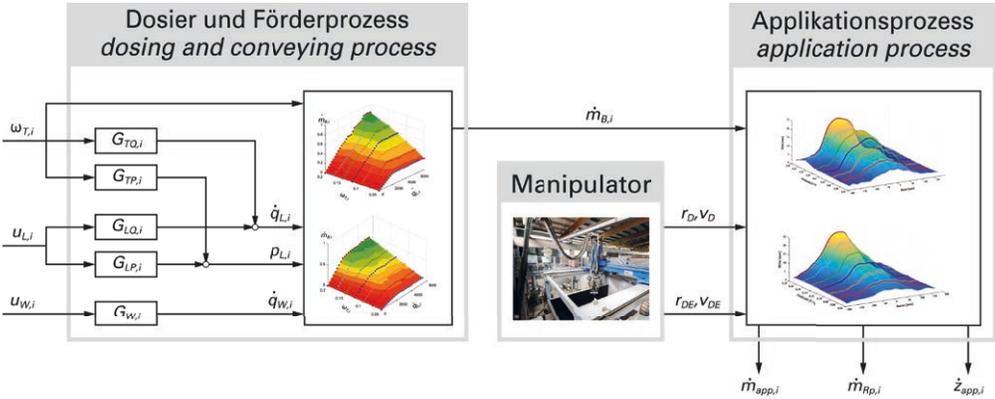


Bild 9: Reduziertes Modell der Herstellungsplattform | Fig. 9: Reduced model of the production system

dass bei hinreichender Mischdauer der Ausgangsstoffe dieser Teilprozess keinen Einfluss auf die nachfolgenden Prozesse des gradierten Trockenspritzverfahrens besitzt. Somit ist ein reduziertes Modell (Bild 9), bestehend aus Dosier- und Förderprozess sowie dem Applikationsprozess unter Berücksichtigung des Manipulators ausreichend, für die Simulation der Herstellungsplattform.

Für die Modellierung der Betonverfahrenstechnik konnten systemtheoretische Modelle identifiziert und experimentell validiert werden [12]. Diese beschreiben das dynamische Übertragungsverhalten ($G_{*,i}$) von den Eingangsgrößen des Systems – Drehzahl des Taschenrades $\omega_{i,r}$, Eingänge des Luftventils $u_{L,i}$ und des Wasserventils $u_{W,i}$ – auf die messbaren Zustandsgrößen Druck $p_{L,i}$ sowie Durchflüsse der Luft $\dot{q}_{L,i}$ und des Wassers $\dot{q}_{W,i}$. In Abhängigkeit der messbaren Zustandsgrößen können für beide Basismischungen pneumatische Zustandsdiagramme abgeleitet werden, welche die Rekonstruktion der Massenströme $\dot{m}_{B,i}$ ermöglichen. Des Weiteren kann überprüft werden, ob die notwendige Flugförderung der Betonkonglomerate sichergestellt ist. Die Dynamik des Manipulators ist mit der Methode der starren Mehrkörpersysteme modelliert, um die Düsenführungs- (r_D, v_D) und die Düsen eigenbewegung (r_{DE}, v_{DE}) zielgerichtet ausführen zu können. Weiterhin kann durch die analytische und approximative Modellierung von Frei- und Wand-

To model the concrete technology, system-theoretical models were identified and experimentally validated [12]. These models describe the dynamic transmission behaviour ($G_{*,i}$) of the system's input variables (rotational speed of the pocket wheel $\omega_{i,r}$, the input of the air valve $u_{L,i}$ and of the water valve $u_{W,i}$) on the measurable state variables (pressure $p_{L,i}$, air flow $\dot{q}_{L,i}$, and water flow $\dot{q}_{W,i}$). Depending on these state variables, pneumatic state diagrams can be derived for the base mixtures that enable the reconstruction of the mass flows $\dot{m}_{B,i}$. Furthermore, it is possible to check whether the required pneumatic transmission of the concrete conglomerates has been ensured. Manipulator dynamics are modelled by using the method of rigid multi-body systems to enable the guided nozzle motion (r_D, v_D) and the nozzle's self-motion (r_{DE}, v_{DE}) in a targeted manner. Moreover, the analytical and approximate modelling of the free jet and wall jet enables the shotcrete's application process to be mapped, and the free parameters to be identified by means of characteristic spraying slats [12]. On the one hand, the reduced model can be used to simulate both the dosing and conveying process of the material as well as the addition of liquids to the shotcrete. On the other hand, the mass distribution during the application process, that consists of applied material ($\dot{m}_{app,i}$) and rebound ($\dot{m}_{RP,i}$), as well as the theoretical layer-profile thickness in relation to time ($\dot{z}_{app,i}$) can be calculated. Fig. 10 shows in an exemplary simulation of the material ap-

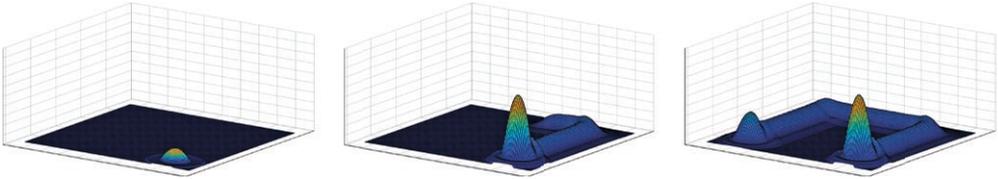


Bild 10: Simulation des Materialauftrags zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten | Fig. 10: Simulation of the material application at three different time stages

strahl der Applikationsprozess des Spritzbetons abgebildet werden. Darauf aufbauend lassen sich die freien Parameter anhand der charakteristischen Spritzstreifen identifizieren [12]. Mit dem reduzierten Modell können einerseits der Dosier- und Förderprozess der Ausgangsstoffe sowie die Zugabe flüssiger Bestandteile zum fertigen Spritzbeton simuliert werden. Andererseits werden die Massenverteilung beim Applikationsprozess bestehend aus appliziertem Material ($\dot{m}_{app,i}$) sowie Rückprall ($\dot{m}_{RP,i}$) und die theoretische Schichtprofilstärke in Abhängigkeit der Zeit ($\dot{z}_{app,i}$) berechenbar. So zeigt Bild 10 exemplarisch die Simulation des Materialauftrags bei konstanten Prozessparametern und Zustandsgrößen der Basismischung MI zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Führungsbewegung wird mittels einer mäanderförmigen Trajektorie ausgeführt und mit einer kreisförmigen Düseneigenbewegung überlagert. Neben der Simulation des Materialauftrags wird die Dynamik des Manipulators abgebildet und mit dem Matlab-Tool *Simscape* visualisiert [13].

plication with the base mixture MI at constant process parameters and state variables at three different points in time. The guided motion is carried out through a meander-shaped trajectory and superimposed with a circular nozzle's self-motion. Apart from simulating the material application, manipulator dynamics are mapped and visualized by using the Matlab tool *Simscape* [13].

The quality of the reduced overall model of the production system can be assessed by taking the characteristic material application as an example. Fig. 11 compares the simulated material application with the real material application. The reduced model can reproduce the real material distribution of the shotcrete on the application surface with sufficient accuracy. This confirms the chosen modelling approach and enables the shotcrete's three-dimensional simulation of the material application at varying process parameters and state variables.

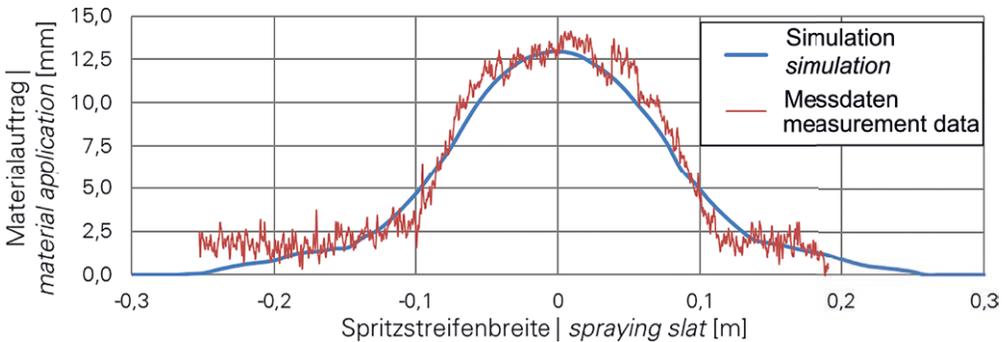


Bild 11: Exemplarisch vermessener und simulierter Spritzstreifen | Fig. 11: Validation of the simulated spraying slit with the experimental results

Am Beispiel des charakteristischen Materialauftrags kann abschließend die Güte des reduzierten Gesamtmodells der Herstellungsplattform bewertet werden. Bild 11 stellt beispielhaft den simulierten Materialauftrag dem tatsächlich gemessenen Materialauftrag gegenüber. Das reduzierte Modell kann dabei den realen Spritzreifen auf der Auftragsfläche mit hinreichender Genauigkeit abbilden. Dies bestätigt den gewählten Modellansatz und ermöglicht die dreidimensionale Simulation des Materialauftrags bei variierenden Prozessparametern und Zustandsgrößen.

4.3 Prozesssteuerung und -regelung zur Bauteilherstellung

Durch die Prozesssteuerung und -regelung wird zunächst der schichtweise Materialauftrag auf Grundlage des entworfenen Gradientenlayouts geplant. Auf Basis der Simulationsergebnisse können die erforderlichen Prozessdaten generiert werden und der Bauteilentwurf lässt sich umsetzen. Um den hohen Anforderungen zur Herstellung gradierter Betonbauteile gerecht zu werden, wurde der in Bild 12 schematisch abgebildete, iterative Ablauf der Prozesssteuerung und -regelung konzipiert. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Planung und Optimierung des Materialauftrags. Nur dadurch werden die positionsgenaue Applikation der Gradientenbetone sichergestellt und die reproduzierbare Betonqualität gewährleistet.

Aus dem Bauteilentwurf werden zunächst für den Herstellungsprozess alle relevanten Daten wie geometrische Abmessungen und Materialverteilung an die Prozesssteuerung und Prozessregelung übergeben. Aus der Simulation der mikrogradierten Betonbauteile resultieren positionsabhängige Informationen zu den Materialeigenschaften, welche die Grundlage zur Planung des Materialauftrags durch die Herstellungsplattform darstellen. Mit diesen Daten kann unter Anwendung des vorgestellten Simulationsmodells die Optimierung der charakteristischen Spritzbetonverteilung und der Prozessparameter des Gesamtsystems erfolgen. In den experimentellen Untersuchungen hat sich

4.3 Process control for the component production

Due to the process control, the layer-to-layer production is initially planned and implemented on the basis of the designed graded layout. Dependence of the simulation results, the required process data can be generated and the component design can be realized. In order to meet the high requirements for the production of graded concrete components, the iterative process control shown schematically in Fig. 12 was established. One of the main focuses lies on the planning and optimisation of the material application. Only this ensures the precise positioning during the application of the graded concretes and guarantees reproducible concrete quality.

All relevant data for the manufacturing process, such as geometry and material distribution, are first transferred from the conceptual design to the process control. Numerical simulations of the micro graded concrete components provide position-dependent information on the material properties that forms the basis for planning the material application through the production system. Based on these data, the characteristic shotcrete distribution and process parameters of the overall system can be optimised using the presented simulation model. The experimental analysis of the production system's state variables and process parameters showed that, for a given material property $p_{i,j}$, only the concrete-conveying rate p_F and the speed of the nozzle's guiding movement v_D are available as free parameters to influence the characteristic distribution of the shotcrete on the application surface. Beside these two parameters, the material application during the manufacturing is centrally determined by the superposition of the characteristic material application, while considering the starting positions of the spraying stripes, their distance from each other and their number. By sectioning the concrete components into layers i and zones j the material application can be planned layer-by-layer and zone-by-zone, with regard to the different demands for the load-bearing capacity. Corre-

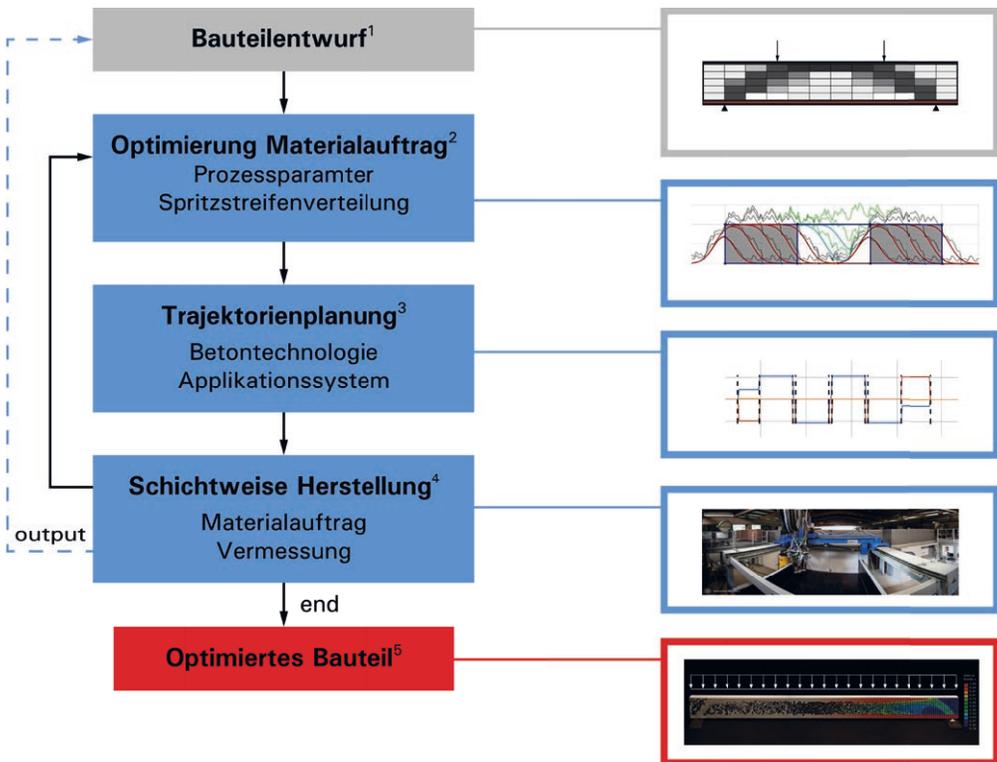


Bild 12: Ablaufdiagramm mit den einzelnen Phasen des Herstellungsprozesses | Fig. 12: Flow chart with the single production steps: ¹ component design, ² optimization of the material application, ³ trajectory planning, ⁴ additive manufacturing and ⁵ optimized component

dabei herausgestellt, dass für eine gegebene Materialeigenschaft $p_{i,j}$ einzig die Betonförderleistung p_F und die Düsenführungsgeschwindigkeit v_D als freie Parameter zur Beeinflussung der Verteilung des Spritzbetons zur Verfügung stehen. Neben diesen beiden Parametern wird der Materialauftrag bei der Bauteilherstellung durch die Superposition der charakteristischen Materialverteilungen anhand der Startposition der Spritzbahnen, deren Abstand und Anzahl zentral determiniert. Mit der bereits aus dem Entwurf bekannten Sektionierung des Betonbauteils in Schichten i und Zonen j kann die Planung des Materialauftrags unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Ansprüche an die Tragfähigkeit Schicht für Schicht sowie Zone für Zone durchgeführt werden. Dementsprechend kann die Zielfunktion für die optimale Materialverteilung innerhalb einer Zone aus der Gleich-

spondingly, the objective function for optimizing the material distribution in a zone can be obtained from the uniformity of the layer thickness of this zone $G_{S,i,j}$ and the uniformity of the layer thicknesses of the adjacent left zone $G_{S,i,j-1}$ and right zone $G_{S,i,j+1}$ and formed as follows:

$$J = [G_{S,i,j} \quad e_{S,i,j,\min} \quad G_{S,i,j-1} \quad e_{S,i,j-1,\min} \quad G_{S,i,j+1} \quad e_{S,i,j+1,\min}]^T$$

For the optimization, the absolute minimum error $e_{S,i,j,\min} = ||\min (S_{S,i,j}(x,y) - S_{soll,i,j}(x,y))||$ of the target layer $S_{soll,i,j}(x,y)$ from the applied layer $S_{S,i,j}(x,y)$ is integrated in the objective function of the optimisation algorithm. The weighting of the minimum error enables, for example, the guarantee of a specific minimum concrete thickness for the reinforcement's complete embedding [12]. The result of the material application's optimi-

mäßigkeit der Schichtdicke dieser Zone $G_{s,i,j}$ sowie der Gleichmäßigkeit der Schichtdicken der benachbarten linken $G_{s,i,j-1}$ und rechten Zone $G_{s,i,j+1}$ wie folgt gebildet werden:

$$J = [G_{s,i,j} \quad e_{s,i,j,\min} \quad G_{s,i,j-1} \quad e_{s,i,j-1,\min} \quad G_{s,i,j+1} \quad e_{s,i,j+1,\min}]^T$$

Dabei wird der absolute minimale Fehler $e_{s,i,j,\min} = ||\min(S_{s,i,j,(x,y)} - S_{\text{soll},i,j,(x,y)})||$ der Sollschicht $S_{\text{soll},i,j,(x,y)}$ von der applizierten Schicht $S_{r,i,j,(x,y)}$ in die Zielfunktion des Optimierungsalgorithmus integriert. Durch die Gewichtung des minimalen Fehlers kann beispielsweise gezielt eine Mindestbetondicke für die vollständige Einbettung der Bewehrung sichergestellt werden [12]. Exemplarisch ist das Ergebnis der Optimierung des Materialauftrags in Bild 13 für eine beispielhafte Schicht mit drei Zonen dargestellt. Zonen, die für die Tragfähigkeit des Bauteils entscheidend sind, werden möglichst zuerst mit der Basismischung MI gefüllt. Übergangsbereiche zwischen verschiedenen beanspruchten Zonen können durch Gewichtungsfaktoren in der Zielfunktion des Optimierungsalgorithmus eingestellt werden. Somit werden Zonen mit höheren Ansprüchen an die Tragfähigkeit vollständig mit dem vorgeschriebenen Material ausgefüllt, bei niedrigsten Zonen wirken sich Abweichungen nicht nachteilig auf die Tragfähigkeit aus und werden in Grenzen toleriert. Anschließend werden die äußeren Zonen mit der leichten Basismischung MII materialisiert, um das Gradientenlayout der Schicht zu vervollständigen.

Die aus der Planung und Optimierung des Materialauftrags resultierenden Prozessdaten liefern die Grundlage zur Trajektoriengenerierung für die Komponenten der Betonverfahrenstechnik und des Manipulators. Unter Berücksichtigung

sation is shown in Figure 13, by the example of a three-zone layer. Zones that are decisive for the load-bearing capacity of the component are possibly filled first with the basic mixture MI. Transition areas between different stressed zones can be adjusted purposefully through weighting factors in the objective function of the optimisation algorithm. Thus, zones with higher requirements on the load-bearing are completely filled with the specified material; in the case of weak zones, deviations do not adversely affect the load-bearing capacity and are tolerated within limits. Afterwards, the outer zones are materialized by using the lightweight basic mixture MII to complete the layer's graded layout.

The process data resulting from the planning and optimisation of the material application provide the basis for generating trajectories for the concrete technology and for the manipulator. With regard to the time delays and the dynamics of the mixing, dosing and conveying process, the manipulator's trajectories are synchronised with those of the concrete technology [12]. The mass flows of the concretes are adjusted according to these target trajectories. The nozzle's predefined guiding- and self-motion are realised by the manipulator. After applying a layer, it is measured by a laser distance sensor, while the rebound of the shotcrete conglomerates is removed by suction. The measured shotcrete surface is then used for planning the material application of the following layer, in this way, possible disturbances in the production process can be compensated. A detailed description of the process steps for producing components can be found in [12].



Bild 13: Optimierte Materialverteilung für eine beispielhafte Schicht eines Layouts | Fig. 13: Optimized material application for an exemplary layer

der Zeitverzögerungen und der Dynamik des Misch-, Dosier- und Förderprozesses werden die Trajektorien des Manipulators mit denen der Betonverfahrenstechnik synchronisiert [12]. Entsprechend diesen Solltrajektorien werden die Massenströme der Betone eingestellt. Die vorgegebene Düsenführungs- und Düseneigenbewegung wird durch den Manipulator realisiert. Nach der Applikation einer Schicht wird diese mittels eines Laserdistanzsensors vermessen, gleichzeitig wird der Rückprall der Spritzbetonkonglomerate durch die Absaugung entfernt. Die vermessene Spritzbetonoberfläche wird anschließend der Planung des Materialauftrags der folgenden Schicht übergeben, sodass mögliche Störungen im Produktionsprozess kompensiert werden können. Eine detaillierte Beschreibung der Prozessschritte zur Bauteilherstellung findet sich in [12].

5 Experimentelle Validierung des erweiterten Gesamtprozesses zu Entwurf und Herstellung mikrograder Betonbauteile

5.1 Bauteilentwurf und Herstellung (ILEK, ISYS, IWB)

Analog zum Vorgängerprojekt wurden im Rahmen dieses Projekts Bauteilversuche an skalierten Probekörpern (Länge $l = 120$ cm, Breite und Höhe $b = h = 10$ cm) durchgeführt, um die erweiterte Gradientenbetontechnologie vergleichend bewerten zu können. Dies erfolgte an drei exemplarischen Materialverteilungen (Bild 14). Es wurden ein Referenzlayout (RL) mit homogener Materialverteilung, eine abgestufte Gradierung auf Basis der inneren Schnittkräfte (KL = Kammerlayout) und das zuvor entworfene Layout auf Basis der Topologieoptimierung unter Berücksichtigung der Herstellungsrestriktionen der automatisierten Gradiententrockensprüh-technik (TL = Topologielayout) gewählt. Als Bewehrung kamen Stahlstäbe, Glasfaserstäbe, Basaltfaserstäbe, Glasfasergelege und Carbonfasergelege zum Einsatz.

Auf Basis des vorgestellten schematischen Ablaufs zur Prozesssteuerung und -regelung wer-

5 Experimental validation of the advanced process for the design and production of micro graded concrete components

5.1 Component design and production (ILEK, ISYS, IWB)

Analogous to the previous project, experimental component tests were carried out on scaled test specimens (length $l = 120$ cm, width $b = 10$ cm and height $h = 10$ cm) to comparatively evaluate the advanced technology of graded concrete. This was conducted by using three layouts as examples and their consequent material distribution is illustrated in Fig. 14. A reference layout (RL) was selected that is characterised by a homogeneous material distribution, a segmented gradation based on the internal forces (KL = segmented layout) and the previously designed layout that results upon the topology optimisation while considering production-related restrictions of the automated graded dry-spraying technique (TL = topological layout). Steel, glass-fibre and basalt-fibre rebars, as well as planar textile reinforcements made of carbon or glass fibres, are used as reinforcement.

On the basis of the presented schematic procedure for process control, the designed graded layouts are manufactured by the advanced production system. The exemplary use of the topological layout in Fig. 15, compares the target distribution of the material with the actually produced and measured layer structures. It illustrates that the developed automated process enables the planning and reproducible production of graded components with complex material distribution in accordance with the specified requirements. The transition areas between the zones and the border of the formwork could also be carried out as designed by the developed process [12].

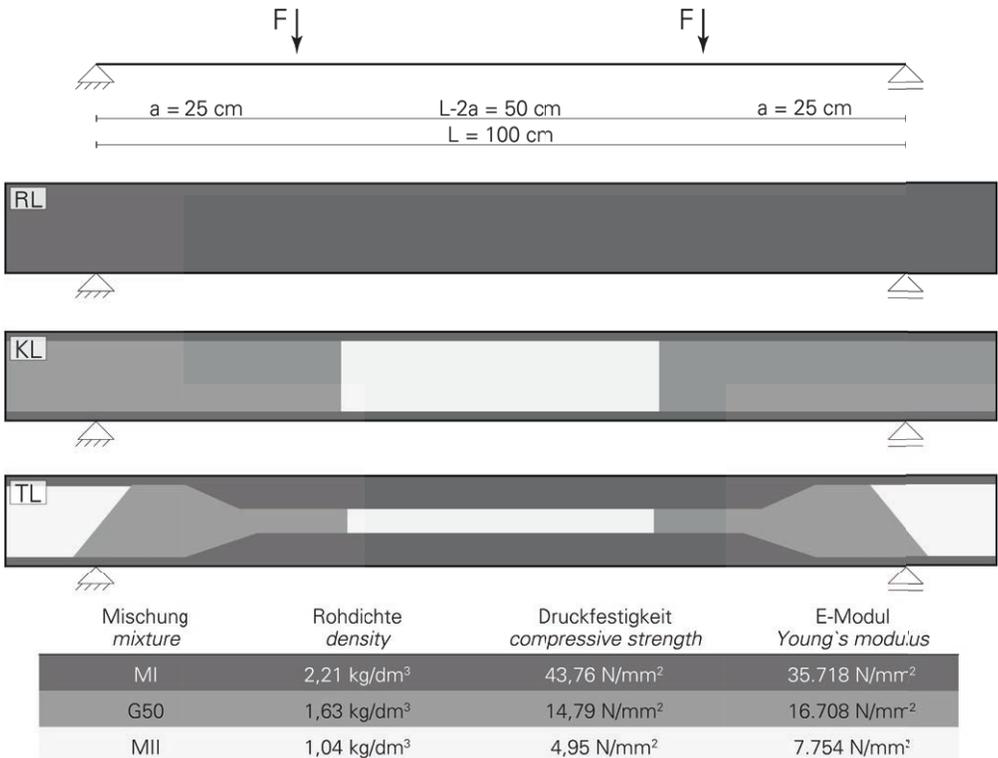


Bild 14: Materialverteilung der untersuchten Probekörper | Fig. 14: Material distribution of the test specimens

den die entworfenen Gradientenlayouts mit der weiterentwickelten Herstellungsplattform gefertigt. Bild 15 stellt beispielhaft für das Topologielayout die Soll-Materialverteilung des Entwurfs den tatsächlich hergestellten und vermessenen Schichtstrukturen gegenüber. Daraus ist ersichtlich, dass mit dem entwickelten Gesamtprozess gradierte Bauteile mit komplexer Materialverteilung sowohl planbar sind, als auch reproduzierbar hergestellt werden können. Auch die Übergangsbereiche zwischen den Zonen und die Randbereiche an der Schalung konnten durch den entwickelten Prozess entwerfungsgemäß ausgeführt werden [12].

5.2 Bauteilprüfung (ILEK)

Das Potential der erweiterten Gradientenbontentechnologie soll im Folgenden anhand der drei entworfenen Layouts exemplarisch für die

5.2 Component testing (ILEK)

By using the three designed layouts with steel reinforcement as examples, the potential of the advanced technology of graded concrete is illustrated in the following. During the testing, all test specimens reach the design value and exhibit the typical force-displacement behaviour at the point of bending failure (Fig. 16). The load-bearing performance of the graded test specimens differ notably in the linear-elastic state of force displacement compared to a component with a solid full cross-section.

As a result of the gradation, and owing to the lower Young's modulus of the graded concretes, the elastic cross-sectional stiffness is reduced. The outcome is a lower degree of stiffness in state I at reduced cracking load. Moreover, it is evident that the stiffness-based optimisation

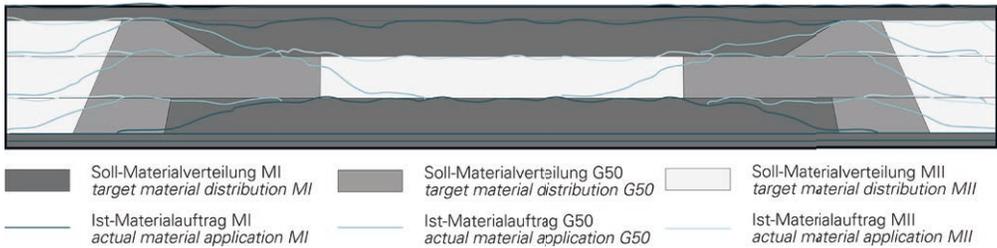


Bild 15: Gegenüberstellung von Soll-Materialverteilung und gemessenem Schichtauftrag der Versuchsserie TL | **Fig. 15:** Comparison of the target material distribution with the measured material application from a test specimen of the series TL

stabstahlbewehrten Probekörper verdeutlicht werden. Alle Probekörper erreichen im Versuch den dimensionierten Bemessungswert und zeigen das typische Kraft-Verformungsverhalten bei Biegeversagen (Bild 16). Das Tragverhalten der gradierten Probekörper unterscheidet sich im Vergleich zu einem Bauteil mit massivem Vollquerschnitt vor allem im linear-elastischen Bereich der Kraft-Verformungsbeziehung.

Durch die Gradierung wird die elastische Biegesteifigkeit aufgrund des niedrigeren E-Moduls der gradierten Betone reduziert, was zu einer früheren Erstrissbildung führt. Zudem ist zu

process has led to a positive improvement regarding the force-displacement behaviour of the graded test-specimen series TL, compared to the KL test series. This is reflected in the lower deformation at the same load level. However, this improvement entails a lower mass reduction at 17% compared to the segmented layout of 22% in relation to the reference layout. Upon reaching the first crack load $F_{c,cr}$, the test specimens show a qualitatively uniform force-displacement progression in all test series, with only a slight deviation of the maximum test force at the end of the test.

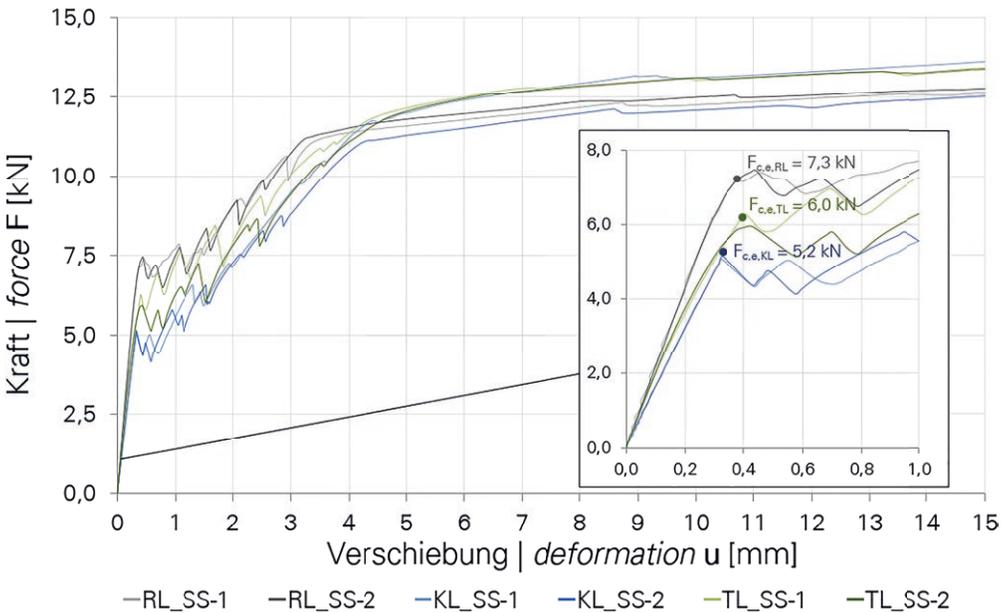


Bild 16: Kraft-Verformungsdiagramm der stabstahlbewehrten Versuchsserie RL_{SS} (grau), KL_{SS} (blau) und TL_{SS} (grün) | **Fig. 16:** Force-displacement diagram of the steel reinforced test series RL_{SS} (grey), KL_{SS} (blue) and TL_{SS} (green)

Versuchsserie Test series	RL _{SS}	KL _{SS}	TL _{SS}
Erststrisslast First crack force $F_{c,e}$ [kN]	7,29	5,24	6,04
Prüfkraft Load at failure F_{max} [kN]	13,22	13,67	13,73
Max. Moment Moment at failure M_{dV} [kNm]	1,65	1,71	1,71
Versagensart Failure mode	Biegeversagen Bending failure		
Probekörpermasse Specimen's mass m_{ist} [kg]	27,8	21,7 (-22 %)	23,2 (-17 %)

Tabelle 1: Gemittelte Prüfergebnisse der stabstahlbewehrten Versuchsserie RL_{SS}, KL_{SS} und TL_{SS} | **Table 1:** Mean values of the experimental test results of the steel reinforced test series RL_{SS}, KL_{SS} and TL_{SS}

erkennen, sich das Kraft-Verformungsverhalten der gradierten Probekörperserie TL gegenüber der Versuchsserie KL verbessert hat. Dies zeigt sich in der geringeren Verformung bei gleichem Lastniveau. Allerdings geht die Verbesserung mit einer geringeren Masseneinsparung von 17 % im Vergleich zum Kammerlayout mit 22 % bezogen auf das Referenzlayout einher. Nach Erreichen der Erststrisslast $F_{c,e}$ weisen die Probekörper in allen Versuchsserien einen qualitativ einheitlichen Kraft-Verformungsverlauf bei nur geringfügiger Abweichung der maximalen Prüfkraft am Versuchsende auf (Tabelle 1).

5.3 Ökologische Bilanzierung (ILEK)

Im Rahmen einer ganzheitlichen Bilanzierung wurden die ökologischen Vorteile der Gradientenbetontechnologie am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart, in Zusammenarbeit mit dem ILEK untersucht. Dabei wurde die direkte Massenreduktion in ökologische Wirkungskategorien überführt, die von den verwendeten Betonmischungen, dem Bauteilentwurf und dem Herstellungsverfahren beeinflusst werden. Am Beispiel eines automatisiert hergestellten, gradierten Deckenstreifens (5,0 × 1,0 × 0,2 m) wurde die Technologie exemplarisch bilanziert und mit einem konventionellen Betonfertigbauteil gleicher Geometrie verglichen. Das entworfene und simulativ hergestellte Bauteil aus Gradientenbeton besitzt in allen untersuchten Kategorien Vorteile gegenüber der konventionellen Referenzdecke. Neben der primären Massensparnis von rund 30 % kann der Bedarf an Bewehrungsstahl zusätzlich um etwa 10 % reduziert werden. In der Wirkungskategorie des Treibhauspotentials (GWP) liegen die Einsparungen bei rund 7 %. Dieses Potential

5.3 Ecological assessment (ILEK)

The ecological advantages of the technology of graded concrete were investigated at the Department of Life Cycle Engineering at the Fraunhofer Institute for Building Physics in cooperation with the University of Stuttgart's Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK). In this regard, the direct mass reduction was converted into ecological impact categories, which are influenced by the concrete mixtures used, the component design and the production technique. By taking the example of an automatically produced, graded floor slab (5.0 m × 1.0 m × 0.2 m), the technology was assessed and compared to a conventional precast concrete component with the same functional features. The designed and simulative produced component made out of graded concrete, possesses advantages in all examined categories over the conventional reference slab. Besides the primary mass reduction of around 30%, the required amount of reinforcing steel can be reduced by an additional 10%. Reductions in the impact category of global warming potential (GWP) amounts to about 7%. This potential has not yet been fully exploited and can be further increased by optimising the base mixtures and ensuring that production plants are supplied with sustainable energy. These results indicate that the developed technology of graded concrete already exhibits great ecological and economic potential, which can be developed further. Secondary reduction effects resulting from a weight reduction of load-transferring elements such as walls and supports have not yet been taken into consideration.

ist derzeit noch nicht vollständig ausgeschöpft und kann durch die Optimierung der Basismischungen sowie eine nachhaltige energetische Versorgung der Produktionsanlage gesteigert werden. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die entwickelte Gradientenbetontechnologie bereits ein hohes ökologisches und ökonomisches Potential besitzt, das zudem weiter ausgebaut werden kann. Sekundäre Einspareffekte infolge einer Gewichtsreduktion der lastweiterleitenden Elemente wie Wände und Stützen sind hierbei noch unberücksichtigt.

6. Entwicklung der Mesogradierung von Betonbauteilen

6.1 Herstellung von mineralischen Hohlkugeln (ILEK, ISYS, IWB)

Bei der Mikrogradierung ist an jeder Stelle im Bauteil Material zu platzieren, dessen minimale Rohdichte mit dem Trockenspritzverfahren derzeit auf $1,0 \text{ kg/dm}^3$ herabgesetzt werden kann. Dies hat zur Folge, dass in den sehr niedrig beanspruchten Bereichen des Bauteils immer noch eine ineffiziente Materialausnutzung vorliegt. Durch den Einbau von größeren Hohlräumen in das Bauteil kann dieser Problematik begegnet werden. Beispielsweise werden in der Baupraxis zweiachsige Hohlkörperdecken auf Grundlage dieses Ansatzes realisiert [15]. Die dort verwendeten Kunststoffhohlkörper ermöglichen jedoch keine Gradierung und sind zudem in ihrer Rezyklierfähigkeit als kritisch zu bewerten. Diese Aspekte führten zur Erforschung von Herstellungsansätzen für mineralische Hohlkörper unterschiedlicher Form und Größe.

Zur Herstellung dünnwandiger, mineralischer Hohlkörper wurden Verfahren aus materialübergreifenden Bereichen innerhalb des Projekts analysiert [16]. Als besonders vielversprechend sind Beschichtungs-, Press- und Rotationsverfahren zu bewerten, mit denen Hohlkörper erfolgreich hergestellt werden konnten (Bild 17). Beim Beschichtungsverfahren [17] wurde ein verllorener Kern, hier ein Rezyklat aus Mineralwolle, in einem Tauchbadver-

6 Development of meso graded concrete components

6.1 Production of mineral hollow spheres (ILEK, ISYS, IWB)

In the case of the micro graded concrete, material has to be placed at every point within the component, of which the material is currently reducible to a minimum bulk density of 1.0 kg/dm^3 by dry spraying. As a result, the material used in the component zones that are subjected to very low stress is inefficiently utilised. This problem can be counteracted by integrating hollow bodies into the component. For instance, in construction practice, so-called bubble decks are realised on the basis of this approach [15]. However, the plastic hollow bodies used there do not allow for gradation and must be critically assessed regarding to their recyclability. These reasons have led to the development of production methods for mineral hollow bodies in varying shape and size.

Within the project, different methods for the production [16] of hollow bodies were analysed and transferred to the manufacture of thin-walled, mineral hollow bodies [16]. Coating, pressing and rotation processes with which hollow bodies could be successfully produced are particularly promising (Fig. 17). In the coating process, a lost core – in the form of a recycle of mineral wool – is coated with a concrete slurry in a procedure involving an immersion bath and is thereby sealed [17]. In the case of the pressing method, hemispherical shells with defined wall thicknesses could be produced by pressure forming [18]. First, a defined quantity of concrete slurry is filled into a negative mould; then a stamp is lowered, forming an annular gap in the desired wall thickness in which the flowable concrete is distributed. In a further process step, two cured spherical shells are joined, creating hollow spheres of uniform size and wall thickness. In the rotational-moulding procedure, a mould containing the raw material is subjected to biaxial rotation, so that the liquid-state material can be evenly distributed [19], [20]. Translating this method



Bild 17: Prototypen von mineralischen Hohlkörpern, hergestellt (von links nach rechts) im Beschichtungs-, Press- und Rotationsverfahren | **Fig. 17:** Prototypes of concrete hollow spheres produced by coating, pressing and rotating (from left to right)

fahren mit einer Betonsuspension umhüllt und dadurch abgedichtet. Mit dem Pressverfahren [18] konnten Halbkugelschalen mit definierten Wandstärken durch Druckumformung erzielt werden. Hierbei wurde eine definierte Menge einer Betonsuspension in eine Negativform gefüllt. Durch Absenken eines Stempels bildete sich ein Ringspalt entsprechend der gewünschten Wandstärke, in dem sich der fließfähige Beton verteilte. Zwei ausgehärtete Halbschalen wurden dann in einem weiteren Prozessschritt gefügt, wodurch Hohlkugeln mit gleichmäßiger Größe und Wandstärke entstanden. Beim Rotationsverfahren wurde eine Form mit dem zuvor eingefüllten Ausgangsstoff in eine biaxiale Rotation versetzt, sodass sich das im flüssigen Zustand befindliche Material gleichmäßig verteilen konnte [19], [20]. Übertragen auf die Herstellung von Betonhohlkugeln musste die Betonsuspension eine entsprechende Konsistenz für eine gleichmäßige Verteilung des Materials besitzen und während des Rotationsvorganges schnellstmöglich erstarren. Durch eine gezielte Rezepturanpassung des Betons ist es mit dieser Methode möglich, Hohlkugeln unterschiedlichen Durchmessers mit Wandstärken von lediglich 1 bis 4 mm zu realisieren.

Letztgenanntes Verfahren stellte sich aufgrund der wenigen Prozessschritte, der Möglichkeit vielfältiger Formgebung sowie der hohen Qualität der Hohlkörper als das zielführende Verfahren heraus. Der Rotationsprozess wurde daher mittels einer Zentrifuge inklusive Formhalterung automatisiert (Bild 18), um mineralische Hohlkörper in großer Anzahl und in gleichbleibender Güte herzustellen. Die Zentrifuge besteht aus einem äußeren und einem inneren

to the production of mineral hollow spheres, it needs to be ensured that the concrete slurry possesses a suitable consistency to enable an even distribution of the material and the quickest-possible solidification during the rotational process. A targeted adjustment of the concrete formulation, enables with this approach the realisation of hollow spheres with different diameters and wall thicknesses of no more than 1 mm to 4 mm.

The latter approach is best suited for automated production due to its reduced process steps, the possibility of varied shaping and the high quality of the hollow bodies. It turns out, that the rotational process is the most effective due to the small number of process steps, the possibility of a variety of shapes and the high quality of the hollow bodies. Therefore, this process was automated by means of a centrifuge including mould holder (Fig. 18) in order to produce a large number of mineral hollow bodies of constant quality. The centrifuge consists of an outer and inner frame, of which rotation can independently be controlled by an individual servomotor with absolute encoders. The mould holder in the inner frame is used to fix the formwork and submit the latter to biaxial rotation. The distribution of the liquid concrete slurry in the formwork is ensured by rotational speeds of up to 50 Hz. The mould holder is designed to be variably adjustable, thus enabling the use of formwork systems with sizes of up to 300 mm × 300 mm. As a result, the size of the formwork system is designed to be variably adjustable, thereby enabling, the production of individual large-scale hollow bodies or large quantities of smaller hollow bodies with

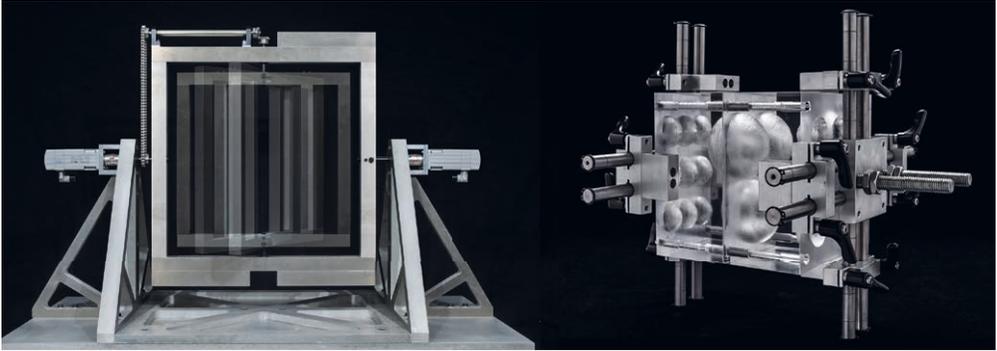


Bild 18: Zentrifuge und Schalungsblock zur automatisierten Herstellung mineralischer Hohlkörper | **Fig. 18:** Zentrifuge and formwork system for the automated production of mineral hollow parts

Rahmen, welche durch je einen Servomotor mit Absolut-Encoder in ihrer Rotation unabhängig voneinander gesteuert werden können. Mittels der Formhalterung im inneren Rahmen kann der Schalungsblock fixiert und in eine biaxiale Rotation versetzt werden. Durch Rotationsgeschwindigkeiten von bis zu 50 Hz wird die Verteilung der flüssigen Betonsuspension in der Schalung sichergestellt. Die Formhalterung ist variabel verstellbar konzipiert, sodass Schalungsblöcke mit einer Größe von bis zu 300 mm × 300 mm eingesetzt werden können. Dadurch können der Schalungsblock flexibel in seiner Größe ausgeführt und individuelle, großformatige Hohlkörper oder eine Vielzahl kleinerer Hohlkörper mit gleicher Geometrie in einem Rotationsvorgang gefertigt werden.

Der Prozess zur Herstellung der Hohlkörper beginnt mit der Bereitstellung der Betonsuspension, der je nach Anforderung des Hohlkörpers Kurzfasern hinzugefügt werden können. In Abhängigkeit der Größe und der gewünschten Wandstärke des Hohlkörpers wird anschließend eine exakt abgestimmte Betonmenge in eine der Schalungshälften gefüllt. Nach Zusammenfügen der beiden Hälften zum Schalungsblock wird dieser mit der Formhalterung in der Zentrifuge fixiert. Durch ein Prozessleitsystem werden die Rotationsbewegung und die Verweilzeiten auf Basis einer Trajektoriengenerierung zielgerichtet geregelt. Dies garantiert eine vollständige und gleichmäßige Verteilung des Materials in der Schalungsform. Durch die hohen Rotations-

the same geometrical features in a single rotational process.

The process for the production of hollow bodies starts with the preparation of the concrete slurry to which short fibres may be added according to the requirements of the hollow body. Depending on the size and desired wall thickness of the hollow bodies, a precisely adjusted quantity of fresh concrete is then poured into one of the formwork halves. After joining the formwork system together, it is fixed in the centrifuge with the mould holder. A process control system purposefully controls the rotational movement and residence times based on a trajectory generation. This ensures a complete and even distribution of the material in the formwork. Owing to the high rotational speed during the centrifugation, as well as the associated energy input, the solidification of the concrete is delayed. This can be counteracted by successively throttling the speed as soon as the material has been distributed. Accordingly, the accelerator reaction is enabled, and the concrete suspension can solidify. The production time is largely determined by the complexity of the hollow body's shape and the concrete slurry used. Once the concrete hardened, the hollow bodies can be stripped. The research results show that hollow bodies of consistent quality can be produced and that forms the basis for practical use in construction.

geschwindigkeiten beim Zentrifugieren und den damit verbundenen Energieeintrag verzögert sich die Erstarrung des Betons. Dem kann durch eine sukzessive Drosselung der Geschwindigkeit nach der Verteilung des Materials entgegenge-wirkt werden, damit die Reaktion des Beschleunigers stattfinden und die Betonsuspension erstarren kann. Die Produktionszeit wird maßgeblich durch die Komplexität der Hohlkörperform und die verwendete Betonsuspension bestimmt. Nach abschließender Aushärtung des Betons können die Hohlkörper ausgeschalt werden. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass mit diesem Verfahren Hohlkörper gleichbleibender Qualität reproduzierbar hergestellt werden können und die Grundlage für einen baupraktischen Einsatz damit geschaffen ist.

6.2 Entwurfsansatz zur Mesogradierung (ILEK)

Auch bei der Mesogradierung wird im Entwurf das Ziel verfolgt, den Materialeinsatz einer monofunktional lastabtragenden Struktur zu reduzieren. Hierzu muss eine optimierte Verteilung von Hohlkörpern unter Berücksichtigung ihrer Geometrie und Größe bestimmt werden. Ein naheliegender Entwurfsansatz kann aus Stabwerkmodellen [21] abgeleitet werden. Dabei werden die Trajektorien einzelner Spannungsfelder im Bauteil zu resultierenden Druck- und Zugstreben zusammengefasst und entsprechend dimensioniert. Die sich ausbildenden Stabwerke sind vergleichbar mit den Minimalstrukturen von Michell [22] und können als Vorbild herangezogen werden. Idealerweise werden somit die Streben größter Hauptspannung dimensioniert und materialisiert. Die Zwischenräume werden mit Hohlkörpern ausgefüllt. Bei dieser Verteilungsstrategie werden sehr komplexe und sich in ihrer Form nicht wiederholende Hohlkörper im Bauteil notwendig. Dies ist für eine baupraktische Anwendung mit den derzeit zur Verfügung stehenden Herstellungstechniken nur bedingt umsetzbar. Aus diesem Grund beschränken sich die Forschungen derzeit auf die Verwendung von kugelförmigen Hohlkörpern, um ein Gewichtsmilieu mit wiederholbarer Kugelgeometrie und reduzierter Kugelanzahl zu ermöglichen [23].

6.2 Design approach for meso graded concrete components (ILEK)

Also for meso gradation, the aim of the design is to reduce the material consumption of a mono-functional load-bearing structure. For this purpose, an optimised distribution of hollow bodies, must be determined, considering their geometry and size. An obvious design approach can be derived from the so-called strut-and-tie models [21]. The trajectories of individual stress fields within the component are consolidated into resulting struts and ties and correspondingly dimensioned. The resulting lattice structures are comparable to the minimal structures of Michell [22] and can be used as a role model. Ideally, the struts and ties of the largest principal stress are thereby dimensioned and materialised. The gaps are filled with hollow bodies. This distribution strategy requires very complex hollow bodies with non-recurring shapes within the component. For application in practical construction, this can only be implemented to a limited extent with the production techniques currently available. Therefore, current research is restricted to investigating the use of hollow spheres in order to enable a weight minimisation with repeatable sphere geometry and a reduced number of spheres [23].

In order to achieve an optimised distribution of the hollow spheres, they must touch each other, which is not the case with the products currently used in practice. Based on this condition, the arrangement of hollow spheres with maximum mass reduction is found in the theory of the sphere packing [24], [25]. Possible arrangements, and their potentials for mass reduction in concrete components, are explained in detail in [16]. One option is the simple cubic packing of spheres, where the sphere centres are situated on a three-dimensional orthogonal grid with an equivalent node spacing to the sphere diameter (Fig. 19, top). This distribution strategy achieves a weight reduction of 52%, if the sphere diameter is an integer multiple of the component geometry. The material paths formed between the hollow spheres occupy

Um eine optimierte Verteilung von Hohlkugeln zu erreichen, müssen sich diese untereinander berühren, was bei den derzeit in der Praxis eingesetzten Produkten nicht verfolgt wird. Wird dies aber als Voraussetzung definiert, findet man die Anordnung der Hohlkugeln mit maximaler Masseneinsparung mit Hilfe der Theorie der dichtesten Kugelpackungen [24], [25]. Mögliche Anordnungen und deren Masseneinsparpotential bei Betonbauteilen sind in [16] ausführlicher erläutert. Eine Möglichkeit besteht in der kubisch primitiven Anordnung der Kugeln, bei der die Kugelmittelpunkte auf den Knotenpunkten eines dreidimensionalen orthogonalen Gitters liegen. Der Abstand der Knotenpunkte ist dabei äquivalent zum Kugeldurchmesser. Mit dieser Verteilungsstrategie ist eine Gewichtsreduktion von 52 % möglich, wenn der Kugeldurchmesser einem ganzzahligen Vielfachen der Bauteilgeometrie entspricht (Bild 19, oben). Die sich zwischen den Hohlkugeln bildenden Materialpfade nehmen die Form eines Vierendeelträgers (linear) oder eines Trägerrostes (flächig) ein. Eine Reduktion des Kugeldurchmessers und damit die Anordnung von mehreren kleineren Kugeln innerhalb des Bauteils haben bei der kubisch primitiven Packung keinen Einfluss auf die Gewichtsreduktion. Sie bewirkt lediglich eine veränderte Materialverteilung innerhalb des Bauteils. Eine Steigerung des Hohlraumvolumens kann zunächst durch eine Änderung der Kugelanordnung erreicht werden. Die Verwendung der dichtesten Kugelpackung, bei der eine Kugel 12 weitere Kugeln berührt, führt maximal zu einer 74%igen Massenreduktion des Bauteils. Die lastabtragende Struktur zwischen den Hohlkugeln nimmt dabei die Form eines räumlichen Stabwerks mit veränderlichen Querschnitten ein. Die zwischen den gepackten Hohlkugeln befindlichen Lücken können zur weiteren Massenreduktion wiederum mit Kugeln immer kleineren Durchmessers gefüllt werden (Bild 19, unten). Dies führt konsequenterweise zur Theorie der Sieblinie. Ausgehend von den Untersuchungen von Fuller und Thompsen [26] ist somit ein theoretisches Hohlraumvolumen von über 90 % erzielbar [23].

the bearing structure of a Vierendeel girder (linear) or grid (planar). A reduction of the sphere diameter and thus the arrangement of several smaller spheres within the component have no influence on the weight reduction in simple cubic packing. It only changes the material distribution within the component. An increase in the cavity volume can initially be achieved by changing the sphere arrangement. The use of the closest sphere packing, in which one sphere touches 12 other spheres, leads at most to a 74% mass reduction of the component. In this regard, the load-bearing structure between the hollow spheres takes the form of a spatial framework with variable cross sections. The gaps between the packing spheres can be filled with spheres of increasingly smaller diameters for further mass reduction (Fig. 19, down). Consequently, this leads to the theory of the grading curve. Following the research by Fuller and Thompsen [26], a theoretical void content of more than 90% is achievable [23].

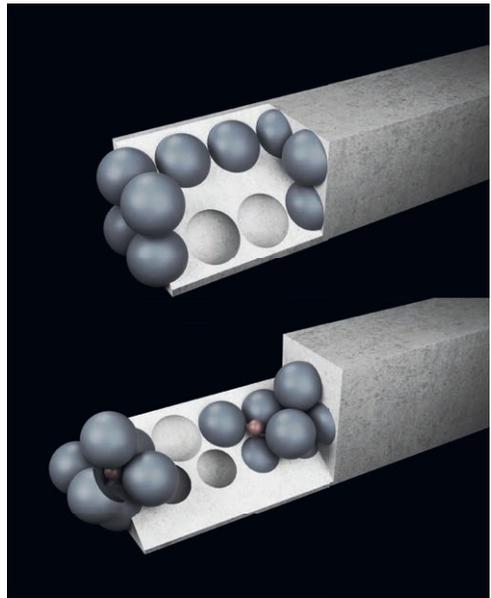


Bild 19: Kubisch primitive Kugelpackung (oben) und dichteste Kugelpackung mit Füllung der Tetraederlücken durch weitere Kugeln (unten) | **Fig. 19:** Simple cubic packing of spheres (top) and face centred packing of spheres with additional spheres placed inside the tetrahedral gaps (down)

6.3 Ansätze zur Herstellung mesogradierter Betonbauteile (ISYS, ILEK)

Die zielgenaue Positionierung der Hohlkugeln sowie deren Lage- und Auftriebssicherheit stellen eine große Herausforderung bei der Bauteilherstellung dar. In der baupraktischen Umsetzung herkömmlicher zweiachsiger Hohlkörperdecken werden die Hohlkörper zwischen zusätzlichen Bewehrungslagen zur Gewährleistung der Auftriebssicherheit eingebaut. Das Bauteil wird dann in mehreren Lagen betoniert [27]. Beim Nachweis der Tragfähigkeit dieser Systeme darf die Bewehrung zur Auftriebssicherheit nicht angesetzt werden. Zusätzlich müssen die infolge des Betonageverfahrens entstehenden Verbundfugen berücksichtigt werden [15].

Um diesen Aspekten zu begegnen, wurden im Projekt neue Ansätze für den Herstellungsprozess von Bauteilen mit integrierten Hohlkörpern erarbeitet. Ein Herstellungsansatz besteht in dem Einbau eines vorgefertigten Systems aus Hohlkörpern und Bewehrung unter Verwendung eines selbstverdichtenden und rasch erstarrenden Betons. Der Volumenstrom beim Betonieren ist auf das Erstarrungsverhalten des Betons so abgestimmt, dass das zunehmende Konstruktionseigengewicht gegenüber der steigenden Auftriebskraft stets überwiegt. Eine in der Haftfläche zwischen Kugel und Beton entstehende Zugkraft darf dabei die Adhäsion

6.3 Production approaches for meso graded concrete components (ISYS; ILEK)

Ensuring the precise placement of the hollow spheres as well as their positional and flotation stability, represents a major challenge in the production of these components. In the practical implementation of bubble decks, the hollow bodies are placed between additional reinforcement layers for flotation stability and the component is casted in two layers [27]. When verifying the load-bearing capacity of these systems, the additional reinforcement for flotation stability must not be assessed. Additionally, due to the casting method, the bond between the layers must be checked [15].

To cover these aspects, new approaches were developed in the project for the production process of components with integrated hollow bodies. One production approach consists of the integration of a prefabricated system of hollow bodies and reinforcement, using self-compacting and rapidly solidifying concrete. Therefore, the volume flow during the casting process must be adjusted to the solidification behaviour, while ensuring that the increasing dead weight of the construction outweighs the rising flotation force. A tensile force generated in the bonding area between sphere and concrete must not exceed the adhesive force between hollow body and fresh concrete. This is ensured by concrete technology through the timely addition

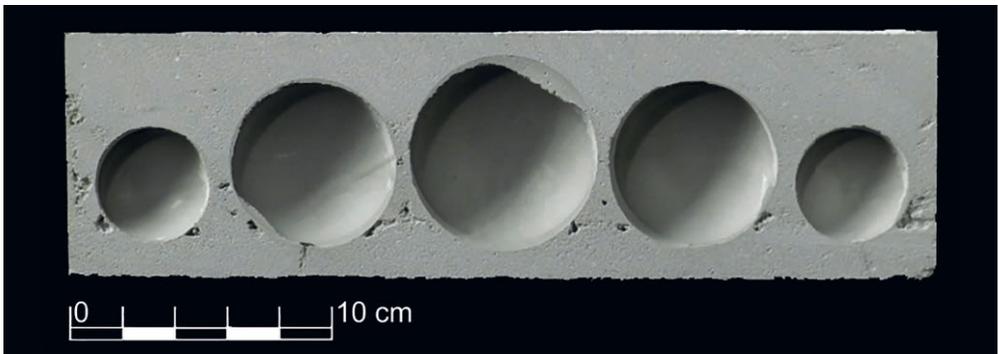


Bild 20: Prototypischer Probekörper eines automatisiert hergestellten Bauteils mit Hohlkugeln | Fig. 20: Prototype of a concrete component with hollow spheres produced in an automated spraying process

onskraft zwischen Hohlkörper und Frischbeton nicht überschreiten. Dies wird betontechnologisch durch die zeitlich abgestimmte Zugabe von Erstarrungsbeschleuniger sichergestellt. Weitere Untersuchungen zur Herstellung zeigten ein hohes Potential bei der robotischen Platzierung der Hohlkugeln in die frische Betonstruktur während des Spritzprozesses. Bild 20 zeigt ein Muster, das mit der Herstellungsplattform im Trockenspritzverfahren gefertigt wurde. Dargestellt ist sowohl die Soll- als auch die Ist-Lage der Hohlkugeln im Bauteil. Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass Lage- und Auftriebssicherheit während des schichtweisen Herstellungsprozesses eingehalten wurden. Lediglich unterhalb der Kugeln sind kleine Lunkerbildungen zu erkennen, die durch eine detaillierte Analyse des Verfahrens und eine entsprechende Adaption der Applikationstechnik behoben werden können. Beispielsweise kann durch die Änderung der Düsenorientierung zur Auftragsfläche zielgerichtet Material unterhalb der Kugeln platziert werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Gradierte Betonbauteile, deren Bauteilinnenraum an die vorherrschenden statischen und/oder bauphysikalischen Beanspruchungen angepasst ist, stellen einen innovativen Ansatz zur Herstellung von gewichtsreduzierten, multifunktionalen und vollständig rezyklierbaren Bauteilen dar. Von den Ergebnissen des SPP-Projekts *Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen* ausgehend wurden im Rahmen der Forschungsarbeiten die Schnittstellen von Betontechnologie, Entwurf sowie automatisierter Fertigung systematisch ausgearbeitet und die Teilaspekte in einen ganzheitlichen Prozess überführt. Damit wird es erstmals möglich, mikrogradierte Betonbauteile unter Berücksichtigung von materialspezifischen und verfahrenstechnischen Randbedingungen zu entwerfen. Dieser digitale Fertigungsplan erlaubt durch die weiterentwickelte automatisierte Herstellungsplattform inklusive Prozessleitsystem die zielgenaue Produktion der Bauteile. Die Analysen der empirischen Ergeb-

tion of accelerator. Further production-related research indicated a high potential in the robotic placement of hollow spheres in the fresh concrete structure during the spraying process. Fig. 20 illustrates the result of a prototype production through dry spraying. Both the target and the actual position of the hollow spheres in the component are shown. The comparison makes it clear that position and floatation safety were maintained during the layer wise spraying process. Small unwanted blowholes are only visible below the spheres; they can be remedied through a detailed investigation of the process and the corresponding adaptation of the application technology. For example, by changing the nozzle orientation towards the application area, material can purposefully be placed underneath the spheres.

7 Summary and outlook

Graded concrete components represent an innovative approach for the production of weight-reduced, multi-functional and completely recyclable components due to the stress-based design of their interior structures in accordance with the prevailing static and/or construction-related requirement profiles. Based on the results of the project *Optimal Structures made out of Functionally Graded Concrete Components*, the interfaces between concrete technology, design methods and automated production techniques were systematically researched, and sub-aspects translated into an overall process. This makes it possible for the first time to design graded concrete components taking into account material-specific and process-engineering boundary conditions. This digital production strategy allows the targeted production of components through the advanced automated production system that includes the process control system. The analyses of the empirical results demonstrate that mass reductions of well over 20% are achievable. Further research was conducted into the foundations of a new scale level, the so-called macro gradation. The mineral hollow bodies required for this purpose can be automatical-

nisse zeigen, dass Masseneinsparungen von weit über 20 % erreicht werden können. Des Weiteren konnten die Grundlagen für eine neue Maßstabsebene – die sogenannte Mesogradierung – erforscht werden. Die hierfür eigens entwickelten mineralischen Hohlkörper können durch mit Hilfe einer Zentrifuge automatisiert hergestellt werden. Die Hohlkugeln führen bei entsprechender Verteilung im Bauteil zu einer weiteren Steigerung der Massenreduktion.

Die zukünftigen Forschungen im Bereich des Gradientenbetons zielen auf die systematische und ganzheitliche Weiterentwicklung der Technologie ab. Dabei nehmen die Funktionsintegration und Multifunktionalität gradierter Betonbauteile eine zentrale Rolle ein. Auf tragstruktureller Ebene sollen einerseits der Entwurf und die Herstellung von Betonbauteilen mit Mesogradierung abschließend erforscht werden. Andererseits wird an der Integration einer beanspruchungsgerechten Bewehrungsführung sowohl im Entwurf als auch im Herstellungsprozess gearbeitet.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 257610789 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

ly produced by the realised centrifuge. Subject to the appropriate material distribution in the component, the resulting hollow spheres can lead to a further increase in the component's mass reduction.

Prospective research in the field of graded concrete must aim at the systematic and holistic further development of the technology. In this regard, the integration of functions and the multi-functionality of graded concrete components play a key role in fully exploiting the potential of the technology. On the one hand, at the level relevant to the bearing structure, conclusive research is planned with regard to the design and production of macro graded concrete components. On the other hand, research is required in terms of the integration of a stress oriented reinforcement layout, both in the design and the production process.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (number 257610789) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Sobek, W.: Die Zukunft des Leichtbaus: Herausforderungen und mögliche Entwicklungen. Bautechnik 92 (2015) 12, S. 879–882 – DOI: 10.1002/bate.201500093
- [2] Bever, M. B.; Duwez, P. E.: Gradients in composite materials. Materials Science and Engineering 10 (1972) 1, S. 1–8 – DOI: 10.1016/0025-5416(72)90059-6
- [3] Rödel, J.: Verfahren zur Herstellung von Gradientenwerkstoffen. Patent DE 44 35 146 A1, 4.4.1996
- [4] Dassault Systèmes Simulia Corp.: Analysis of concrete structures with Abaqus. Providence, RI, 2009
- [5] Lubliner, J.; Oliver, J.; Oller, S.; Oñate, E.: A plastic-damage model for concrete. International Journal of Solids and Structures 25 (1989) 3, S. 299–326 – DOI: 10.1016/0020-7683(89)90050-4
- [6] Lee, J. H.; Fenves, G. L.: Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. Journal of Engineering Mechanics ASCE 124 (1998) 8, S. 892–900 – DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892)
- [7] Mark, P.: Zweiachsig durch Biegung und Querkraft beanspruchte Stahlbetonträger. Habilitationsschrift, Ruhr-Universität Bochum, 2006
- [8] Dassault Systèmes Simulia Corp.: Abaqus Analysis User's Manual, Vol. 3: Materials. Providence, RI, 2014
- [9] Jesse, F.: Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix. Diss., TU Dresden, 2004
- [10] Herrmann, M.: Gradientenbeton – Untersuchungen zur Gewichtsoptimierung einachsiger biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile. Diss., Universität Stuttgart, 2015
- [11] Wörner, M.; Schmeer, D.; Schuler, B.; Pfänder, J.; Garrecht, H.; Sawodny, O.; Sobek, W.: Gradientenbetontechnologie: von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 794–805 – DOI: 10.1002/best.201600056
- [12] Wörner, M.: Automatisierte Herstellung funktional gradierter Betonbauteile. Diss., Universität Stuttgart, 2017
- [13] MathWorks Inc.: MATLAB Documentation. 29th printing. Natick, MA, 2017
- [14] Wörner, M.; Schmeer, D.; Schuler, B.; Sawodny, O.; Sobek, W.: The technology of graded concrete – Interface between design and manufacturing. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9601, Book of Abstracts: S. 153, Langfassung auf USB-Stick: 8 S.
- [15] Albert, A.; Pfeffer, K.; Schnell, J.: Hohlkörperdecken. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, H.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2017, Bd. 2, Berlin: Ernst & Sohn, 2017, S. 519–549 – DOI: 10.1002/9783433606803.ch10
- [16] Schmeer, D.; Sobek, W.: Weight-optimized and mono-material concrete components by the integration of mineralized hollow spheres. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9600, Book of Abstracts: S. 152, Langfassung auf USB-Stick: 9 S.
- [17] Zoch, H.-W.; Spur, G. (Hrsg.): Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten. München: Hanser, 2015
- [18] Dietrich, J.; Tschätsch, H.: Praxis der Umformtechnik: Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen. 11. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [19] Ashton, L.; Christensen, R. J.; Crane, R. L.: Process and apparatus for forming hollow structures from powdered thermoplastic materials. Patent US 47 76 996 A, 11.10.1988
- [20] Crawford, R. J. (Hrsg.): Rotational moulding of plastics. 2. Aufl., Taunton: Research Studies Press, 1996
- [21] Schlaich, J.; Schäfer, K.: Konstruieren im Stahlbetonbau. In: Eibl, J. (Hrsg.): Beton-Kalender 2001, Vol. 90, Bd. 2, Berlin: Ernst & Sohn, 2001, S. 311–492
- [22] Michell, A. G. M.: The Limits of Economy of Material in Frame-structures. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 8 (1904) 47, Series 6, S. 589–597 – DOI: 10.1080/14786440409463229
- [23] Sobek, W.: Über die Gestaltung der Bauteilinnerräume. In: Scheerer, S.; van Stipriaan, U. (Hrsg.): Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2016, S. 62–76
- [24] Sloane, N. J. A.: The packing of spheres. Scientific American 250 (1984) 1, S. 116–125 – DOI: 10.1038/scientificamerican0184-116
- [25] Conway, J. H.; Sloane, N. J. A.: Sphere packings, lattices and groups. 3. Aufl., New York et al.: Springer, 1999
- [26] Fuller, W. B.; Thompson, S. E.: The laws of proportioning concrete. Transactions of the American Society of Civil Engineers 59 (1907) 2, S. 67–143
- [27] Heinze Cobiax Deutschland GmbH: Betondecken leicht gemacht – Technologie – Umsetzung. URL: <http://www.cobiax.com/technologie/umsetzung> (abgerufen am 27.2.2018)

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 2–7, 14, 16, 20; 17 [16]: Daniel Schmeer
- Bilder | Pictures 8, 10–12, 15; 9 [12]; 13 [14]: Mark Wörner
- Bilder | Pictures 1; 18 [16]: Gabriela Metzger
- Bild 19 | Picture 19 [23]: Werner Sobek

Bereits publizierte Bilder wurden meist gegenüber der Originalquelle modifiziert. | Already published pictures were mostly modified compared to the original source.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Effiziente automatisierte Herstellung multifunktionaler gradierter Bauteile mit mineralischen Hohlkörpern

Efficient automated Production of multifunctional graded components with mineral hollow bodies

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht Institutsleiter Institute's director
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	GA 519/5-1 (Projektnummer Project number: 257610789)
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 (0)711 685-63323 harald.garrecht@iwb.uni-stuttgart.de http://www.iwb.uni-stuttgart.de/
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny Institutsleiter Director of the institute
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	SA 847/17-1 (Projektnummer Project number: 257610789)
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik (ISYS), Waldburgstraße 17/19, 70563 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685-66302 oliver.sawodny@isys.uni-stuttgart.de https://www.isys.uni-stuttgart.de/
Antragsteller 3 Applicant 3:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek Institutsleiter Director of the institute
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	SO 365/15-1 (Projektnummer Project number: 257610789)
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Pfaffenwaldring 7+14, 70569 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685-6 6226/-6 3599 werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de http://www.uni-stuttgart.de/ilek/
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.05.2015–31.06.2018
Team Team:	Daniel Schmeer (ILEK) Mark Wörner (ISYS) Walter Haase (ILEK) Christian Baumert (IWB) Christian Blatt (IWB, 10/2016–12/2016; 08/2017–10/2017) Ante Vucemilovic (IWB, 09/2015–11/2015)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Herrmann, M.; Sobek, W.: Gradientenbeton – Numerische Entwurfsmethoden und experimentelle Untersuchung gewichtsoptimierter Bauteile. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015) 10, S. 672–686
- Schmeer, D.; Herrmann, M.; Wörner, M.; Sippel, S.; Sawodny, O.; Garrecht, H.; Sobek, W.: Entwurf und automatisierte Herstellung von Bauteilen aus funktional gradiertem Beton. In: Garrecht, H.; Hofmann, J.; Sobek, W.; Novák, B. (Hrsg.): Beiträge zur 3. DAFStb-Jahrestagung mit 56. Forschungskolloquium am 11./12.11.2015 in Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2015, S. 15–22

- Sippel, S.; Wörner, M.; Schmeer, D.; Sawodny, O.; Sobek, W.; Garrecht, H.: Dichteangepasste Betongemische für das Trockenspritzen von gradierten Bauteilen. In: Garrecht, H.; Hofmann, J.; Sobek, W.; Novák, B. (Hrsg.): Beiträge zur 3. DAFStb-Jahrestagung mit 56. Forschungskolloquium am 11./12.11.2015 in Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2015, S. 137–143
- Wörner, M.; Schmeer, D.; Schuler, B.; Pfänder, J.; Garrecht, H.; Sawodny, O.; Sobek, W.: Gradientenbetontechnologie: Von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 794–805
- Sobek, W.: Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume – Meinem Freund Manfred Curbach zum 60. Geburtstag gewidmet. In: Scheerer, S.; van Stipriaan, U. (Hrsg.): Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2016, S. 62–76
- Herrmann, M.; Sobek, W.: Functionally graded concrete: Numerical design methods and experimental tests of mass-optimized structural components. Structural Concrete 18 (2017), S. 54–66
- Schmeer, D.; Sobek, W.: Weight-optimized and Mono-material Concrete Components by the Integration of Mineralized Hollow Spheres. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, book of abstracts: S. 152, full paper published digitally: paper no. 9600, 9 S.
- Wörner, M.; Schmeer, D.; Schuler, B.; Sawodny, O.; Sobek, W.: The technology of graded concrete – Interface between design and manufacturing. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, book of abstracts: S. 153, full paper published digitally: paper no. 9601, 8 S.
- Schmeer, D.; Sobek, W.: Gradientenbeton. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2019, Berlin: Ernst & Sohn, 2019, S. 455–476

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertationen | Dissertations

- Wörner, M.: Automatisierte Herstellung funktional gradierter Betonbauteile. ISYS, 2017
- Schmeer, D.: Mesogradierung von Betonbauteilen. Herstellung und Tragverhalten von Betonbauteilen mit integrierten mineralischen Hohlkugeln. ILEK, 2021

Studienarbeiten | Student's research projects

- Andree, F.: Ökologische Betrachtung der automatisierten Gradientenbetonherstellung zur Sicherstellung eines nachhaltigen Prozessablaufs. Bachelorarbeit, ILEK, 2015
- Glutsch, S.: Untersuchungen zur Schwindreduzierung bei Faserbeton. Bachelorarbeit, IWB, 2015
- Wiertz, S.: Mineralisierte Hohlkörper zur Erweiterung des Eigenschaftsspektrums von funktional gradierten Betonbauteilen. Bachelorarbeit
- Dias, R.: Multifunktionale Wandbauteile aus gradiertem Beton. Bachelorarbeit, ILEK, 2016
- Hörner, N.: Methoden zur Modellierung und Regelung von hybriden Manipulatoren unter Berücksichtigung von Elastizitäten. Masterarbeit, ISYS, 2016
- Lindner, P.: Trajektorienplanung für die Herstellung funktional gradierter Betonbauteile. Bachelorarbeit, ISYS, 2016
- Villinger, M.: Modellierung und Identifikation eines hybriden Manipulators. Bachelorarbeit, ISYS, 2016
- Köppel, N.: Funktional gradierte Betonstütze. Bachelorarbeit, ILEK, 2017
- Kurz, T.: Gewichtsreduzierte und bewehrungsoptimierte Bauteile aus funktional gradiertem Beton. Bachelorarbeit, ILEK, 2017
- Stulic, T.: Parametrische Untersuchung zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit integrierten, mineralischen Hohlkörpern. Masterarbeit, ILEK, 2017

- Vochazer, F.: Entwurf und Validierung von funktional gradierten Betonbauteilen unter Berücksichtigung des automatisierten Herstellungsprozess. Bachelorarbeit, ILEK, 2018

Patent | Patent

- DE 10 2011 102 337 A1: Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen von Bauteilen mit zumindest einer kontinuierlichen Eigenschaftsänderung. Anmelder: Sobek, W.; Offenlegungstag: 29.11.2012

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton | Development of an ecological and economical construction method by using prefabricated multifunctional wall components made of graded concrete

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Förderer Funding:	BBSR / Forschungsinitiative Zukunft Bau
Laufzeit Period:	01/2016–02/2019

- Integrale Planung und Herstellung von ressourcen-effizienten Betonbauteilen aus mineralischer Faserverbundbewehrung und gradiertem Beton | Integrated design and manufacture of resource-efficient concrete components made of mineral composite reinforcement and graded concrete

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner (Fraunhofer-IBP)
Förderer Funding:	Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg, Call Innovative Rohstoffnutzung in KMUs
Laufzeit Period:	01/2019–31/2020

- Co-design of functionally graded concrete (FGC) building system

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek, Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / EXC 2120
Laufzeit Period:	07/2019–06/2022

- Cyber-physical fabrication of functionally graded concrete (FGC) components for multi-storey buildings

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / EXC 2120
Laufzeit Period:	07/2019–06/2022

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Mixed Matters – AA Visiting School Stuttgart, stattgefunden am ILEK in 2016 und 2017 | held at the ILEK in 2016 and 2017 – <http://mixedmatters.aaschool.ac.uk/archive2015-2016/>
- 2. Auszeichnung materialPreis2018 | 2nd award materialPreis2018 – <https://www.raumprobe.com/materialpreis/einreichungen/daniel-schmeer-universitaet-stuttgart-gradientenbeton/>

Schalentragwerke mit funktionaler Gradierung | Shell structures with functional grading

- ▶ Sandy Illguth, Dirk Lowke, Thomas Kränkel, Christoph Gehlen
- ▶ Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), TU München

1 Motivation

Betone für schlanke Schalentragwerke weisen zur Sicherstellung ausreichender Zugfestigkeiten oft einen hohen Stahlfasergehalt auf. Dies ist mit hohen ökologischen und monetären Kosten verbunden. Das Ziel war es daher, die Voraussetzungen für die Herstellung effizienter Schalentragwerke aus funktional fasergradierten Betonfertigteilen zu schaffen.

2 Betone für Schalentragwerke – Entwurfsraum

Es wurden eigens entworfene Betone sowie Standard-Normalbetone (NB) und ultrahochfeste Betone (UHFB) aus Literaturangaben ökologisch bilanziert. Die Ergebnisse zeigten, dass ein stahlfaserfreier NB mit 320 kg/m^3 Zement ein CO_2 -Äquivalent von rd. 300 kg/m^3 besitzt. Ein UHFB mit 785 kg/m^3 Stahlfasern und 810 kg/m^3 Zement weist bereits ein CO_2 -Äquivalent von 1.650 kg/m^3 auf. Zur Reduzierung der ökologischen Auswirkungen müssen somit der Zement- und der Stahlfasergehalt möglichst gering sein.

Gemeinsam mit dem TP Bletzinger (S. 18 ff. in diesem Buch) wurden die Filigranität sowie die ökologischen Auswirkungen eines druckoptimierten Schalentragwerks [1] bei vorgegebener Traglast für die Betone bestimmt, s. Bild 1. Zur Sicherstellung einer vollständigen Ausfüllung der Schalung mit Beton muss diese eine Mindestdicke aufweisen, sodass sich der Beton darin durch freies Fließen ausbreiten kann. Aus diesem Grund wurde festgelegt, dass die Dicke

1 Motivation

Concrete for slender load-bearing shell structures often has a high steel fibre content to ensure sufficient tensile strength. This is associated with high ecological and financial costs. Thus, the aim of this project was to create the prerequisites for the production of efficient shell structures made of functional fibre-graded precast concrete elements.

2 Concrete for shell structures – design scope

Life cycle analyses were carried out for specially designed concretes as well as standard normal concretes (NB) and ultra-high strength concretes (UHFB) with compositions taken from the literature. The results showed that a normal concrete without steel fibres and 320 kg/m^3 cement possesses a CO_2 equivalent of approximately 300 kg/m^3 . In contrast, a UHFB with 785 kg/m^3 steel fibres and 810 kg/m^3 cement has a CO_2 equivalent of $1,650 \text{ kg/m}^3$. Consequently, the cement and steel fibre content must be as low as possible in order to reduce the environmental impact.

In cooperation with the project Bletzinger (see page 18 seq. in this book), the filigranity and ecological effect of a shell structure optimized for compression [1] and under a given load-bearing conditions were determined the concrete, Fig. 1. A minimum formwork thickness is necessary to that the fresh concrete can flow freely and completely fill the formwork. For this reason,

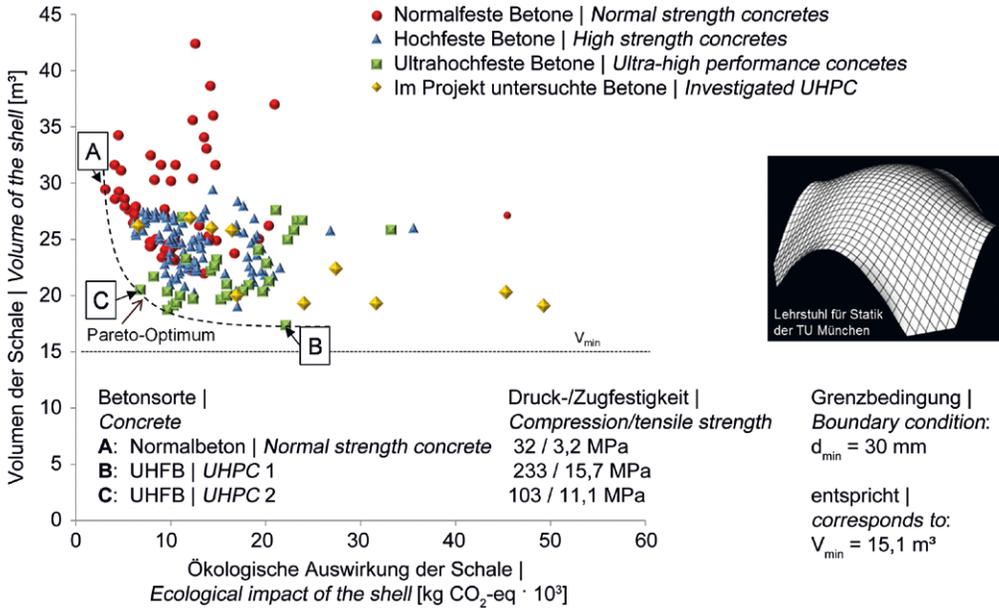


Bild 1: Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Filigranität und die ökologischen Auswirkungen (links) einer druckoptimierten Schale (rechts) | Fig. 1: Effect of concrete composition on filigranity and ecological effects (left) of a compression-optimized shell (right)

der Schale 30 mm nicht unterschreiten darf. Je nach Festigkeit des Betons muss die Schalendicke für den Lastabtrag vergrößert werden.

the thickness of the shell should not be below 30 mm. Depending on the strength of the concrete, the shell thickness necessary for load transfer has be increased.

Alle Betone auf dem Pareto-Optimum in Bild 1 weisen minimale Werte hinsichtlich Volumen bzw. CO₂-Ausstoß auf. Die ökologischen Auswirkungen sind am geringsten, wenn Normalbeton mit einer Druckfestigkeit von 32 N/mm² verwendet wird (Beton **A**). Die höchste Filigranität wird mit UHFB mit einer Druckfestigkeit von 233 N/mm² (Beton **B** = UHFB 1) erreicht. Wird jedoch das Volumen der Schale um nur 8 % erhöht (Beton **C** = UHFB 2), reduziert sich der CO₂-Ausstoß um über 56 %.

All the concretes on the pareto optimum in Fig. 1 exhibit minimal values in terms of volume or CO₂ emissions. The ecological effect is lowest when normal concrete with a compressive strength of 32 MPa is used (concrete **A**). The highest filigranity is obtained for UHFB with a compressive strength of 233 MPa (concrete **B** = UHFB 1). However, if the volume of the shell is increased by only 8% (concrete **C** = UHFB 2), the CO₂ emissions are reduced by more than 56%.

3 Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz von Betonfertigteilen

3 Ways to increase the efficiency of precast concrete components

Mit Stahlfasern lässt sich die Zugfestigkeit von Beton erhöhen. Da die Beanspruchungen in Fertigteilen i. d. R. über den Querschnitt nicht konstant hoch sind, kann die Effizienz der Fasern durch deren funktionale Gradierung ge-

Steel fibres are used to increase the tensile strength of concrete. Since the stress in precast elements is not usually constant over the element cross-section, the efficiency of the fibres can be increased by functional grading. The pre-

steigert werden. Im vorliegenden Projekt wurden dafür die Voraussetzungen geschaffen.

3.1 Erhöhung der Effektivität der Faser

3.1.1 Vorarbeiten

Die Effektivität von Fasern wurde in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung, Fasergeometrie und Faserflächenbeschaffenheit untersucht [2]. Die Untersuchungen ergaben einen alles dominierenden Einfluss des Faserdurchmessers auf die Faserleistungskennzahl FLK_f (mittlere Faserausziehungskraft pro Volumen Faser). So stieg die FLK_f für einen Faserdurchmesser $d = 0,48$ mm von 38 N/mm^3 auf 129 N/mm^3 bei $d = 0,15$ mm. Zunehmende Faserlängen l führten zur Reduktion der FLK_f . Das Aufrauen von Fasern ($d = 0,48$ mm) erhöhte die FLK_f um lediglich 7 %. Der Einsatz gewellter Fasern ergab bei geradem Faserauszug einen Anstieg der FLK_f um rd. 30 % im Vergleich zu glatten Fasern.

Um die Zugfestigkeit der Betone zu maximieren, ist es demnach entscheidend, kleine Faserdurchmesser zu verwenden. Der Einsatz kurzer Fasern ist im Hinblick auf die hohe FLK_f und zur Gewährleistung guter Verarbeitbarkeit bei hohen Fasergehalten zielführend.

3.1.2 Steigerung der Biegezugfestigkeit

Die Untersuchungen erfolgten an zwei UHFB (UHFB_A, UHFB_B), die bereits in Vorarbeiten [2] hinsichtlich der Kraftübertragung der Fasern und der ökologischen Auswirkungen aussichtsreich waren [3]. UHFB_A mit einem Zementgehalt von 220 kg/m^3 repräsentiert eine ökologisch optimierte Rezeptur, UHFB_B mit 667 kg/m^3 Zement einen konventionellen UHFB [3], [4]. Beiden Betonen wurden Mikrostaalfasern ($l = 6$ mm) mit Durchmesser von $d = 0,20$ mm (-1) bzw. $d = 0,14$ mm (-2) zugegeben. Der Fasergehalt der Betone wurde schrittweise bis auf 10 Vol.-% erhöht.

Die alleinige Erhöhung des Fasergehaltes führte nicht zwangsläufig zu höheren Biegezugfestigkeiten. So erreichte UHFB_A-1 bereits bei

requisites for this approach have been created in this project.

3.1 Increasing the effectiveness of the fibres

3.1.1 Preliminary work

The effectiveness of the fibres was investigated in terms of concrete composition, fibre geometry and the surface properties of the fibres [2]. The investigations revealed a dominating effect of fibre diameter on the fibre performance index FLK_f (average fibre pull-out force per fibre volume). Thus the FLK_f for a fibre diameter $d = 0.48$ mm increased from 38 MPa to 129 MPa for $d = 0.15$ mm. Increasing the fibre length l led to a reduction in FLK_f . Roughening the fibres ($d = 0.48$ mm) increased FLK_f by only 7%. The use of corrugated fibres resulted in an increase of FLK_f for straight pull-out by approximately 30% compared with smooth fibres.

The use of small fibre diameters is therefore decisive for maximizing the tensile strength of the concrete. Short fibres are beneficial owing to their high FLK_f and the good workability obtained at high fibre contents.

3.1.2 Increasing flexural strength

The investigations were carried out with two UHFB (UHFB_A, UHFB_B) which, based on earlier work [2], were promising with respect to force transmission of the fibres and the ecological effects [3]. UHFB_A with a cement content of 220 kg/m^3 represents an ecologically optimized composition whereas UHFB_B, with 667 kg/m^3 cement, is a conventional UHFB [3], [4]. Micro steel fibres ($l = 6$ mm) with diameters of $d = 0.20$ mm (fibre 1) or $d = 0.14$ mm (fibre 2) were added to the concretes. The fibre content of the concretes was increased in steps up to 10 vol.%.

Increasing in the fibre content alone did not necessarily result in higher flexural strengths. UHFB_A-1 reached 20.7 MPa flexural strength with 3 vol.% fibres for which UHFB_B-1 would have required about 8.6 vol.% fibres (Fig. 2, left).

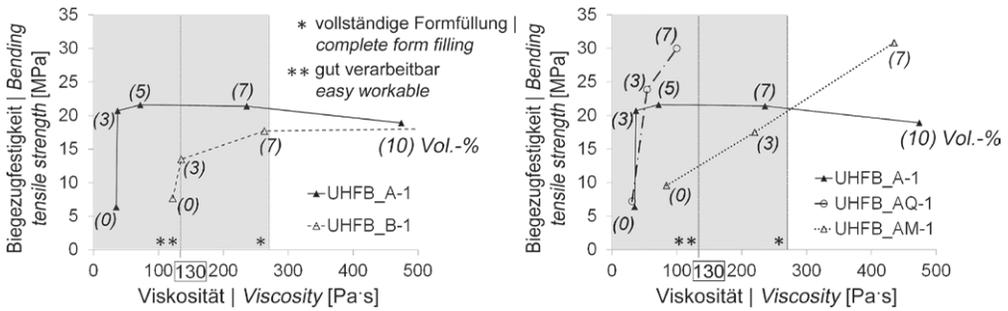


Bild 2: Biegezugfestigkeiten in Abhängigkeit der Viskosität; UHFB_A und UHFB_B (links); UHFB_A + Ersatz von 25 Vol.-% Kalksteinmehl durch Quarzmehl (UHFB_AQ) und Metakaolin (UHFB_AM) (rechts) | **Fig. 2:** Bending tensile strength as a function of viscosity; UHFB_A and UHFB_B (left); UHFB_A + substitution of 25 vol.% limestone powder (KSM) by quartz powder (QM) (UHFB_AQ) and metakaolin (MK) (UHFB_AM) (right)

3 Vol.-% eine Biegezugfestigkeit von 20,7 MPa, für die mit UHFB_B-1 Fasergehalte von ca. 8,6 Vol.-% benötigt worden wären (Bild 2, links).

Mit steigenden Fasergehalten stiegen auch die dynamische Fließgrenze τ_0 und die plastische Viskosität μ der Betone. Unter Berücksichtigung der beiden im System vorhandenen größten Partikel Sand und Fasern kann der relative Feststoffanteil $\text{rel } \varphi$ auf maximal 0,8 erhöht werden, bevor die rheologischen Kennwerte exponentiell ansteigen und so die Formfüllung negativ beeinflussen [3], [4], vgl. auch Abschnitt 4. Daher sollte die Viskosität für die durchgeführten Untersuchungen einen Wert von $\mu = 130 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ nicht überschreiten. Der UHFB_B besaß bereits ohne Fasern eine Viskosität von $\mu = 122 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, sodass diesem nur max. 3 Vol.-% der Faser 1 zugegeben werden konnten, ohne die Verarbeitbarkeit zu verschlechtern. Demnach ist es für die Konzeption eines Betons für filigrane Betonteile entscheidend, die faserfreie Betonrezeptur möglichst niedrigviskos einzustellen, was die Zugabe größerer Fasermengen zur Steigerung der Zugfestigkeit erlaubt.

Zudem sind die ökologischen und ökonomischen Kosten bei der Herstellung des Betons entscheidend. Mikrostaalfasern und Zement dominieren diese maßgeblich. 3 Vol.-% der Faser 2 im UHFB_B führten zwar zu einer hohen Biegezugfestigkeit von 24,0 MPa, jedoch auch zu einer gesteigerten Viskosität, sodass der Beton nur bedingt verarbeitbar war. Im Vergleich zur dickeren Faser 1 sind zudem die monetären

The dynamic yield stress τ_0 and plastic viscosity μ of the concretes both increased with the fibre content of the fresh concrete. Taking into account the two coarsest particles present in the system, namely sand and fibres, the relative solids content φ_{rel} can be increased to at most 0.8 before the rheological parameters increase exponentially thus adversely affecting mould filling [3], [4], cf. section 4. Thus the viscosity in the present tests should not exceed $130 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Without fibres UHFB_B already had a viscosity of $122 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. In this case, it was only possible to add 3 vol.% fibre 1 without worsening workability. Consequently, it is decisive for the design of concrete for filigree concrete components that the viscosity of the fibre-free fresh concrete mix is set as low as possible in order to enable the addition of larger amounts of fibres to increase tensile strength.

The ecological and economic costs of concrete production are decisive and are dominated by the micro steel fibres and cement. Although 3 vol.% of fibre 2 in UHFB_B led to a high flexural strength of 24.0 MPa, the viscosity of the mix increased and the fresh concrete was only workable to a limited extent. Compared with the thicker fibre 1, the expenditure is about 20% lower and the ecological impact (mainly due to the wet wire drawing process [5]) about 25% higher.

In summary, UHFB_A-1 is much more efficient because it has a high flexural strength with low cement and fibre contents as well as good workability of the fresh concrete.

Kosten um rd. 20 % und die ökologischen Auswirkungen (wesentlich bedingt durch den Nassziehpprozess [5]) um rund 25 % höher.

Zusammenfassend ist UHFB_A-1 wesentlich effizienter, da er hohe Biegezugfestigkeiten bei geringen Zement- und Fasergehalten und gleichzeitig guter Verarbeitbarkeit aufweist.

Zur weiteren Steigerung der Zugfestigkeit des UHFB_A-1, wurden jeweils 25 Vol.-% Kalksteinmehl (KSM) durch Quarzmehl (QM) bei UHFB_AQ (inert, $d_{50} = 2 \mu\text{m}$; vergleichbar mit KSM) oder durch Metakaolin (MK) bei UHFB_AM (puzzolanisch, $d_{50} = 6,5 \mu\text{m}$) ersetzt [4]. Bild 3 zeigt KSM, QM und MK in 4.500-facher Vergrößerung mittels REM. Das Quarzmehl weist im Gegensatz zum Kalksteinmehl deutlich scharfkantigere Bruchflächen auf, wonach eine bessere Verzahnung der Partikel und höhere Verbundfestigkeiten möglich sind. Die blätterartige Struktur des Metakaolin ist in Bild 3 rechts zu erkennen. Entsprechend ist auch die spezifische Oberfläche im Vergleich zum KSM doppelt so groß.

Bild 2, rechts, zeigt die Biegezugfestigkeiten der Rezepturen mit QM und MK für die Fasergehalte 0, 3 und 7 Vol.-% (Faser 1) mit den zugehörigen Viskositäten. Mit Quarzmehl konnte eine Steigerung der Biegezugfestigkeit erreicht werden. Selbst bei einem Fasergehalt von 7 Vol.-% war der Beton gut verarbeitbar. Der faserfreie Beton mit MK (UHFB_AM) hatte bereits eine Viskosität von $86 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, was auf die geringere Packungsdichte und auf die fächerartige Kornform des Metakaolin (zusätzliche Reibung zwischen den Partikeln) zurückgeführt

To increase the tensile strength of UHFB_A-1 further, 25 vol.% of the limestone powder (KSM) content was replaced by quartz powder (QM) in UHFB_AQ (inert, $d_{50} = 2 \mu\text{m}$, similar to KSM) or metakaolin (MK) in UHFB_AM (pozzolanic, $d_{50} = 6.5 \mu\text{m}$) [4]. Fig. 3 shows SEM images of KSM, QM and MK. In contrast to limestone powder, quartz powder clearly has more sharp-edged fracture surfaces and therefore better interlocking of the particles which enables higher bond strengths. The foliate-like structure of the metakaolin is apparent in Fig. 3, right. Correspondingly, the specific surface is twice as large as that of KSM.

Fig. 2, right, shows the flexural strengths of the mixes with quartz powder and MK for fibre contents of 0, 3, and 7 vol.% (fibre 1) as a function of the associated viscosities. An increase in flexural strength was obtained with quartz powder. This concrete possessed good workability even with a fibre content of 7 vol.%. The viscosity of fibre-free concrete with MK (UHFB_AM) was already $86 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ which can be explained by a lower packing density and the fan-like particle shape of the metakaolin (additional friction between the particles). MK was able to increase the flexural strength of the fibre-free concrete from 7.2 to 9.6 MPa. The addition of 7 vol.% fibres increased the flexural strength of UHFB_AM-1 to 30.8 MPa, but the this concrete did not fill the mould sufficiently. Consequently, UHFB_AM is not suitable for formwork for thin walls.

In conclusion, flexural strength can be increased by a suitable choice of the granular materials and fibres, but cannot be optimized independently of concrete workability.

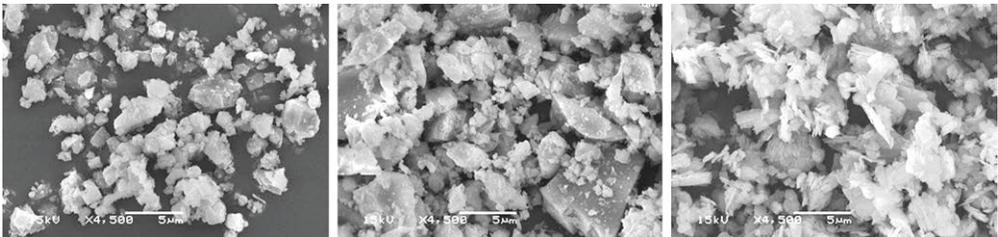


Bild 3: REM-Aufnahmen (4.500-fache Vergrößerung), v. l. n. r.: Kalksteinmehl, Quarzmehl und Metakaolin | **Fig. 3:** SEM images (magnified 4,500 times); from left to right: limestone powder, quartz flour and metakaolin

werden kann. Bereits beim faserfreien Beton konnte durch MK eine Steigerung der Biegezugfestigkeit von 7,2 MPa auf 9,6 MPa erreicht werden. Mit 7 Vol.-% Fasern stieg die Biegezugfestigkeit des UHFB_AM-1 bis auf 30,8 MPa, jedoch bei unzureichender Formfüllung, sodass UHFB_AM für dünnwandige Schalungen nicht geeignet ist.

Zusammenfassend kann die Biegezugfestigkeit durch eine gezielte Wahl der granularen Stoffe und der Fasern gesteigert, aber nicht unabhängig von der Verarbeitbarkeit optimiert werden.

3.2 Funktionale Gradierung von Fasern

Im Auflager- bzw. Anschlussbereich von einzelnen Segmenten eines Schalentragswerks treten i. d. R. höhere Momente auf. Durch Anpassung der Fasergehalte an die vorherrschenden Beanspruchungen im Bauteil ist es möglich, die Bauteildicke des gesamten Fertigteils konstant zu halten und so neben der Ästhetik des gesamten Tragwerks auch die Effizienz zu steigern. Neben einer Gradierung auf Tragwerksebene (Fertigteile mit unterschiedlichen Fasergehalten) kann die Gradierung der Fasern auch innerhalb eines Fertigteils erfolgen (vgl. Bild 4).

Im vorliegenden Projekt wurde das Prinzip einer Rotationsgradierung verfolgt. Das Verhalten von Partikeln (Glaskugeln und Stahlfasern) bei einer rotierenden Bewegung wurde in transparenten Polyacrylsäure-Gelen, deren rheologische Parameter mit denen von Beton vergleichbar sind, analysiert [7], [8]. Mithilfe einer Rotationsmaschine und einer transparenten Prismenschalung wurden Gele mit unterschiedlichen Fließgrenzen, die 1,25 Vol.-% Glaskugeln ($1,5 \text{ mm} \leq d \leq 2,0 \text{ mm}$) bzw. 0,5 Vol.-% Mikro-stahlfasern ($d/l = 0,20 / 6 \text{ mm}$) enthielten, mit variablen Geschwindigkeiten vertikal rotiert, Bild 5. Nach Überschreiten eines partikelgeometrieabhängigen Stabilitätskriteriums bewegten sich diese vom Rotationsmittelpunkt weg zu den äußeren Schalungsrändern.

Ziel dieser Untersuchungen war es, das dynamische Stabilitätskriterium der Glaskugeln zu

3.2 Functional grading of fibres

Higher torques are usually present in the supporting or connecting region of individual segments in a shell structure. By adjusting the fibre content to the prevailing stresses in the concrete component, it is possible to keep the thickness of the whole precast component constant and thus improve the efficiency as well as the aesthetics of the entire structure. As well as grading at the load-bearing level (precast components with different fibre contents), fibres can be graded within the individual precast components (Fig. 4).

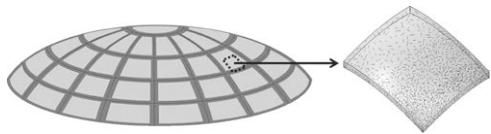


Bild 4: Funktionale Fasergradierung innerhalb eines Fertigteils – Randbereiche mit höherem Fasergehalt zum Abtrag lokal erhöhter Spannungen | **Fig. 4:** Functional fibre grading within a prefab – edge areas with higher fibre content to transfer locally increased stresses

The present project considered the principle of rotation grading. The behaviour of particles (glass beads and steel fibres) caused by rotation was analysed using transparent polyacrylic acid gels whose rheological parameters are similar to those of concrete [7], [8]. Gels with different yield stresses were investigated using a rotation machine and a transparent mould in the form of a rectangular prism. The gels contained 1.25 vol.% glass beads ($1.5 \text{ mm} \leq d \leq 2.0 \text{ mm}$) or 0.5 vol.% micro steel fibres ($d/l = 0.20 / 6 \text{ mm}$) and were vertically rotated at different speeds, Fig. 5. On exceeding a stability criterion depending on particle geometry, the particles moved

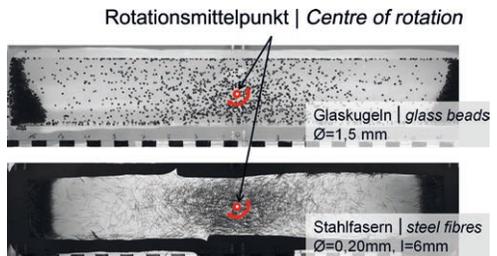


Bild 5: In Polyacrylsäure-Gel rotierte Glaskugeln (oben) und Stahlfasern (unten) | **Fig. 5:** Glass balls (top) and steel fibres (bottom) rotated in polyacrylic acid

bestimmen und mit dem in der Literatur [9] angegeben statischen Stabilitätskriterium zu vergleichen. So konnte auch das für die verwendeten Fasern ermittelte Stabilitätskriterium hinsichtlich Plausibilität geprüft und eingeordnet werden. Neben einem unteren dynamischen Stabilitätskriterium Y_{ud} (ab hier bewegen sich Fasern) wurde auch ein oberes dynamisches Stabilitätskriterium Y_{od} (keine Faserbewegung mehr, da keine Fasern mehr vorhanden) aus den beiden dynamischen Radien r_{ud} und r_{od} bestimmt, vgl. Bild 6, [7] und Gleichung (1).

$$Y_{ud/od} = \frac{\tau_0 \cdot r_{ud/od}}{\left(\frac{6 \cdot V}{\pi}\right)^{1/3} \cdot \Delta\rho \cdot v^2} \quad (1)$$

Mit: τ_0 Fließgrenze
 V Volumen der Stahlfaser
 $\Delta\rho$ Dichtedifferenz Stahl/Matrix
 v Umdrehungsgeschwindigkeit

Für die Glaskugeln wurde Y_{ud} mit 0,050 bestimmt und liegt damit leicht unter den von [9] ermittelten statischen Stabilitätskriterien mit 0,062 für raue und 0,088 für glatte Kugeln. Dort hatten die glatten Kugeln eine Rautiefe R_t von 1 μm , während die Kugeln der eigenen Untersuchungen eine Rautiefe R_t von bis zu 7 μm aufwiesen. Für die Mikrostaalfasern wurde Y_{ud} zu 0,018 er-

away from the centre of rotation to the outer edges of the mould.

The aim of these investigations was to determine the dynamic stability criterion of the glass beads and compare it with the static stability criterion given in the literature [9]. In this way, it was possible to check the plausibility of the stability criterion determined for the fibres as well as categorize it. In addition to a lower dynamic stability criterion Y_{ud} at which the fibres begin to move, an upper dynamic stability criterion Y_{od} (no more fibre movement because there are no more fibres) was determined from the two dynamic radii r_{ud} and r_{odr} , Fig. 6, [7] and Equation (1).

$$Y_{ud/od} = \frac{\tau_0 \cdot r_{ud/od}}{\left(\frac{6 \cdot V}{\pi}\right)^{1/3} \cdot \Delta\rho \cdot v^2} \quad (1)$$

Here: τ_0 Yield stress
 V Volume of steel fibres
 $\Delta\rho$ Density difference steel/matrix
 v Rotational speed

Y_{ud} was determined at 0.050 for the glass beads, a value which is slightly below the static stability criterion of 0.062 determined by

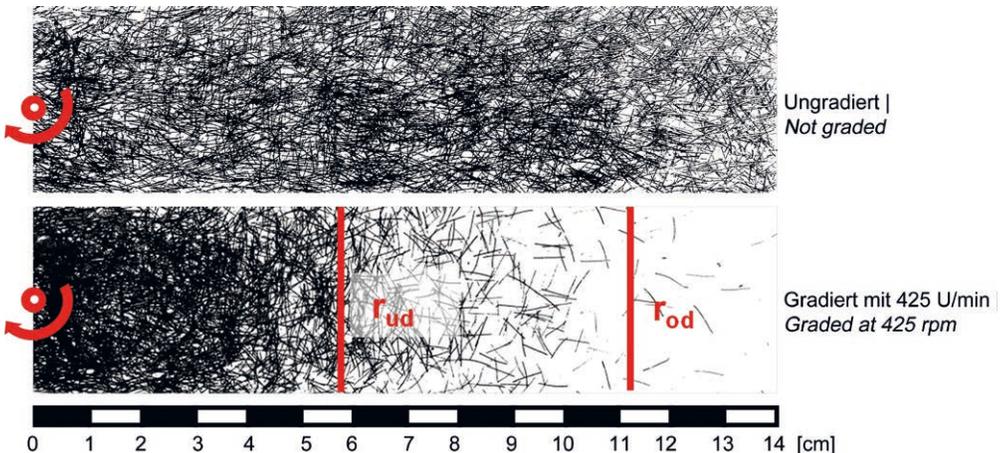


Bild 6: In Polyacrylsäure-Gel rotierte Stahlfasern mit r_{ud} und r_{od} | Fig. 6: Steel fibres rotated in polyacrylic acid gel with r_{ud} and r_{od}

mittelt. Die auf die Fasern wirkende Zentrifugalkraft nimmt mit größerem Abstand vom Rotationsmittelpunkt zu, sodass es bei Verwendung nur einer Faserart ein Bereich entsteht, in dem nahezu keine Fasern mehr vorhanden sind. Die aus diesem Bereich stammenden Fasern lagern sich am Schalungsende an. Der maximale Fasergehalt entspricht dort etwa 3 Vol.-%. Dieser Fasergehalt ermöglicht es wiederum, die Festigkeit einer durch Fügung geschwächten Zone zu steigern (vgl. Abschnitt 5). Da ein faserfreier Bereich jedoch unerwünscht ist, können auch gleichzeitig Fasern mit unterschiedlichen Abmessungen eingesetzt werden, sodass durch Steuerung der Rotationsgeschwindigkeit nur die größeren Fasern gradiert werden, während die feineren (z. B. Mikrostahtfasern) ungradiert in der Matrix verbleiben

Bild 7 zeigt eine mögliche Variante für zwei unterschiedliche Faserabmessungen, bei der bis zu einer Geschwindigkeit von rd. 225 m/s allein die größeren Fasern gradiert werden und so einen Beitrag für die Verstärkung des Randbereichs liefern. Für die Berechnung von r_{ud} und r_{od} wurde die Gleichung in Bild 6 ($\tau_0 = 8,6 \text{ Pa}$) herangezogen. Y_{ud} für die Fasern mit $d = 0,4 \text{ mm}$ wurde wie bei den feineren Fasern mit 0,018 angenommen, da die Gradiierung von Fasern mit $d/l = 0,4/16 \text{ mm}$ in Beton ein nahezu identisches Stabilitätskriterium von 0,017 ergab [10].

[9] for rough and 0.088 smooth beads, respectively. The surface roughness depth R_t of the smooth beads was $1 \mu\text{m}$ whereas the beads in the present investigations had surface roughness depths up to $7 \mu\text{m}$. Y_{ud} was found to be 0.018 for the micro steel fibres. The centrifugal force acting on the fibres increases with the distance to the centre of rotation. A region with almost no fibres forms if only one type of fibre is used. The fibres originating from this region accumulate at the edge of the mould where the maximum fibre content is about 3 vol.%. This fibre content makes it possible to increase the strength of a region weakened by construction joints (section 5). A region devoid of fibres is undesirable which can be avoided by combining fibres with different dimensions. The larger fibres can be graded by controlling the rotational speed whereas the finer (e.g. micro steel fibres) remain ungraded in the matrix.

Fig. 7 shows an example for two different fibre sizes. For speeds up about 225 m/s alone, only the larger fibres are graded thus contributing to the strength of the surface zone. The equation in Fig. 6 ($\tau_0 = 8.6 \text{ Pa}$) was used to calculate r_{ud} and r_{od} . A Y_{ud} of 0.018 for the fibres with $d = 0.4 \text{ mm}$ was also assumed to be valid for the finer fibres. This was because the grading of fibres with $d/l = 0.4/16 \text{ mm}$ in concrete yielded almost the same stability criterion, 0.017 [10].

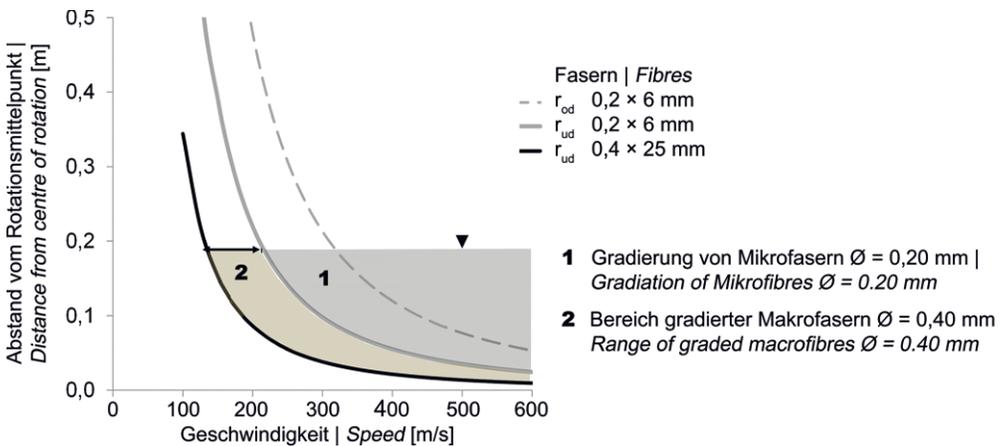


Bild 7: Benötigte Geschwindigkeit zur Gradiierung von Stahtfasern unterschiedlicher Abmessungen; oberhalb r_{ud} findet Faserbewegung statt | Fig. 7: Speed required for grading steel fibers of different dimensions; fiber movement starts above r_{ud}

Das Verfahren zur Bestimmung der Stabilitätskriterien ermöglicht es, bei bekannten Materialparametern für beliebige Betone und Fasern die Bereiche zu bestimmen, in denen eine Fasergradierung stattfindet. Damit wurde eine Grundvoraussetzung für die Schaffung effizienter Schalenträgerwerke gebildet.

4 Formfüllungseigenschaften

4.1 Experimentelle Untersuchungen

In Abschnitt 3.1.2 wurde gezeigt, dass sich mit Erhöhung des Fasergehaltes zur Steigerung der Zugfestigkeiten auch die Fließgrenze und Viskosität der Betone erhöhen. Die Verarbeitbarkeits-eigenschaften verschlechtern sich. Der für die rheologischen Kenngrößen bestimmte max. relative Feststoffanteil $\text{rel } \varphi$ (Fasern und Sand) von 0,8 konnte im Hinblick auf die Gewährleistung guter Formfüllung bestätigt werden. Mit $\text{rel } \varphi > 0,8$ ist der Beton nicht mehr geeignet, dünnwandige Schalungen vollständig auszufüllen. Dies konnte durch Experimente zur Formfüllung von UHFB_A und UHFB_B mit Mikrostahtfasern $d / l = 0,20 / 6 \text{ mm}$ (-1) und $0,14 / 6 \text{ mm}$ (-2) in einer L-förmigen Modellschalung mit Abmessungen des horizontalen Schenkels von $1.200 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ gezeigt werden, Bild 8.

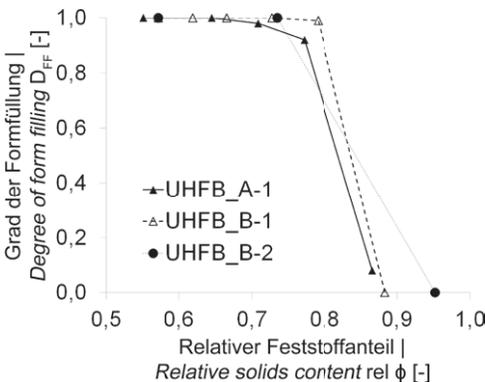


Bild 8: Grad der Formfüllung D_{FF} in L-förmiger Modellschalung (1,0 = vollständige Formfüllung; 0 = Blockieren des Betons) in Abhängigkeit von $\text{rel } \varphi$ | **Fig. 8:** Degree of mould filling DFF in L-shaped model formwork (1.0 = complete mould filling; 0 = blocking of the concrete) as a function of φ_{rel}

If the material parameters are known, the method for determining the stability criteria enables the determination of the regions in which fibre grading takes place for any given concrete and fibres. This procedure is a basic requirement for the creation of efficient shell structures.

4 Properties affecting formwork filling

4.1 Experimental investigations

It is shown in section 3.1.2 that increasing the fibre content increases the tensile strength as well as the yield stress and viscosity of the concrete. At the same time the workability of the concrete worsens. A maximum relative solids content φ_{rel} (fibres and sand) of 0.8 to ensure good formwork filling was confirmed in the present work. If $\varphi_{rel} > 0.8$ the concrete is no longer suitable for completely filling formwork with thin cross-sections. This was shown by the experiments for mould filling using UHFB_A and UHFB_B with micro steel fibres $d / l = 0.20 / 6 \text{ mm}$ (fibre 1) and $0.14 / 6 \text{ mm}$ (fibre 2) in an L-shaped model formwork with horizontal leg dimensions $1,200 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$, Fig. 8.

Reducing the cross-sectional height of the leg from 50 mm to 35 mm or 25 mm reduced the degree of filling of UHFB_A without fibres from 1.0 to 0.90 or 0.78, respectively. This effect was partially compensated by increasing the superplasticizer content of the mix. However, reducing the cross-sectional height also reduces the flow rate. Especially in the case of high-viscosity concretes, the low flow rate promotes thixotropic structuring which ends the flow process earlier [11]. Consequently, for cross-sections $< 50 \text{ mm}$ φ_{rel} (sand and fibres) < 0.8 must be observed in order to ensure complete formwork filling.

4.2 Prediction of flow properties with computational fluid dynamics

A new method based on experiments and simulations using computational fluid dynamics has

Mit Verringerung der Querschnittshöhe von 50 mm auf 35 mm bzw. 25 mm verschlechterte sich der Formfüllungsgrad des faserfreien UHFB_A von 1,0 auf 0,90 sowie 0,78. Dies konnte durch die Erhöhung des Fließmittelgehaltes der Mischung teilweise kompensiert werden. Jedoch sinkt bei Reduktion der Querschnittshöhe auch die Fließgeschwindigkeit. In der Folge kommt es gerade bei hochviskosen Betonen zu einem thixotropen Strukturaufbau und der Fließvorgang wird früher beendet [11]. Daraus folgt, dass bei Querschnitten < 50 mm rel φ (Sand und Fasern) < 80 % zur Gewährleistung einer vollständigen Formfüllung einzuhalten sind.

4.2 Vorhersage der Fließeigenschaften mit numerischer Strömungsmechanik

Um das Fließverhalten von UHFB in dünnwandigen Schalungen zu prognostizieren, wurde eine neue Methode auf Basis von Experimenten und Simulationen mit numerischer Strömungsmechanik (*Computational Fluid Dynamics*) entwickelt [12]. Durch Simulation von Versuchen im Rheometer mit der Kugelgeometrie konnten die Torsionsmomente mit den Parametern aus zwei anerkannten rheologischen Modellen (Ostwald, de Waele und Herschel-Bulkley [13]) durch Aufstellung von Ersatzfunktionen verknüpft werden. Diese Ersatzfunktionen ermöglichen es, die Parameter der rheologischen Modelle mithilfe der gemessenen Torsionsmomente direkt zu ermitteln. Mithilfe der so bestimmten Parameter wurden Simulationen zum Formfüllungsvermögen in der L-förmigen Modellschalung ($h = 50$ mm) durchgeführt, welche das experimentell ermittelte Fließverhalten bestätigen.

been developed to predict the flow behaviour of UHFB in formworks with thin cross-sections [12]. By simulating experiments in a rheometer with ball geometry, the moments of torsion can be linked to the parameters of two well-known rheological models (Ostwald, de Waele and Herschel-Bulkley [13]) with the help of substitutional functions. These functions enable the direct determination of the rheological model parameters from experimentally measured moments of torsion. Using these parameters, simulations were then performed for filling the L-shaped model formwork ($h = 50$ mm). The calculated degrees of filling confirmed the experimentally observed flow behaviour.

5 Realistic construction components with graded fibres

Simple curved shell segments were produced with both graded and constant fibre contents and then subjected to load [14]. The curvature corresponded to the maximum curvature of the shell optimized for pressure in Fig. 1 ($\kappa = 0.41 \text{ m}^{-1}$). The tests with structural components were designed so that the test specimens, supports and loads correspond to a real component with an increased fibre content in the area of joint 2 (Fig. 9, right). The mix composition was essentially that of UHFB_A. To avoid cracks due to restraint owing to the curvature, 8 wt.% CEM I 42.5 R were replaced in the mix by a shrinkage-reduced CSA cement. A minimum ductility in the region subjected to less load was ensured by a fibre content of 0.5 vol.%. The region of the joint was produced with fibre contents of either 1, 2, or 3 vol.%. For purposes of reference, joined shell sections were

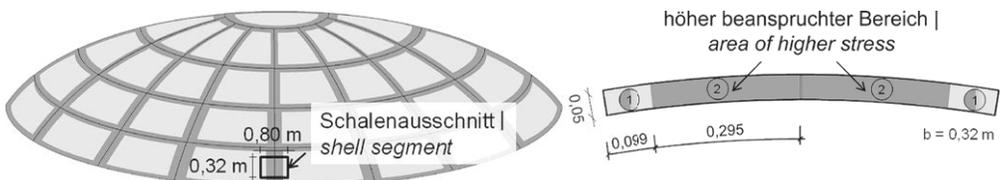


Bild 9: Mit Fertigteilen gefügte Schale (Fügebereiche mit höherem Fasergehalt aufgrund höherer Beanspruchung) und gewählter Ausschnitt für die realitätsnahe Prüfung eines gefügten Bauteils (Ansicht und Schnittdarstellung) | **Fig. 9:** Shell joined with finished parts (joining areas with higher fibre content due to higher stress) and selected section for realistic testing of a joined component (view and component section)

5 Realitätsnahe Bauteile mit gradier-tem Fasergehalt

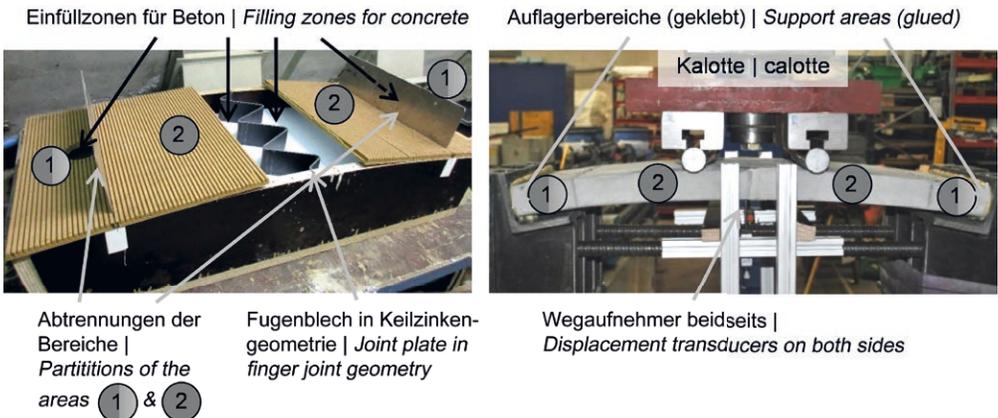
Es wurden einfach gekrümmte Schalensegmente sowohl mit gradierten als auch mit konstanten Fasergehalten hergestellt und anschließend belastet [14]. Die Krümmung entsprach der max. vorhandenen Krümmung der druckoptimierten Schale in Bild 1 ($\kappa = 0,41 \text{ m}^{-1}$). Die Bauteilversuche wurden so konzipiert, dass sowohl die Probekörper als auch Auflagerung und Belastung einem realitätsnahen Bauteil mit erhöhtem Fasergehalt im Bereich der Fügestelle 2 (Bild 9, rechts) entspricht. Die Mischungszusammensetzung entsprach im Wesentlichen UHFB_A. Zur Vermeidung von Rissen aus Zwang, bedingt durch die Krümmung, wurden 8 M.-% eines schwindreduzierten CSA-Zementes im Austausch gegen CEM I 42,5 R eingesetzt. Im geringer belasteten Bereich wurde durch einen Fasergehalt von 0,5 Vol.-% eine Mindestduktilität sichergestellt. Der Fugebereich enthielt Fasergehalte von 1, 2 bzw. 3 Vol.-%. Als Referenz wurden ungradierte gefügte Schalenabschnitte, ebenfalls mit Fasergehalten von 1, 2 bzw. 3 Vol.-%, hergestellt.

produced without grading fibre contents of 1, 2, or 3 vol.%.

In order to produce the curvature with high dimensional accuracy, the flowable concretes were poured into a mould which was almost closed. Fig. 10 shows the production (left) and testing procedures (right) of the joined shell segments. The joint was produced with a sheet metal strip based on the findings of the project Kohlmeier/Andrá (p. 412 seq.). This method ensured that both segments could be accurately joined after demoulding.

At an age of 5 d, the shell segments (Fig. 11) were heat-treated at 90 °C for 2 days in order to accelerate the development of strength. Afterwards, the joint surfaces of the segments were sandblasted which, according to [15], strengthens the bonding. A high-strength mortar HF10 supplied by the company Pagel [16] was used to fill the 3 mm wide joint.

The shell sections were subjected to a 4-point bending test (Fig. 10, right) with a maximum deflection of 22 mm; the load points were se-



1 **Gradierte Bauteile: Fasergehalt 0,5 Vol.-% | Graded elements: fibre content 0.5 vol.-%**
Bauteile mit konstantem Fasergehalt 0,5...3,0 Vol.-% | Elements with constant fibre content 0.5...3.0 vol.-%

2 **Fasergehalt 0,5...3,0 Vol.-% | Fibre content 0.5...3.0 vol.-%**

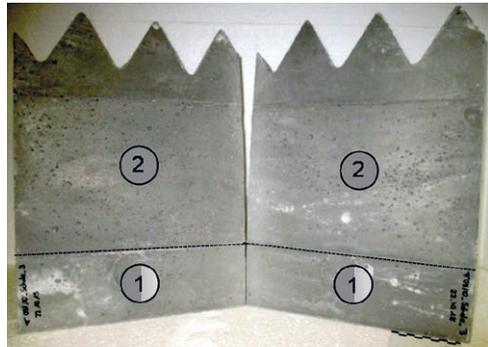
Bild 10: Schalung für gefügte Schalensegmente mit unterschiedlichen Einfüllzonen zur Realisierung der Fasergradierung (links) und Prüfung eines Schalensegments (rechts) | **Fig. 10:** Formwork for joined shell segments with different filling zones to realize fibre grading (left) and test of a shell segment (right)

Um die hohe Maßhaltigkeit insbesondere hinsichtlich der Krümmung zu erreichen, wurden die fließfähigen Betone bei nahezu geschlossener Schalung eingefüllt. Bild 10 zeigt die Herstellung (links) und Prüfung (rechts) der gefügten Schalensegmente. Es wurde ein Fugenblech, basierend auf den Erkenntnissen des TP Kohlmeier/Andrä (S. 412 ff.) eingesetzt. Dieses stellte sicher, dass nach dem Ausschalen beide Segmente exakt gefügt werden konnten.

Die Schalensegmente (vgl. Bild 11) wurden im Alter von 5 d für 2 d bei 90 °C wärmebehandelt, um die Festigkeitsentwicklung zu beschleunigen. Anschließend wurden die Fugenflächen der Segmente sandgestrahlt, was nach [15] den Haftverbund erhöht. Für die Verfüllung der 3 mm breiten Fuge wurde ein Hochfestmörtel HF10 der Fa. Pagel [16] verwendet.

Für die Prüfung wurden die Schalenabschnitte im 4-Punkt-Biegeversuch (Bild 10, rechts) mit 200 mm Abstand der Einzellasten weggeregelt mit 0,3 mm/min bis zu einer Durchbiegung von 22 mm belastet. Mit den gradierten Schalensegmenten konnte jeweils das gleiche Lastniveau erreicht werden wie bei den ungradierten, Bild 12. So stiegen die maximal aufnehmbaren Kräfte bei Erhöhung des Fasergehalts im Fugenbereich bei gradiertem bzw. im gesamten Bauelement bei ungradiertem Ausführung gleichermaßen von 0,5 auf 3,0 Vol.-% von 110 kN auf 139 kN. Werden nun die in den jeweiligen Schalenabschnitten insgesamt eingesetzten Fasergehalte auf einen ungradierten Schalenabschnitt mit 3,0 Vol.-% Fasern bezogen, zeigt sich, dass mit den gradierten Schalenabschnitten eine Einsparung von kosten- und energieintensiven Mikrostahtfasern von bis zu 21 % (0,5 / 3,0 Vol.-% – 3,0 / 3,0 Vol.-%) möglich ist.

Im Kontext eines gesamten Schalentragswerks sind die Einsparungen noch wesentlich höher, da die Fugenbereiche im Vergleich zum gesamten Tragwerk einen weit geringeren Anteil haben als bei den hier durchgeführten Bauteilversuchen. In Bild 12 ('gradiertes Tragwerk') ist dies exemplarisch unter der Annahme eines Fugenanteils von 50 % dargestellt. So können



- 1
Gradierte Bauteile: Fasergehalt 0,5 Vol.-% | Graded elements: fibre content 0.5 Vol.-%
Bauteile mit konstantem Fasergehalt 0,5 bis 3,0 Vol.-% | Elements with constant fibre content 0.5 to 3.0 Vol.-%
- 2
Fasergehalt 0,5 bis 3,0 Vol.-% | Fibre content 0.5 to 3.0 Vol.-%

Bild 11: Schalensegmente vor dem Fügen | Fig. 11: Shell segments before joining

pared by 200 mm and the deflection rate controlled at 0.3 mm/min. The same general load level was achieved with the graded shell sections as for those without fibre grading, Fig. 12. The maximum force increased from 110 to 139 kN with fibre content (0.5 to 3.0 vol.%) in the joint region of the shell section with fibre grading as well as for the sections without fibre grading. If the fibre contents used in the shell sections are related to an ungraded shell

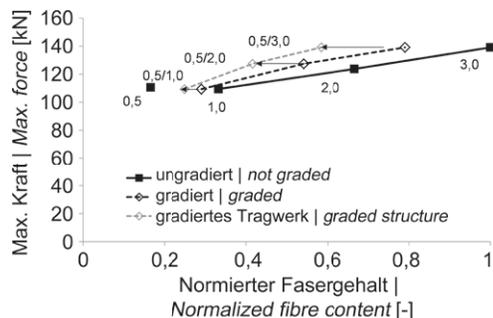


Bild 12: Maximale Kraft von gradierten und ungradierten Schalenabschnitten in Abhängigkeit des Fasergehaltes (bez. auf 3,0 Vol.-% ungradiert) | Fig. 12: Maximum force of graded and ungraded shell sections as a function of fiber content (referred to 3.0 vol.-% not graded)

über 40 % an Mikrostahtfasern eingespart werden, wenn im restlichen Querschnitt statt 3,0 Vol.-% nur 0,5 Vol.-% eingesetzt werden. Auch im Hinblick auf die Kosten der Mikrostahtfasern an den Stoffkosten des Betons (bei 3,0 Vol.-% Fasern mit 82 % der Gesamtkosten) ist eine beanspruchungsgerechte Gradierung des Fasergehaltes zielführend.

6 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse zur Herstellung effizienter Schalentragerwerke

Es wurde gezeigt, dass sowohl NB als auch UHFB zur Herstellung von Schalentragerwerken infrage kommen – je nachdem, ob ästhetische/ökonomische oder ökologische Anforderungen im Vordergrund stehen. Ferner wurde gezeigt, dass die Zusammensetzung des Betons und die eingesetzten Fasern aufeinander abgestimmt sein müssen, um eine ausreichende Formfüllung des Betons zu erreichen. Da die Erhöhung des Fasergehaltes zu einer Verschlechterung von Fließgrenze und Viskosität und somit der Formfüllung führt, müssen die zunächst faserfreien Betone eine möglichst geringe Viskosität aufweisen, sodass durch die spätere Faserzugabe für die Optimierung der Biegezugfestigkeit eine möglichst große Verarbeitbarkeitsspanne bleibt. Die untersuchten Betone zeigten bis zu einer Viskosität von $130 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ optimale Formfüllungseigenschaften.

Mit der Entwicklung einer Methode zur Vorhersage der Fließeigenschaften mithilfe der numerischen Strömungsmechanik wurde eine weitere wichtige Grundlage für die zielgerechte Herstellung von effizienten Betonfertigteilen geschaffen.

Durch eine funktionale Gradierung des Fasergehaltes zur Anpassung der Festigkeit an die jeweils vorherrschende Beanspruchung kann die Effizienz weiter gesteigert werden. Die Grundlagen hierzu wurden durch Rotationsuntersuchungen geschaffen, mit deren Ergebnis dynamische Stabilitätskriterien für beliebige Betone und Fasern ermittelt werden können und so der

section with 3.0 vol.% fibres, it becomes apparent that fibre grading can save up to 21% (0.5 / 3.0 vol.% to 3.0 / 3.0 vol.%) expensive and energy-intensive micro steel fibres.

Considering the shell structure as a whole, the savings are much higher because the proportion of joint regions in the whole structure is much lower than in the present tests. This is demonstrated, for example, in Fig. 12 ('graded structure') for 50% joint regions. More than 40% of micro steel fibres can be saved if the remaining cross section contains only 0.5 vol.% instead of 3.0 vol.% fibres. Since a high proportion of the cost of concrete is for micro steel fibres (82% in the case of 3.0 vol.% fibres), tailoring fibre grading to strength is very cost-effective.

6 Summary of main findings for producing efficient shell structures

It was shown that both normal concrete and UHFB can be used for the production of shell structures – depending on the particular aesthetic/economic or ecological requirements. It is also shown that the composition of the concrete and the fibres used must be matched in order to obtain a satisfactory degree of formwork filling with the fresh concrete. Since increasing the fibre content worsens yield stress and viscosity and therefore the degree of formwork filling, the initial concrete without fibres must have the lowest possible viscosity so that workability after fibre addition for optimising flexural strength is acceptable. Viscosities of up to $130 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ for the tested concretes enabled optimal mould-filling properties.

The development of a method to predict fresh concrete flow using numerical fluid mechanics provides a basis for the targeted production of efficient precast concrete components.

Efficiency is increased by functional grading the fibre content of concrete to optimise strength to the real stress distribution in the concrete component. The basis for this was created in tests with rotation whose results enable the determi-

gradierte Bereich vorab festgelegt werden kann. Versuche an großformatigen Bauteilabschnitten haben gezeigt, dass die Gradierung des Fasergehaltes zu einem gleichwertigen Tragverhalten im Vergleich zu Bauteilabschnitten mit konstant hohem Fasergehalt führt und so ökologische und ökonomische Vorteile mit sich bringt.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198068157 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

nation of dynamic stability criteria for any given concrete with fibres and the specification of the graded region in advance.

Tests on large-scale component sections have shown that the load-bearing behaviour of concrete with fibre grading is equivalent to that of component sections with a constant ungraded fibre content. Thus fibre grading is ecologically and economically advantageous.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (no. 198068157) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Breitenberger, M.; Bletzinger, K.-U.: Entwerfen, Berechnen und Optimieren von Betonschalen mit der isogeometrischen B-Rep-Analyse. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 236–241 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171462>
- [2] Stengel, T.: Verbundverhalten und mechanische Leistungsfähigkeit von Stahlfasern in ultrahochfestem Beton. Diss., TU München, 2013
- [3] Illguth, S.; Gehlen, C.; Lowke, D.: Ultra High Strength Fibre-Reinforced Concrete for Thin-Walled Precast Elements. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Annual Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), Beitrag Nr. IASS2015-523421, publiziert auf USB-Stick: 11 S.
- [4] Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Faserbewehrter Ultrahochfester Beton für filigrane Bauteile. In: Ludwig, H.-M. (Hrsg.): Tagungsband zur 19. Int. Baustofftagung ibausil, 16.–18.09.2015 in Weimar, Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, 2015, S. 1.1311–1.1318
- [5] Stengel, T.; Schiessl, P.: Sustainable with UHSC – from Life Cycle Inventory Data Collection to Environmental Impact Assessment. In: Fehling, E.; Schmidt, M.; Stürwald, S. (Hrsg.): Proc. of 2nd Int. Symp. on UHSC, 05.–07.03.2008 in Kassel, Kassel: kassel university press, 2008, S. 461–468
- [6] Fehrenbach, A.: Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Biegezugfestigkeit ultrahochfester Betone. Bachelor's Thesis, TU München, 2015
- [7] Weger, D.: Untersuchungen zum Einfluss rheologischer Eigenschaften auf die Gradierung von Stahlfasern mithilfe von Carbopol-Gelen. Master's Thesis, TU München, 2013
- [8] Behounek, B.: Untersuchungen zum Einfluss rheologischer Eigenschaften auf die Gradierung von Glaskugeln mithilfe von Carbopol-Gelen. Bachelor's Thesis, TU München, 2015
- [9] Jossic, L.; Magnin, A.: Drag and Stability of Objects in a Yield Stress Fluid. *AIChE Journal* 47 (2001) 12, S. 2666–2672
- [10] Klein, N.: Erste Untersuchungen zur Rotationsgradierung von Faserbeton. Bachelor's Thesis, TU München, 2013
- [11] Kränkel, T.; Mazanec, O.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Anwendungsorientierte Optimierung und Klassifizierung der rheologischen Eigenschaften von UHPC – Rheologie, Verarbeitungseigenschaften und Formfüllung. Ergebnisbericht zum DFG-Vorhaben GE 1973/8-1, TU München, 2014, 10 S.
- [12] Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Zum Formfüllungsvermögen dünnwandiger Schalungen – Experiment und Simulation. In: Förderverein-Baustoff-Forschung e.V. (Hrsg.): Tagungsband zum 12. Münchener Baustoffseminar am 27.03.2014, München: cbm, 2014, S. 35–40
- [13] Chhabra, R. P.; Richardson, J. F.: *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology – Engineering Applications*. 2. Aufl., IChemE series, Butterworth-Heinemann, 2008 – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8532-0.X0001-7>

- [14] Winkler, L.: Einfluss der Fasergradierung auf die Bauteiltragfähigkeit von gefügten Schalenabschnitten. Master's Thesis, TU München, 2016
- [15] Oltra, J. V. C.: Einfluss von Beton- und Herstelltechnologie auf die Haftzugfestigkeit von faserbewehrten ultrahochfesten Betonen. Bachelor's Thesis, TU München, 2015
- [16] PAGEL Spezial-Beton GmbH & Co. KG: Technisches Merkblatt 0221 HF10 PAGEL-HOCHFESTVERGUSS. Online: www.pagel.com/all/pdf/de/hf10_de.pdf (geprüft am 30.07.2019)

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1, 2, 7, 8, 12: Sandy Illguth
- Bild | Picture 3: TU München, Fakultät für Chemie
- Bilder | Pictures 4, 9: Sandy Illguth, Dirk Lowke
- Bild | Picture 5 (oben | top): Benedikt Behounek
- Bilder | Pictures 5 (unten | below), 6: Daniel Weger
- Bild | Picture 10: Lisa Winkler, Sandy Illguth
- Bild | Picture 11: Lisa Winkler

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Funktionale Gradierung, Schalungs- und Herstelltechnologie unter Berücksichtigung der Segmenttopologie | Functional grading, formwork and manufacturing technology with consideration of segment topology

Antragsteller Applicant :	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen Professor und Lehrstuhlinhaber Professor and chair holder
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	GE 1973/8-1 (Projektnummer Project number: 198068157)
Adresse Address:	TU München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Baumbachstraße 7, 81245 München
Kontakt Contact:	+49 890 289 27061 gehlen@tum.de www.bgu.tum.de/cbm
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	10/2011–09/2014 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 30.06.2015
Team Team:	Sandy Illguth Thomas Kränkel (2014/15) Dirk Lowke

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Rheology of Fibre Reinforced Fine-Grained High Performance Concrete for Thin-Walled Elements – Effect of Type and Content of Steel Fibres. In: Roussel, N.; Bessaies-Bey, H. (Hrsg.): Proc. of the 1st Int. RILEM Conf. on Rheology and Processing of Construction Materials and the 7th RILEM Conf. on Self-Compacting Concrete, 02.–04.09.2013 in Paris (Frankreich), Paris: RILEM Publications SARL, 2017, S. 309–316
- Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Zum Formfüllungsvermögen dünnwandiger Schalungen – Experiment und Simulation. In: Förderverein-Baustoff-Forschung e.V. (Hrsg.): Tagungsband zum 12. Münchener Baustoffseminar am 27.03.2014, München: cbm, 2014, S. 35–40
- Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Effiziente Schalenträgerwerke aus funktional gradierten Betonfertigteilen – Funktionale Gradierung, Schalungs- und Herstelltechnologie unter Berücksichtigung der Segmenttopologie. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 152–161 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171462>
- Illguth, S.; Gehlen, C.; Lowke, D.: Ultra High Strength Fibre-Reinforced Concrete for Thin-Walled Precast Elements. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Annual Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), Beitrag Nr. IASS2015-523421, publiziert auf USB-Stick: 11 S.

- Illguth, S.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Faserbewehrter Ultrahochfester Beton für filigrane Bauteile. In: Ludwig, H.-M. (Hrsg.): Tagungsband zur 19. Int. Baustofftagung ibausil, 16.–18.09.2015 in Weimar, Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, 2015, S. 1.1311–1.1318

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Masterarbeiten | Master's Theses

- Faulenbach, N.: Ökologische Bewertung von Schalentragwerken. 2013
- Weger, D.: Untersuchungen zum Einfluss rheologischer Eigenschaften auf die Gradierung von Stahlfasern mithilfe von Carbopol-Gelen. 2013
- Winkler, L.: Einfluss der Fasergradierung auf die Bauteiltragfähigkeit von gefügten Schalenabschnitten. 2016

Bachelorarbeiten | Bachelor's Theses

- Klein, N.: Erste Untersuchungen zur Rotationsgradierung von Faserbeton. 2013
- Arnold, T.: Untersuchungen zur Biegezugfestigkeit von stahlfasergradierten Balken. 2015
- Behounek, B.: Untersuchungen zum Einfluss rheologischer Eigenschaften auf die Gradierung von Glaskugeln mithilfe von Carbopol-Gelen. 2015
- Fehrenbach, A.: Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Biegezugfestigkeit ultrahochfester Betone. 2015
- Oltra, J. V. C.: Einfluss von Beton- und Herstelltechnologie auf die Haftzugfestigkeit von faserbewehrten ultrahochfesten Betonen. 2015

Additive Fertigung frei geformter Betonbauteile durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen | Additive manufacturing of free formed concrete elements by selective binding with calcium silicate based cements

► Daniel Weger¹, Daniel Talke², Dirk Lowke¹, Klaudius Henke², Christoph Gehlen¹, Stefan Winter²

► ¹ Centrum für Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Technische Universität München

► ² Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion (hb), Technische Universität München

1 Motivation

Die additive Fertigung erlaubt ein bisher nicht gekanntes Maß an geometrischer Freiheit bei der Gestaltung von Bauteilen. In der Medizin- und Dentaltechnik wird die additive Fertigung beispielsweise eingesetzt, um an die individuelle Anatomie des Patienten angepasste Prothesen und Implantate herzustellen. Im Maschinenwesen ermöglicht sie den Bau von multifunktionalen und formoptimierten Bauteilen und damit eine Senkung des Materialeinsatzes bei gleichzeitiger Steigerung der Leistungsfähigkeit. In der Luft- und Raumfahrttechnik wird sie genutzt, um mittels Topologieoptimierung oder durch das Zusammenfassen von ganzen Baugruppen zu einem einzelnen Bauteil Gewicht zu sparen [1].

Diese und viele andere Beispiele zeigen, dass es mit additiver Fertigung möglich ist, hoch komplexe Unikate oder Kleinserienbauteile zu erstellen und dadurch Funktionalität und Materialökonomie gleichermaßen zu fördern. Auch für das Bauwesen, in dem Unikate die Regel sind und Komplexität oft notwendig ist, birgt die additive Fertigung ein großes Potential. Mit dieser Technik ließen sich formoptimierte Tragwerkselemente, multifunktionale

1 Motivation

Additive manufacturing allows a previously unknown degree of geometric freedom in the design of components. In medical and dental technology for example, additive manufacturing is used to produce prostheses and implants adapted to the individual anatomy of the patient. In mechanical engineering, it enables the construction of multifunctional and shape-optimized components thus reducing the amount of material used while simultaneously increasing performance. In aerospace engineering, it is used to save weight by means of topology optimization or by combining entire assemblies into a single component [1].

These and many other examples show that additive manufacturing makes it possible to create unique, highly complex components or small series, thereby promoting both functionality and material economy. Additive manufacturing also holds great potential for the construction industry, where unique components are the rule and complexity is often necessary. With this technique, shape-optimized structural elements, multifunctional elements of the building envelope or individual formwork elements of high geometric complexity can

Elemente der Gebäudehülle oder individuelle Schalungselemente von hoher geometrischer Komplexität herstellen. Während jedoch die additive Fertigung in vielen Branchen bereits zum Stand der Technik gezählt werden kann, befindet sie sich im Bereich des Bauwesens noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Es stehen weder ausreichend große Geräte für Anwendungen im Bauwesen zur Verfügung, noch können in den verfügbaren Geräten solche Materialien eingesetzt werden, die den Anforderungen an Baustoffe genügen. Es lag deshalb nahe, in einem Teilprojekt des Schwerpunktprogramms SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ die additive Fertigung mit Beton zu erforschen.

2 Ziele

Die additive Fertigung mit Beton kann mittels zweier grundsätzlich verschiedener Verfahren realisiert werden: Bei der Extrusion wird Frischbeton durch eine Düse in Strängen aufgetragen. Beim selektiven Binden wird fließfähiges Material gezielt in dünnen Schichten einer trockenen Schüttung eingebracht, wodurch diese in den Bereichen lokal verfestigt werden, wo das spätere Bauteil entstehen soll.

Da sich im Vergleich zur Extrusion das selektive Binden durch eine signifikant größere geometrische Freiheit auszeichnet, sollte in dem Projekt dieses letztere Verfahren untersucht werden. Allerdings wiesen mit selektivem Binden hergestellte Bauteile bisher erhebliche Mängel in Hinblick auf die Materialeigenschaften auf. Wesentliches Ziel des Vorhabens war es deshalb, konstruktiv relevante Werte für die Dauerhaftigkeit und die Festigkeit zu erhalten, welche denen von herkömmlich gefertigtem Normalbeton entsprechen. Dabei sollte für den Beton auf das bewährte Bindemittel Portlandzement (calciumsilikatbasierter Zement) zurückgegriffen werden und als Gesteinskörnung sollte Sand zum Einsatz kommen. Des Weiteren sollte im Projekt das selektive Binden in zwei Verfahrensvarianten parallel und vergleichend untersucht werden (Bild 1): Bei der Variante

be produced. However, while additive manufacturing is already state-of-the-art in many industries, it is still in an early stage of development in the field of civil engineering. There are neither sufficiently large devices available for applications in the building industry, nor can the available equipment be used to produce materials that meet the requirements for building materials. It was therefore sensible to research additive manufacturing with concrete in a sub-project of the Priority Programme SPP 1542 „Concrete Light“.

2 Goals

Additive manufacturing using concrete can be realized by two fundamentally different processes: In extrusion, fresh concrete is applied in strands through a nozzle. In selective binding, a liquid is applied to thin layers of a dry bulk material, thereby consolidating the areas where the concrete component is to be produced.

Compared to extrusion, selective binding offers a significantly greater geometric freedom, which is why it was chosen as the focus of this project's investigation. However, components produced with selective binding have so far shown considerable deficiencies regarding their material properties. Therefore, the main goal of the project was to obtain values for durability and strength suitable for construction purposes, comparable to conventionally produced concrete. For the concrete, regular Portland cement (calcium silicate-based cement) as a binder and sand aggregate was to be used. Furthermore, two process variants of selective binding (Fig. 1) were to be investigated in parallel and compared: In the *Selective Cement Paste Intrusion* (SPI) variant, cement paste is applied in layers of aggregate, while in the *Selective Cement Activation* (SCA) variant, water is applied in layers of a dry mixture of aggregate and cement. On this basis, the aim was to optimize processes and materials.

Selective Cement Paste Intrusion (SPI) wird Zementleim in Schichten aus Gesteinskörnung, bei der Variante *Selective Cement Activation (SCA)* wird Wasser in Schichten eines Trockengemisches aus Gesteinskörnung und Zement eingebracht. Auf dieser Grundlage galt es, Prozesse und Materialien zu optimieren.

3 Durchführung des Forschungsvorhabens (cbm/hb)

3.1 Entwicklung und Bau von Versuchsgaräten (hb)

3.1.1 Einführung

Beide der in diesem Vorhaben untersuchten Verfahren arbeiten nach demselben Schichtbauprinzip. In einem digitalen Vorprozess wird ein digitales 3D-Modell des herzustellenden Objekts virtuell in Schichten zerlegt, deren Höhen den späteren Schichtdicken im Bauteil entsprechen. Diese Informationen werden vom 3D-Drucker genutzt, um das Objekt schichtweise aufzubauen. Im physischen 3D-Druckprozess wird eine Schicht ungebundenes Trockenmaterial (SPI: lose Gesteinskörnung; SCA: Mischung aus Sand und Zement) in der gewünschten Dicke gleichmäßig auf einer Bauplattform verteilt und geglättet. Anschließend wird eine flüssige Komponente (SPI: Zementleim; SCA: Wasser) nur dort auf die trockene Schicht aufgebracht, wo das Material gebunden werden soll. Es folgen weitere Schichten Trockenmaterial und Flüssigkeitsauftrag im Wechsel, bis das gewünschte Objekt fertiggestellt ist. Abschließend muss das Bauteil vom umgebenden, nicht gebundenen Trockenmaterial befreit werden.

Für die technische Umsetzung war es erforderlich, neue Geräte zu entwickeln, die sich für die Herstellung selektiv gebundener Betonbauteile eignen. Für beide Verfahrensvarianten werden ähnliche Grundanforderungen an das Versuchsgarät gestellt. Diese sind:

- ein Bauraum mit einer schrittweise einstellbaren Höhe für die Herstellung von Schichten aus

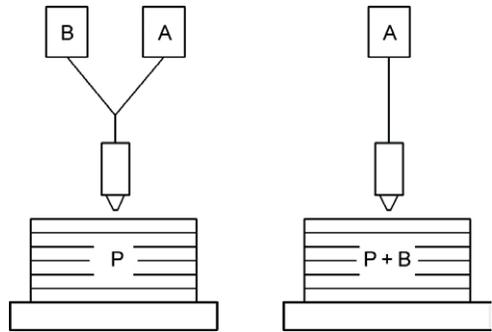


Bild 1: Verfahrensvarianten des selektives Bindens; links: *Selective Cement Paste Intrusion (SPI)* und rechts: *Selective Cement Activation (SCA)*; mit P: Partikel (Gesteinskörnung), B: Bindemittel (Zement) und A: Aktivator (Wasser) | **Fig. 1:** Process variants for selective binding; left: *Selective Cement Paste Intrusion (SPI)* and right: *Selective Cement Activation (SCA)*; with P: particles (aggregates), B: binder (cement) and A: activator (water)

3 Implementation of the research project (cbm/hb)

3.1 Development and construction of experimental equipment (hb)

3.1.1 Introduction

Both of the processes investigated in this project work according to the same layered manufacturing principle. In a digital pre-process, a digital 3D model of the object to be produced is virtually broken down into layers whose heights correspond to the later layer thicknesses in the component. This information is used by the 3D printer to build the object layer by layer. In the physical 3D printing process, a layer of unbound dry material (SPI: loose aggregate; SCA: mixture of sand and cement) of the desired thickness is evenly distributed and smoothed on a build platform. A liquid component (SPI: cement paste; SCA: water) is then applied to the dry layer only where the material is to be bound. Further layers of dry material and liquid application follow alternately until the desired object is completed. Finally, the component must be freed from the surrounding, unbound dry material.

For the technical implementation, it was necessary to develop new equipment suitable for the production of selectively bonded concrete

Trockenmaterial mit einer definierter Schichtdicke,

- Düsen mit einer geeigneten Förder- und Steuerungstechnik für den Eintrag der flüssigen Komponente in das Trockenmaterial,
- eine maschinelle Führung der Düsen mittels CNC-Technik.

3.1.2 Selective Cement Paste Intrusion (SPI)

Für die Verfahrensvariante *Selective Cement Paste Intrusion* wurde ein eigens entwickelter Bauraum ($L \times B \times H = 375 \text{ mm} \times 305 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$, Bild 2) mit einer höhenverstellbaren Bauplattform mit einem kommerziellen CNC-Portal kombiniert. Der Druckkopf besteht aus einer Einzeldüse, die an der Werkzeugaufnahme des Portals befestigt ist. Die flüssige Komponente, in diesem Fall der Zementleim, wird durch eine Schlauchpumpe gefördert. Sowohl das CNC-Portal als auch die Motoren für die Bauplattform und die Schlauchpumpe werden zusammen über eine Open-Source 3D-Drucker-Firmware gesteuert. Das Trockenmaterial (Quarzsand mit Korngrößen zwischen 0,7 und 3,2 mm) wurde bei den Versuchen mit dieser Verfahrensvariante von Hand ausgebracht und geglättet.

3.1.3 Selective Cement Activation (SCA)

Bei der Verfahrensvariante *Selective Cement Activation* kamen zwei verschiedene Versuchsgерäte zum Einsatz.

Das erste Gerät wurde speziell für die Herstellung von Prüfprismen für Materialversuche konzipiert. Es besteht aus einem Bauraum mit einer höhenverstellbaren Bauplattform, der mit einem kommerziellen CNC-Portal kombiniert ist. Als Düse kommt hier eine Flachstrahldüse mit Magnetventil zum Einsatz, mit der sich das Wasser lokal begrenzt auf die trockene Sand-Zement-Mischung auftragen lässt. Die Genauigkeit des Wasserauftrags lässt sich durch die Verwendung von Schablonen noch weiter steigern. Anders als bei der Variante SPI gestaltete sich jedoch das Ausbringen des Trockenmaterials hier als schwieriger, da die Mischung aus Sand und Zement zum Agglomerieren neigt und we-

components. For both process variants, similar basic requirements are placed on the experimental equipment. These are:

- a build chamber with a stepwise adjustable height for the production of layers of dry material with a defined layer thickness,
- nozzles with suitable fluid transport and control technology for the introduction of the liquid component into the dry material,
- an automatic control of the nozzles by means of CNC technology.

3.1.2 Selective Cement Paste Intrusion (SPI)

For the *Selective Cement Paste Intrusion* process variant, a specially developed build chamber ($L \times W \times H = 375 \text{ mm} \times 305 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$, Fig. 2) with a height-adjustable building platform was combined with a commercial CNC portal. The print head consists of a single nozzle, which is attached to the tool holder of the portal. The liquid component, in this case the cement paste, is conveyed by a peristaltic pump. The CNC portal and the motors for the building platform and the peristaltic pump are controlled together via open source 3D printer firmware. The dry material (quartz sand with grain sizes between 0.7 and 3.2 mm) was spread and smoothed by hand during the tests with this process variant.

3.1.3 Selective Cement Activation (SCA)

For the SCA process variant, two different experimental devices were used.



Bild 2: Bauraum des SPI-Druckers während des Drucks mit Einzeldüse und bedruckter Quarzsandschicht | **Fig. 2:** Build chamber of the SPI printer during printing with nozzle and printed layer

nig rieselfähig ist. Die Herstellung der Schichten per Hand führte daher zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. Aus diesem Grund wurde ein spezieller Dispenser entwickelt, mit dem die Sand-Zement-Mischung über eine Flügelwelle durch ein Sieb ausgebracht werden kann. Mittels einer Walze wird anschließend die zunächst noch lockere Materialschicht glatt abgezogen und verdichtet (Bild 3). Bei diesem Gerät wurde ebenfalls auf Open-Source-Software zurückgegriffen, mit der sich alle Komponenten des Druckers steuern lassen.



Bild 3: Dispenser für die Herstellung der Materialschicht; rechts: frisch aufgetragenes Material, links: geglättete und verdichtete Schicht | **Fig. 3:** Dispenser for creating dry material layers; right: freshly dispensed material, left: smoothed and compacted layer

Basierend auf den mit dem ersten Versuchsggerät erzielten Erkenntnissen wurde eine zweite Version entwickelt (Bild 4). In dem größeren Bau- raum mit den Abmessungen $L \times B \times H = 600 \text{ mm} \times 450 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ lassen sich mehrere Prüfkörper gleichzeitig und auch große Bauteile anfertigen. Aufgrund des damit verbundenen höheren Gewichtes der Trockenmischung wurde zum Einstellen der Schichtdicke die höhenverstellbare Bauplattform durch eine motorisierte Gleit- schalung ersetzt. Anstelle der Flachstrahldüse wurde ein spezieller Druckkopf mit zunächst 8 durch Magnetventile gesteuerte Einzeldüsen in das System integriert, mit dem das Wasser mit einer Auflösung von einem Millimeter (25,4 DPI) aufgetragen werden kann. Gesteuert wird das Gerät von einer Kombination aus kommerzieller CNC-Software und einer speicherprogrammier- baren Steuerung. Mit diesem Setup lassen sich auch freigeformte 3D-Objekte herstellen. Als Übergang zum DFG-Erkenntnistransferprojekt „Industrieller 3D-Betondruck durch selektive

The first device was specially designed for the production of material test prisms. It consists of a build chamber with a height-adjustable construction platform combined with a commercial CNC portal. The nozzle used here is a flat jet nozzle with a solenoid valve, with which the water can be applied locally to the dry sand-cement mixture. The accuracy of the water application can be further increased by using stencils. In contrast to the SPI process variant, the application of the dry material proved to be more difficult, as the mixture of sand and cement tends to agglomerate and is not free flowing. Therefore, producing the layers by hand did not lead to a satisfactory result. For this reason, a special dispenser was developed with which the sand-cement mixture can be spread through a sieve via a vane roller. A rotating shaft then smooths and compacts the initially still loose material layer (Fig. 3). This device, as well as the other components of the printer, is controlled by open source software.

A second version was developed based on the findings obtained with the first experimental device (Fig. 4). With a larger build chamber ($L \times W \times H = 600 \text{ mm} \times 450 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$), several test specimens can be produced simultaneously and large components can be manufactured. Due to the resulting increased weight of the dry mix, the height-adjustable construction platform was replaced by a motorized sliding mould to adjust the layer thickness. Instead of the flat jet nozzle, a special print head with initially 8 individual nozzles controlled by magnetic valves was integrated into the system, with which the water can be applied with a resolution of one millimetre (25.4 dpi). The device is controlled by a combination of commercial CNC software and a programmable logic controller. With this setup, it is also possible to produce freeform 3D objects. As a transition to the DFG knowledge transfer project “Industrial 3D concrete printing by selective cement activation – process, material, applications”, the device was upgraded to 32 nozzles.

During a stay abroad at the University of California in Berkeley (USA), Dirk Lowke also carried

Zementaktivierung – Verfahren, Material, Anwendungen“ wurde das Gerät auf 32 Düsen aufgerüstet.

Zusätzlich führte Dirk Lowke im Rahmen eines Auslandsaufenthaltes an der University of California in Berkeley (USA) Versuche zum Einfluss der Granulometrie auf die Festigkeit und Formtreue sowie zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Druckersysteme durch. Bei dem dort verwendeten Drucker handelte es sich um ein kommerziell erhältliches Gerät (Z Corp, ZPrinter 310) mit einem Bauraum von $L \times B \times H = 200 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ und einer Auflösung von $300 \times 450 \text{ dpi}$. Als Düsenteknologie kam hier ein Piezodüsenarray zum Einsatz, das nur wesentlich geringere Schichtdicken von 0,1 mm im Gegensatz zu den im Rahmen des SPP-Projekts entwickelten Druckersystemen zulässt.

3.2 Selective Cement Paste Intrusion (cbm)

3.2.1 Zielsetzung und durchgeführte Untersuchungen

Bei der Anwendung der SPI wird Gesteinskörnung in einem Größenbereich von 0,7 mm bis 3,2 mm für das Partikelbett verwendet. Je kleiner die Gesteinskörnung, desto größer wird der Fließwiderstand des Partikelbetts. Damit der Zementleim in das Partikelbett eindringen kann, muss dieser in Abhängigkeit der Gesteinskörnung fließfähig genug sein. Die Eindringfähigkeit wird hauptsächlich über die Rheologie (Fließgrenze und Viskosität) gesteuert. Zu beachten ist hierbei, dass der Zementleim bei zu großer Fließfähigkeit in Abhängigkeit der Dispergierung der Zementpartikel zum Entmischen neigt. Um diesen Effekt auszuschließen und grundsätzlich geeignete Zementleimkombinationen zu erhalten, wurde zunächst die Stabilität der sehr fließfähigen Zementleime untersucht (s. Abschnitt 3.2.2). Danach wurde der Einfluss der Fließgrenze auf das Eindringverhalten der Zementleime in Abhängigkeit des Fließwiderstandes der Gesteinskörnung untersucht (s. Abschnitt 3.2.3). In Abschnitt 3.2.4 wird gezeigt, dass das Eindringverhalten auch eine entscheidende Rolle für die Formtreue spielt.

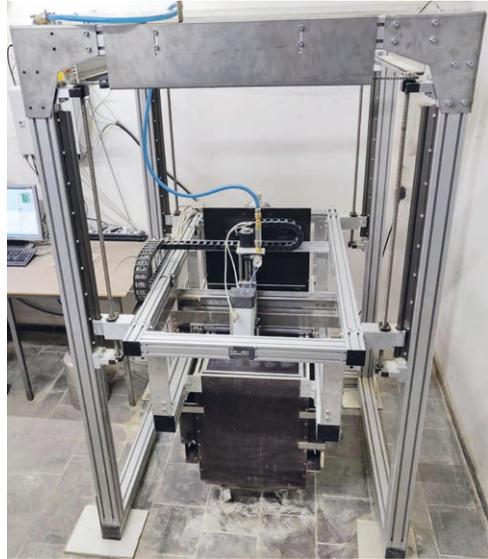


Bild 4: Prototyp des Druckers für die selektive Zementaktivierung | Fig. 4: Prototype 3D printer for selective cement activation

out experiments on the influence of granulometry on strength and dimensional stability and on the transferability of the results to other printing systems. The printer used there was a commercially available device (Z Corp, ZPrinter 310) with a build chamber of $L \times W \times H = 200 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ and a resolution of $300 \times 450 \text{ dpi}$. The nozzle technology used is a piezo nozzle array, which only allows much thinner layers of 0.1 mm in contrast to the printer systems developed within the SPP project.

3.2 Selective Cement Paste Intrusion (cbm)

3.2.1 Objectives and investigations carried out

Aggregates in a size range from 0.7 to 3.2 mm are used for the particle bed of the SPI process. The smaller the aggregate, the greater the flow resistance of the particle bed. For the cement paste to penetrate the particle bed, it must be sufficiently fluid, depending on the aggregate. Penetrability is mainly controlled by rheology (yield point and viscosity). It should be noted here that if the fluidity is too high, the cement paste tends to segregate depending on the dis-

Danach wird in Abschnitt 3.2.5 erläutert, ob sich das Material für eine Anwendung unter realen Bau- und Umgebungsbedingungen eignet (Dauerhaftigkeit) und von welchen Faktoren eine gute Festigkeit mittels SPI hergestellter Bauteile abhängig ist. Abschließend werden in Abschnitt 3.2.6 Demonstratoren gezeigt, die einen Ausblick geben, welche Auflösung und Komplexität mit den in Abschnitt 3.2.5 präsentierten Materialeigenschaften realisiert werden kann.

3.2.2 Nachweis der Stabilität fließfähiger Zementleime

Ein wichtiger Bestandteil für den Erfolg der SPI ist, die Stabilität der Zementleime über die gesamte Verarbeitungsdauer bei sehr hoher Fließfähigkeit zu gewährleisten. Hierzu wurden Blutversuche an verschiedenen Zementleimen mit w/z-Werten von 0,3, 0,4 und 0,5 sowie Ausbreitfließmaßen zwischen 300 mm und 400 mm über 180 min durchgeführt. Dazu wurden 300 ml Zementleim in 400 mm hohe Glaszylinder mit einem Durchmesser von 35 mm gefüllt und das Blutwasser zu festgelegten Zeitpunkten mithilfe eines Messschiebers bestimmt. Die Zusammensetzung der verschiedenen Zementleime können [2] und die Ergebnisse der Untersuchungen Bild 5 und [2] entnommen werden.

Zur Interpretation der Ergebnisse wurden Grenzbedingungen aus der Literatur für Beton herangezogen. Um trotzdem Schlussfolgerungen zu Ergebnissen der Zementleime ziehen zu können, wurden die Grenzwerte auf den Leimgehalt der Betonrezeptur umgerechnet. In Wagner et al. [3] ist ein Grenzwert von $3,2 \text{ kg/m}^3$ bezogen auf den Zementleim für Sichtbeton und von $9,4 \text{ kg/m}^3$ bezogen für Konstruktionsbeton angegeben. Daher wurde in Bild 5 der Bereich zwischen $3,2$ und $9,4 \text{ kg/m}^3$ als akzeptables Blutn bezeichnet. Alle untersuchten Zementleime mit Fließmittel zeigten ein akzeptables Maß an Blutwasser. Lediglich der Zementleim ohne Fließmittel mit einem w/z-Wert von 0,5 und einem Ausbreitfließmaß von 350 mm (0.5/350-no SP) erreichte kein akzeptables Maß oberhalb der Grenzwerte. Dies liegt vermutlich in dem fehlenden dispergierenden Effekt der

persion of the cement particles. In order to exclude this effect and to obtain generally suitable cement paste combinations, the stability of the free-flowing cement pastes was first examined (see Section 3.2.2). Afterwards, the influence of the yield point on the penetration behaviour of the cement paste was investigated as a function of the flow resistance of the aggregate (see section 3.2.3). Section 3.2.4 shows that the penetration behaviour also plays a decisive role for the shape accuracy. Afterwards, section 3.2.5 explains whether the material is suitable for an application under real construction and environmental conditions (durability) and which factors determine a good strength of components produced by SPI. Finally, in section 3.2.6, demonstrators are shown which give an outlook on the resolution and complexity that can be realized with the material properties presented in section 3.2.5.

3.2.2 Proof of stability of flowable cement glues

An important component for the success of the SPI is to ensure the stability of the cement pastes over the entire processing time with very high flowability. Bleeding tests were carried out on various cement pastes with w/c values of 0.3, 0.4 and 0.5 and slump flow diameters between 300 mm and 400 mm over 180 minutes. For this, 300 ml of cement paste was filled into a 400 mm high glass cylinders with a diameter of 35 mm and the bleed water was determined at specified times using a caliper gauge. The composition of the various cement pastes can be seen in [2] and the results of the tests in Figs. 5 and [2].

Boundary conditions from literature for concrete were used to interpret the results. In order to draw conclusions from the results of the cement glues, the boundary values were adjusted according to the glue content of the concrete formulation. In Wagner et al. [3] a boundary value of 3.2 kg/m^3 related to the cement paste for exposed concrete and 9.4 kg/m^3 for structural concrete is given. Therefore, in Fig. 5, the range between 3.2 and 9.4 kg/m^3 was described as acceptable bleeding. All examined cement pastes

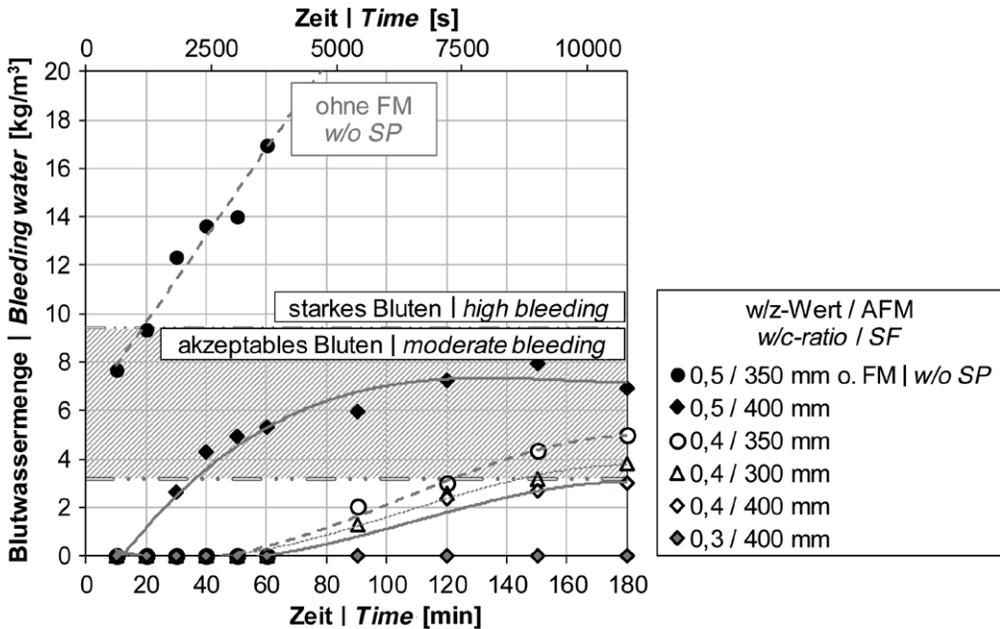


Bild 5: Untersuchung der Stabilität (Bluten) der Leime (SP = Mischungen mit Fließmittel, AFM = Ausbreitfließmaß) | Fig. 5: Stability (bleeding) of the cement pastes (SP = mixtures with superplasticizers, SF = mini slump flow)

Fließmittel begründet [4]. Von den untersuchten Leimen lagen zwei unter dem kritischen Grenzwert für Sichtbetonbauwerke von $3,2 \text{ kg/m}^3$ (0.4/400-SP und 0.3/400-SP, untere gestrichelte Linie), wobei der Leim mit einem w/z-Wert von 0,3 und einem Ausbreitfließmaß von 400 mm (0.3/400-SP) über den ganzen Untersuchungszeitraum kein Bluten zeigte und somit für die folgenden Versuche als Referenzleim festgelegt wurde.

3.2.3 Einfluss der Betontechnologie (Rheologie) auf die Eindringtiefe des Zementleims

Wird ein stabiler Zementleim verwendet, ist der Schichtenverbund (und damit die Festigkeit sowie die Dauerhaftigkeit) maßgeblich von der Eindringtiefe des Zementleims abhängig. Bei einem vollständigen Schichtenverbund sind alle Hohlräume zwischen den einzelnen Gesteinskörnern gefüllt. Wenn der Zementleim nicht vollständig in das Partikelbett eindringen kann, bilden sich Fehlstellen, s. Bilder 6 und 7, die die Festigkeit und Dauerhaftigkeit negativ beeinflussen [5].

with superplasticizer showed an acceptable level of bleeding. Only the cement paste without superplasticizer with a w/c value of 0.5 and a flow spread of 350 mm (0.5/350-no SP) did not reach an acceptable level above the limits. This is probably due to the lack of a dispersing effect of the superplasticizer [4]. Of the glues investigated, two were below the critical limit value for exposed concrete structures of 3.2 kg/m^3 (0.4/400-SP and 0.3/400-SP, lower dotted line). The glue with a w/c value of 0.3 and a flow spread of 400 mm (0.3/400-SP) showed no bleeding over the entire period of investigation and was thus defined as the reference glue for the following tests.

3.2.3 Influence of concrete technology (rheology) on the penetration depth of the cement paste

If a stable cement paste is used, the layer bond (and thus the strength and durability) depends largely on the penetration depth of the cement paste. In the case of a complete layer bond, all cavities between the individual aggregates are

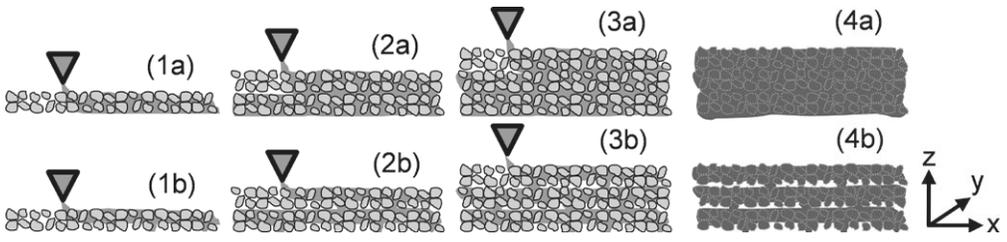


Bild 6: Produktionsprozess mit (1a)–(4a) vollständigem Schichtenverbund (Ausfüllung der Hohlräume) und mit (1b)–(4b) unvollständigem Schichtenverbund (nur teilweise Ausfüllung der Hohlräume) | **Fig. 6:** Production process with (1a)–(4a): complete bonded layers (filled voids) and (1b)–(4b): with incomplete bonded layers (only partially filled voids)

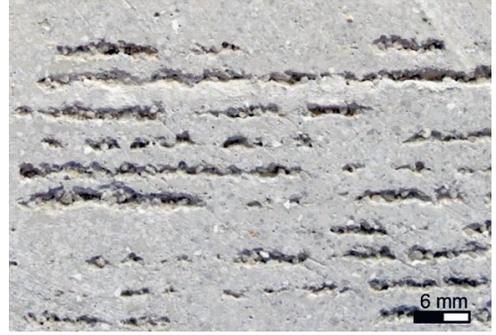


Bild 7: Querschnitt eines mit SPI gefertigten Objekts; links: mit vollständigem Schichtenverbund (Ausfüllung der Hohlräume) und rechts: mit unvollständigem Schichtenverbund (nur teilweise Ausfüllung der Hohlräume) | **Fig. 7:** Cross sections of objects produced via SPI; left: with complete bonded layers (filled voids), right: incompletely bonded layers (only partially filled voids)

Bild 8 und Untersuchungen in [2], [5]–[9] zeigten, dass die Eindringtiefe (bzw. *penetration ratio* $\Phi_{\text{pen}} = \text{Eindringtiefe} / \text{Schichtdicke}$) maßgeblich von der Fließgrenze des Zementleims und dem mittleren Durchmesser der eingesetzten Gesteinskörnung abhängig sind. Dieser Zusammenhang konnte auch analytisch in [8] nachgewiesen werden. Dabei wurde die dynamische Fließgrenze τ_0 [Pa] 10 min nach Wasserzugabe rotatorisch in einer Vane-Zelle bestimmt und mit dem Bingham-Ansatz ausgewertet [10], [11]. Dies geschah mittels der Reiner-Riwlin-Gleichung und der Annahme eines nur teilweise gescherten Spalts (*plug flow*). Des Weiteren zeigten die oben genannten Untersuchungen, dass eine ausreichende Eindringtiefe durch eine möglichst niedrige Fließgrenze erreicht wird. Zusätzlich spielt die Feuchtigkeit der Gesteinskörnung eine große Rolle [2], [6]–[8].

filled. If the cement paste cannot penetrate completely into the particle bed, defects are formed, see Figs. 6 and 7, which have a negative effect on strength and durability [5].

Fig. 8 and investigations in [2], [5]–[9] showed that the penetration depth (or penetration ratio $\Phi_{\text{pen}} = \text{penetration depth} / \text{layer thickness}$) is largely dependent on the yield point of the cement paste and the average diameter of the aggregates used. This correlation could also be analytically proven in [8]. The dynamic yield point τ_0 [Pa] was determined 10 min after water addition by rotation in a Vane cell and evaluated using the Bingham approach [10], [11]. This was done using the Reiner-Riwlin equation and the assumption of a partially sheared gap (*plug flow*). Furthermore, the investigations showed that a sufficient penetration depth is achieved by a lower yield point. In addition, the moisture content of the aggregate plays an important role [2], [6]–[8].

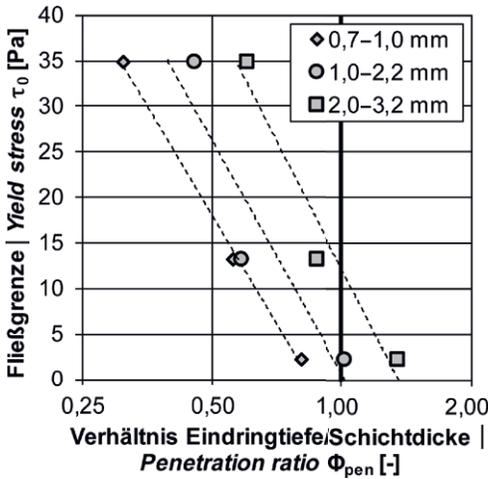


Bild 8: Verhältnis Eindringtiefe zu Schichtdicke in Abhängigkeit der Fließgrenze des Zementleims (w/z-Wert 0,35) | Fig. 8: Penetration ratio depending on the yield stress of the cement paste (w/c ratio 0.35)

3.2.4 Einfluss der Eindringtiefe auf die Formtreue

Für eine gute Formtreue muss die Fließfähigkeit (Fließgrenze) genau auf den Fließwiderstand der Gesteinskörnung eingestellt werden. Ist der Zementleim zu wenig fließfähig, dringt er nicht vollständig in den Probekörper ein (s. Bild 8). Dieser kann dann durch die darauffolgende Gesteinskörnungsschicht in Richtung der Aufbringung mit verzogen werden, s. Bild 9. Im Falle eines Zylinderquerschnitts wirkt sich dieser Effekt in einer elliptischen Verformung

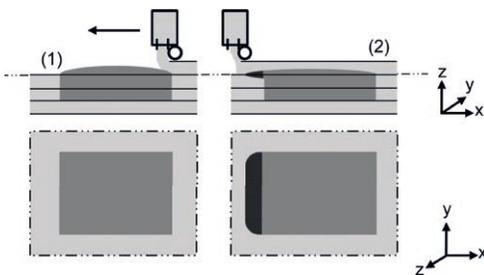


Bild 9: Einfluss der Rheologie auf die Formtreue: (1) Leim (mittelgrau) dringt nicht vollständig in das Partikelbett ein und (2) Verzug der gebundenen Schicht (dunkelgrauer Bereich) durch nicht eingedrungenen Leim | Fig. 9: Effect of rheology on the shape accuracy: (1) cement paste penetrates not completely in the particle-bed and (2) delay of the bonded layer (dark grey area) due to not penetrated cement paste

3.2.4 Influence of the penetration depth on the shape accuracy

For good shape retention, the flowability (yield point) must be adjusted exactly to the flow resistance of the aggregate. If the cement paste does not have sufficient flowability, it will not penetrate completely into the test specimen (see Fig. 8). The paste can then be distorted by the subsequent aggregate layer in the direction of application, see Fig. 9. In the case of a cylindrical cross-section, this effect results in an elliptical deformation of the cross-sectional area. In [7] it could be shown that this distortion of the cement paste increases with an increasing yield point. On the other hand, the results in [7] show that with an increasing yield point the spread of the cement paste over the nominal dimensions of the component can be counteracted (see also Fig. 10, right). This is in contradiction with a good penetration depth or a good layer bond. This situation can be counteracted by reducing the size of the body by the expected horizontal spread during the planning process.

A corresponding correlation for the rheological properties viscosity and thixotropy could not be determined. It is assumed that the differences in viscosity and thixotropy of the cement pastes used in the project were too small to be able to recognize corresponding effects in the production process, which is subject to scattering. However, the results obtained indicate that thixotro-

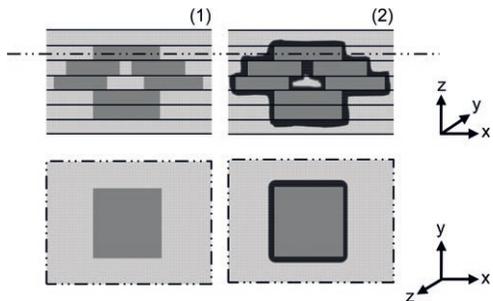


Bild 10: Einfluss der Rheologie auf die Formtreue: (1) Soll-Abmessungen des Objekts (mittelgraue Bereiche) und (2) unkontrolliertes Ausbreiten des Leims im Partikelbett (dunkelgraue Bereiche) | Fig. 10: Effect of rheology on the shape accuracy: (1) designated dimensions of the object (medium grey areas) and (2) uncontrolled penetration of the paste in the particle-bed (dark grey areas)

der Querschnittsfläche aus. U. a. in [7] konnte gezeigt werden, dass dieser Verzug des Zementleims mit steigender Fließgrenze zunimmt. Andererseits zeigen die Ergebnisse in [7], dass mit einer steigenden Fließgrenze der Ausbreitung des Zementleims über die Soll-Abmessungen des Bauteils (vgl. auch Bild 10, rechts) entgegengewirkt werden kann. Dies steht im Widerspruch mit einer guten Eindringtiefe bzw. einem guten Schichtenverbund. Diesem Sachverhalt lässt sich begegnen, indem im Planungsprozess der Körper um die erwartete horizontale Ausbreitung verkleinert wird.

Ein entsprechender Zusammenhang für die rheologischen Eigenschaften Viskosität und Thixotropie konnte bisher nicht gefunden werden. Es wird jedoch vermutet, dass die im Projekt eingesetzten Zementleime zu geringe Unterschiede in Viskosität und Thixotropie aufwiesen, um entsprechende Effekte in dem von Streuungen behafteten Produktionsprozess erkennen zu können. Jedoch geben die bisherigen Ergebnisse Hinweise darauf, dass die Thixotropie einen positiven Effekt auf die Formtreue (Ausbreitung des Zementleims über die Soll-Abmessungen) hat. Um dies nachweisen zu können, müssen weitere Untersuchungen unter dem Einsatz von Thixotropiermitteln und viskositätserhöhenden Additiven durchgeführt und die Probenanzahl zusätzlich erhöht werden, um die auftretenden Streuungen besser einschätzen zu können.

3.2.5 Einfluss des Eindringgrades und der Belastungsrichtung auf die Festigkeit und Dauerhaftigkeit

Aufgrund der guten Ergebnisse in den Untersuchungen zur Formtreue und der Blutneigung wurde für die weiteren Untersuchungen der Zementleim mit w/z-Wert 0,3 und Ausbreitfließmaß 300–400 mm verwendet. Des Weiteren wurde eine mittlere Gesteinskörnungsgröße (1,0–2,2 mm) ausgewählt, da diese sowohl eine gute Schichtendurchdringung als auch eine gute Oberflächenauflösung bietet. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse kann [5], [9] entnommen werden. Alle Untersuchungen wurden an geschalteten Probekörpern (Referenz)

py has a positive effect on shape fidelity (spread of the cement paste over the target dimensions). In order to prove this, further investigations using thixotropic agents and viscosity-increasing additives must be carried out and the number of samples must be increased in order to better estimate the scattering that occurs.

3.2.5 Influence of the degree of penetration and the load direction on strength and durability

Due to the good results in the tests on shape fidelity and bleeding, the cement paste with a w/c value of 0.3 and a spreading flow diameter of 300 to 400 mm was used for further tests. Furthermore, a medium aggregate size (1.0 to 2.2 mm) was selected, as this offers both good layer penetration and surface resolution. A detailed presentation of the results can be found in [5], [9]. All investigations were performed on cast samples (reference) and parallel (0°) as well as perpendicular to the layers (90°).

a) Compressive strength

Fig. 11 shows the compressive strength (tested in accordance with DIN EN 12390-3:2009-07 [12]) after 7 d in relation to the bulk density, which is related to the degree of filled cavities between the aggregate. The diagram shows that with increasing bulk density or filled proportion of cavities the strength for both loading directions increases as expected. Interestingly, no influence of load direction could be observed. Therefore, an almost isotropic component behaviour can be assumed. As in classical concrete construction, the strength depends on the void content. This is confirmed by the classification of the switched reference specimens (light blue circles), which are conventionally produced in the casting process and which have the same dependency. Overall, compressive strengths of up to 78 MPa after 7 d are achieved.

b) Frost resistance

The resistance against a pure freeze-thaw attack (CIF) and the intensified freeze-thaw attack

und parallel (0°) sowie senkrecht zur Schichtung (90°) durchgeführt.

a) Druckfestigkeit

Bild 11 zeigt die Druckfestigkeit (geprüft in Anlehnung an die DIN EN 12390-3:2009-07 [12]) nach 7 d bezogen auf die Rohdichte, die mit dem Grad an gefüllten Hohlräumen zwischen der Gesteinskörnung in Zusammenhang steht. Das Diagramm zeigt, dass mit steigender Rohdichte bzw. gefülltem Anteil an Hohlräumen die Festigkeit für beide Belastungsrichtungen erwartungsgemäß steigt. Interessant zu beobachten war, dass die Belastungsrichtung hierbei keinen Einfluss zeigt. Daher kann von einem nahezu isotropen Bauteilverhalten ausgegangen werden. Somit gilt wie im klassischen Betonbau, dass die Festigkeit vom Hohlraumgehalt abhängig ist. Dies wird durch die Einordnung der geschalteten, konventionell im Gießverfahren hergestellten Referenzprobekörper (hellblaue Kreise) bestätigt, die sich in derselben Abhängigkeit befinden. Insgesamt werden Druckfestigkeiten von bis zu 78 MPa nach 7d erreicht.

b) Frostwiderstand

Der Widerstand gegenüber einem reinen Frostangriff (CIF) und dem verschärften Frost-Tausalz-Angriff (CDF) wurden in Anlehnung an die DIN CEN/TS 12390-9 [13] durchgeführt. Beim CIF-Test blieben alle Ergebnisse deutlich unter dem geforderten Abnahmekriterium von maximal 1.000 g/m² nach 28 Frost-Tau-Wechseln (FTW), links in Bild 12. Die für den CIF-Test maßgebende Messung des relativen dynamischen E-Moduls ließ bei keiner der Serien auf eine innere Schädigung (relativer dynamischer E-Modul $\geq 75\%$) schließen, weder nach 28 FTW, noch nach 56 FTW [14]. Auch hier zeigen die Probekörper kein auffälliges anisotropes Verhalten.

Auch beim CDF-Test (Bild 12, rechts) blieben die Abwitterungen der einzelnen Serien auch noch nach 56 d unterhalb des lt. [14] geforderten 28-d-Grenzwerts von 1.500 g/m². Auch der dynamische E-Modul aller Probekörper bewegte sich über dem geforderten Abnahmekriterium nach

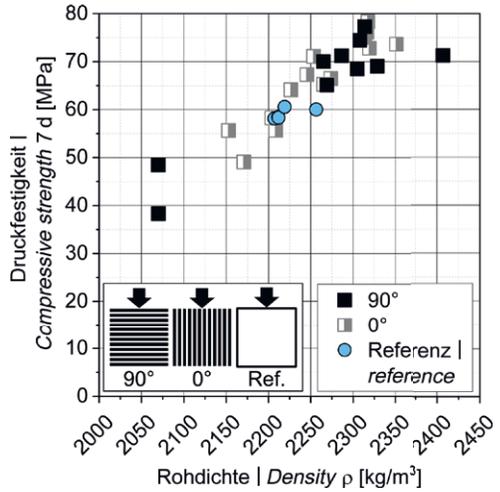


Bild 11: Druckfestigkeit nach 7 d bezogen auf die Dichte bzw. den Füllgrad der Luftporen zwischen der Gesteinskörnung | Fig. 11: Compressive strength after 7 d depending on the density and the filling of the voids between the aggregates, respectively

(CDF) was carried out in accordance with DIN CEN/TS 12390-9 [13]. In the CIF test, all results remained well below the required acceptance criterion of a maximum of 1,000 g/m² after 28 freeze-thaw cycles (FTW), left in Fig. 12. The measurement of the relative dynamic modulus of elasticity decisive for the CIF test did not indicate internal damage (relative dynamic modulus of elasticity $\geq 75\%$) in any of the series, neither after 28 FTW nor after 56 FTW [14]. Again, the test specimens do not show any noticeable anisotropic behaviour.

Even in the CDF test (Fig. 12, right), the weathering of the individual series remained below the 28-d limit of 1,500 g/m² required by [14] even after 56 d. The dynamic modulus of elasticity of all test specimens was above the required acceptance criterion of 75% according to [14]. The test specimens are therefore considered to be resistant to freeze-thaw with de-icing salt. One reason for this is probably the low w/c value of 0.3 and the relatively high void contents.

c) Carbonation resistance

In order to be able to reinforce components later on, the carbonation resistance was deter-

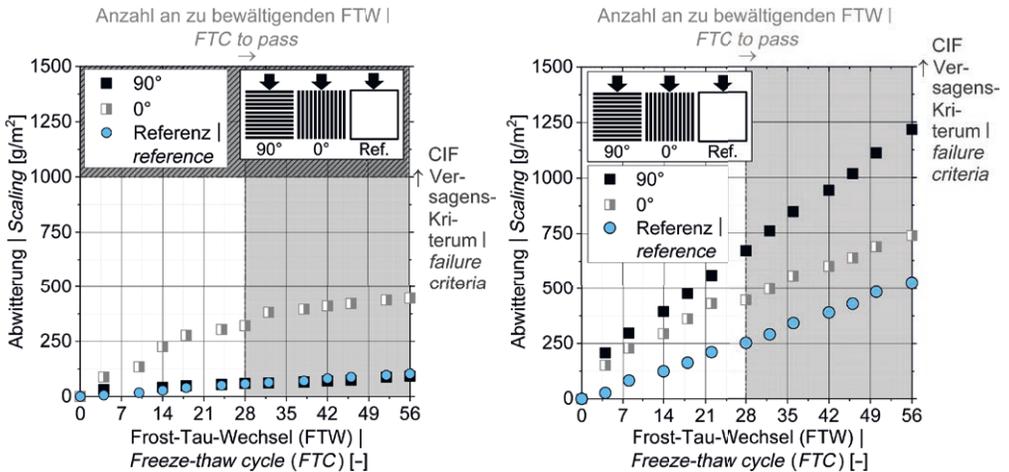


Bild 12: Frostwiderstandsprüfungen; gemittelte Abwitterungen CIF (links) und CDF (rechts), jeweils aufgetragen über die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (FTW) | **Fig. 12:** Frost resistance tests; left: average scaling CIF, and right: average scaling CDF, depending on the number of the freeze-thaw cycles (FTC)

[14] von 75 %. Somit gelten die Probekörper als Frost-Tausalz-beständig. Ein Grund hierfür liegt vermutlich in dem geringen w/z-Wert von 0,3 und den relativ hohen Hohlraumgehalten.

c) Karbonatisierungswiderstand

Um Bauteile später auch bewehren zu können, wurde der Karbonatisierungswiderstand in Anlehnung an die DIN CEN/TS 12390 [15] unter atmosphärischen Bedingungen und einem erhöhten CO₂-Gehalt von 2 % bestimmt. Die Probekörper wurden 1 d nach Herstellung aus dem Druckbett entfernt bzw. ausgeschalt und lagerten anschließend bis zum 7. Tag unter Wasser. Danach wurden die Probekörper bis zum Beginn der Prüfung bei 20°C und 65 % relativer Feuchte gelagert. Für die Prüfung unter atmosphärischen Bedingungen verblieben die Probekörper in dem entsprechenden Klima. Für die Prüfung unter erhöhter CO₂-Beaufschlagung wurden die Probekörper anschließend für 28 d bei 2 % CO₂-Konzentration gelagert.

Nach den Prüfzeiträumen wies keiner der Probekörper eine erkennbare Karbonatisierung auf. Damit eignen sich die betrachteten Betone grundsätzlich für bewehrte Bauteile. Dies kann – wie schon der hohe Frost-/Frost-Tausalz-Wider-

mined according to DIN CEN/TS 12390 [15] under atmospheric conditions and an increased CO₂ content of 2%. The test specimens were removed or stripped from the pressure bed 1 d after production and then stored under water until the 7th day. Afterwards, the specimens were stored at 20 °C and 65% relative humidity until testing. For testing under atmospheric conditions, the specimens remained in the appropriate climate. For the test under increased CO₂ exposure, the specimens were then stored for 28 d at 2% CO₂ concentration.

After the test periods, none of the test specimens showed any detectable carbonation. Thus, the concrete mixes under consideration are generally suitable for reinforced components. This can be explained by the low w/c value of 0.3, as was the case with the high freeze-thaw resistance.

3.2.6 Demonstrators (cbm/hb)

Within the scope of the research project, several small-format demonstrators were produced to demonstrate the possible achievable complexity of components when using the SPI process. Two examples are shown in the Figs. 13 and 14.

stand – mit dem geringen w/z-Wert von 0,3 begründet werden.

3.2.6 Demonstratoren (cbm/hb)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden mehrere kleinformatige Demonstratoren hergestellt, um die mögliche erreichbare Komplexität von Bauteilen bei Anwendung des SPI-Verfahrens zu demonstrieren. Zwei Beispiele sind in Bild 13 und Bild 14 zu sehen.

3.2.7 Fazit SPI

Das Ziel, die grundlegenden Mechanismen der SPI zur Beeinflussung der Formtreue und der Festigkeit zu verstehen, wurde erreicht. Dabei wurden Kenntnisse über die notwendige rheologische Beschaffenheit der Zementleime gewonnen. Es konnte gezeigt werden, dass Objekte, die mit einem w/z-Wert von 0,3 hergestellt werden, Festigkeiten von bis zu 78 MPa nach 7 d erreichen können. Ein anisotropes Verhalten der Probekörper konnte nicht festgestellt werden. Lediglich besteht der auch aus dem geschalteten Betonbau bekannte Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Festigkeit des Materials. Da die Rohdichte direkt mit dem Hohlraumgehalt der Objekte korreliert, sollte der Druckpro-

3.2.7 Summary SPI

The goal of understanding the basic mechanisms of SPI to influence shape fidelity and material strength was achieved. In the process, knowledge was gained about the necessary rheological properties of the cement pastes. It could be shown that objects produced with a w/c-ratio of 0.3 can reach strengths of up to 78 MPa after 7 d. An anisotropic behaviour of the specimens could not be determined. A correlation between the bulk density and the strength of the material was observed, which is also known from conventional formwork concrete construction. Since the bulk density correlates directly with the void content of the objects, the printing process should be designed in such a way that the voids between the rock particles are filled with cement paste as thoroughly as possible. This can be achieved by selecting suitable process parameters and ensuring that the glue has sufficient flowability (rheology). For this purpose, further experiments with specifically varied rheology and process parameters, such as filling patterns or nozzle shapes, will have to be carried out in the future.

At the same time, a sufficient durability against freeze-thaw attacks and carbonation was deter-



Bild 13: Helix, hergestellt durch *Selective Cement Paste Intrusion* | **Fig. 13:** Helix, manufactured by *Selective Cement Paste Intrusion*



Bild 14: Innen verstrebtetes Rohr, hergestellt durch *Selective Cement Paste Intrusion* | **Fig. 14:** Pipe with internal structures manufactured by *Selective Cement Paste Intrusion*

zess so gestaltet werden, dass die Hohlräume zwischen den Gesteinskornpartikeln möglichst vollständig mit Zementleim gefüllt werden. Dies kann durch die Wahl von geeigneten Prozessparametern und eine ausreichende Fließfähigkeit (Rheologie) des Leims erreicht werden. Hierzu müssen zukünftig weitere Versuche mit gezielt variierten Rheologie- und Prozessparametern, wie Füllmustern oder Düsenformen, durchgeführt werden.

Gleichzeitig wurde eine ausreichende Dauerhaftigkeit gegenüber Frost-/Frost-Tausalz-Angriffen und Karbonatisierung festgestellt. Auch hier konnte kein anisotropes Verhalten festgestellt werden. Jedoch kann im Falle der CIF/CDF-Prüfungen aufgrund der kleinen Anzahl an geprüften Probekörper noch keine belastbare Aussage getroffen werden. Hierzu müssen noch weitere Versuche mit variiertem Hohlraumgehalt durchgeführt werden.

3.3 Selective Cement Activation (cbm/hb)

3.3.1 Zielsetzung und durchgeführte Untersuchungen

Zielsetzung der Untersuchungen zur SCA war es, die prozess- und materialtechnologischen Grundlagen für eine Herstellung von Bauteilen aufzuzeigen. Aufgrund der Herstellungstechnologie müssen zunächst andere Aspekte als bei der SPI grundlegend untersucht werden. Für eine gute Festigkeit und Formtreue kommt es vor allem auf eine gleichmäßige Durchdringung der Schichten des Partikelbetts durch den Aktivator – das Wasser – an. Zusätzlich spielt bei einer drucklosen Beaufschlagung des Partikelbetts mit Wasser über Flachstrahldüsen (eigens gebauter Versuchsdrucker, s. Abschnitte 3.3.2 und 3.3.4) oder Piezodüsen (Versuchsdrucker verwendet in den USA, Abschnitt 3.3.3) die Beschaffenheit des Partikelbetts eine wichtige Rolle. Die Einflussfaktoren des Bindergehalts (Zement) sowie die Verteilung des Wassers im Partikelbett werden in Abschnitt 3.3.2 betrachtet. Ebenfalls bedeutend für die Festigkeit, aber auch die Formtreue ist die Granulometrie des Partikelbetts, wie in Abschnitt 3.3.3 gezeigt.

mined. Again, no anisotropic behaviour could be observed. However, in the case of CIF/CDF tests, no reliable statement can be made due to the small number of test specimens. Further tests with varying void content must be carried out.

3.3 Selective Cement Activation (cbm/hb)

3.3.1 Objectives and investigations

The aim of the SCA investigations was to show the process and material technological fundamentals for the production of components. Due to the manufacturing technology, other aspects than those of SPI must first be fundamentally investigated. For good strength and shape retention, a uniform penetration of the particle bed layers by the activator, water, is particularly important. In addition, when the particle bed is exposed to water without pressure via flat jet nozzles (specially built test printer, see sections 3.3.2 and 3.3.4) or piezo nozzles (test printer used in the USA, section 3.3.3), the properties of the particle bed plays an important role. The influencing factors of the binder content (cement) as well as the distribution of water in the particle bed are considered in section 3.3.2. The granulometry of the particle bed, as shown in Section 3.3.3, is also important for the material strength, but also for the shape accuracy. In addition, the effects of a post-treatment on the material strength of the specimens are discussed in section 3.3.4. Furthermore, in section 3.3.5 process technological influences on the shape fidelity are shown. Finally, the potential of complex construction using SCA is demonstrated using sample objects (see section 3.3.6).

3.3.2 Influence of cement and water content on strength (cbm)

In order to test the influence of binder and water content on the material strength, prisms with a layer thickness of 1 mm and w/c values between 0.12 and 0.85 were produced using a flat jet nozzle and a printer specially built for this project. The cement content in the particle bed was varied between 20 and 40 % by volume. A calcium

Zusätzlich werden in Abschnitt 3.3.4 die Auswirkungen einer Nachbehandlung auf die Festigkeit der Probekörper behandelt. Des Weiteren werden in Abschnitt 3.3.5 prozesstechnologische Einflüsse auf die Formtreue aufgezeigt. Abschließend wird wiederum das Potential des komplexen Bauens mittels der SCA anhand von Beispielobjekten demonstriert (siehe Abschnitt 3.3.6).

3.3.2 Einfluss des Zement- und Wassergehaltes auf die Festigkeit (cbm)

Um den Einfluss von Binder- und Wassergehalt auf die Festigkeit zu überprüfen, wurden mittels einer Flachstrahldüse und eines eigens für dieses Vorhaben gebauten Druckers Prismen mit einer Schichtdicke von 1 mm und w/z-Werten zwischen 0,12 und 0,85 hergestellt. Dabei wurde der Zementgehalt im Partikelbett zwischen 20 und 40 Vol.-% variiert. Es wurde ein Calciumaluminatzement verwendet. Als Sand wurde ein Quarzsand mit einem Größtkorn von 0,5 mm mit 80 bzw. 60 Vol.-% zugegeben.

In Bild 15 ist beispielhaft die Druckfestigkeit von Prismenhälften mit einer Druckfläche von 40 mm² und einer Höhe von 40 mm als Mittelwert aus 6 Proben im Alter von 7 d in Abhängigkeit des w/z-Wertes dargestellt. Den gleichen Zusammenhang zeigten auch auf Biegezug getestete Probekörper. Im Diagramm werden sowohl Ergebnisse mit einem Zement/Gesteinskörnungs-Verhältnis von 20/80 Vol.-% (Dreiecke: S.A.20-80) als auch 40/60 Vol.-% (Quadrate: S.A.40-60) dargestellt. Die unterschiedlichen w/z-Werte wurden durch eine Variation der Fahrgeschwindigkeit der Düse erreicht. Je höher der w/z-Wert, desto langsamer bewegte sich das Portal.

Die 7-d-Druckfestigkeit der Probekörper bewegt sich zwischen 5,3 und 16,4 N/mm² bei vergleichbarer Dichte. Auffällig ist, dass der übliche Zusammenhang einer steigenden Festigkeit mit fallendem w/z-Wert nicht gegeben ist. Die Festigkeit der durch selektive Zementaktivierung hergestellten Proben steigt im untersuchten Bereich mit zunehmendem w/z-Wert. Vermut-

aluminat cement was used and a quartz sand with a maximum grain size of 0.5 mm was added with 80 and 60 % by volume, respectively.

Fig. 15 shows an example of the compressive strength of prism halves with a compression area of 40 mm² and a height of 40 mm as an average value of 6 samples at the age of 7 d as a function of the w/c value. Specimens tested for bending tensile strength showed the same correlation. The diagram shows results with a cement/rock ratio of 20/80 vol% (triangles: S.A.20-80) as well as 40/60 vol% (squares: S.A.40-60). The different w/c values were achieved by varying the speed of the nozzle. The higher the w/c value, the slower the portal moved.

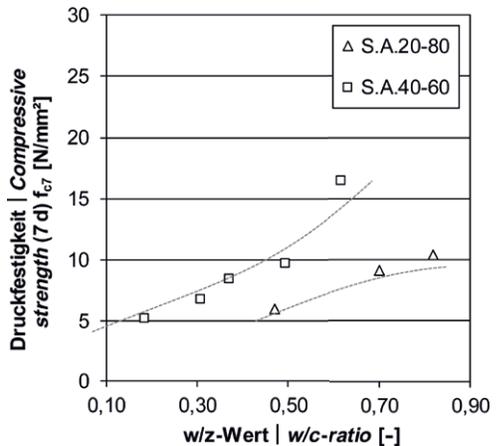


Bild 15: 7-d-Druckfestigkeit in Abhängigkeit des w/z-Wertes bei variierenden Zement/Gesteinskörnungs-Verhältnissen bei vergleichbarer Rohdichte (Schichtdicke 1 mm) | Fig. 15: Compressive strength after 7 d depending on the w/c-ratio with varying cement/aggregate ratio but similar density (layer thickness 1 mm)

The 7-d compressive strength of the test specimens ranges between 5.3 and 16.4 N/mm² at comparable density. It is noticeable that the usual correlation between increasing strength and decreasing w/c value is not given. The strength of the specimens produced by selective cement activation increases with increasing w/c ratio. Presumably, a better penetration of water into the layers with increasing water content results in an improvement of the layer bond. Due to the fine spraying of the nozzle, the water hits the surface of the dry material as a fog-like film.

lich kommt es dabei mit zunehmendem Wassergehalt zu einer besseren Durchdringung der Schichten mit Wasser, was eine Erhöhung des Schichtenverbundes zu Folge hat. Durch die feine Zerstäubung der Düse trifft das Wasser als nebelartiger Film auf die Oberfläche des Trockenmaterials auf. Rechnerisch kann gezeigt werden, dass es sich bei den geringen Wassermengen nicht um ein Fließen des Wassers in einem porösen Medium gemäß dem Darcy-Gesetz handelt. Vielmehr wird die Wasserverteilung durch Adsorption an den Partikeloberflächen und kapillares Saugen gesteuert. Ist die auftreffende Wassermenge zu gering, wird diese vom Trockenmaterial zwar aufgesogen, kann die Schicht aber nicht über die gesamte Höhe homogen durchdringen. In der Folge bleiben nicht ausreichend hydratisierte Bereiche in tieferen Bereichen der Schicht zurück, was eine Schwächung des Schichtenverbunds zur Folge hat. Insbesondere bei geringen w/z-Werten waren im gespaltenen Querschnitt die weniger hydratisierten Bereiche durch noch ungebundenes Material deutlich zu erkennen. Erst bei höheren w/z-Werten kann durch die größere Wassermenge die Schicht vollständig durchdrungen werden, wodurch auch im unteren Bereich der Schicht ausreichend Wasser für die Hydratationsreaktion zur Verfügung steht und folglich ein höherer Schichtenverbund erreicht werden kann.

Um diese Hypothese zu belegen, wurde die Wasserverteilung stichprobenartig in den additiv hergestellten Proben mittels ¹H-NMR quantifiziert, vgl. Bild 16. Die Ergebnisse bestätigen den zuvor beschriebenen Mechanismus und zeigen eine deutliche Streuung des Wassergehalts – einen hohen Wassergehalt im Bereich der Schichtengrenzen und einen deutlich geringeren Wassergehalt zwischen ihnen. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse kann [6], [16] entnommen werden.

3.3.3 Einfluss der Granulometrie auf die Festigkeit und Formtreue (cbm)

Im Hinblick auf die Wasserverteilung innerhalb der Schichten und damit auf den Schichten-

Mathematically it can be shown that the small amounts of water are not a flow of water in a porous medium according to Darcy's law. Rather, the water distribution is controlled by adsorption on the particle surfaces and capillary suction. If the amount of water is too small, it is absorbed by the dry material, but cannot penetrate the layer homogeneously over the entire height. As a result, insufficiently hydrated areas remain in deeper areas of the layer, which results in a weakening of the layer bond. Especially at low w/c values, the less hydrated areas were clearly visible in the split cross section due to still unbound material. Only at higher w/c values can the water penetrate the layer completely, thus guaranteeing sufficient water for the hydration reaction even in the lower areas of the layer and consequently a better layer bond.

To prove this hypothesis, the water distribution was randomly quantified in the additive prepared samples using ¹H-NMR, see Fig. 16. The results confirm the mechanism described above and show a clear scattering of the water content – a high water content in the area of the layer boundaries and a significantly lower water content between them. A detailed presentation of the results can be found in [6], [16].

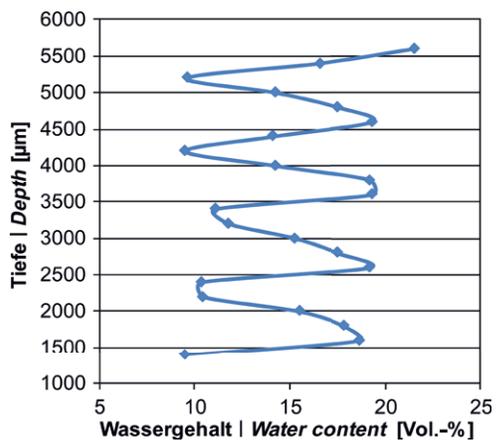


Bild 16: Mittels ¹H-NMR-Spektroskopie bestimmte Wasserverteilung in einem Probekörper mit 1 mm Schichtdicke (die Tiefe auf der y-Achse entspricht dabei der Messtiefe und nicht genau den Schichtgrenzen der Probe) | Fig. 16: Water distribution within a printed specimen with a layer thickness of 1 mm determined by using ¹H-NMR spectroscopy (the depth on the y-axis describes the measuring depth and not exactly the layer boundaries)

verbund spielt die Granulometrie der Partikelpackung eine wesentliche Rolle. Daher (und um eine Übertragung der Theorie auf andere Druckersysteme zu ermöglichen) wurde in weiterführenden Untersuchungen der Einfluss der Granulometrie auf die Festigkeit von additiv mit einem kommerziell erhältlichen Drucker hergestellten Proben untersucht [17]. Diese Versuche wurden im Rahmen eines Gastaufenthalts von Dirk Lowke im Wintersemester 2016/17 an der University of California in Berkeley (USA) durchgeführt. Die Beschreibung des Gerätes ist in Abschnitt 3.1.3 zu finden. In Bild 17 sind die Druckfestigkeiten nach 35 Tagen bei einem Verhältnis von Calciumsulfoaluminatzement zu Gesteinskörnung von 40 zu 60 Vol.-% in Abhängigkeit des w/z-Werts bei Variation der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung (Quarzsand mit $d_{max} = 200, 350$ bzw. $500 \mu\text{m}$) dargestellt. Die Schichtdicke betrug bei diesen Versuchen jeweils $0,1 \text{ mm}$. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Durchmesser der Gesteinskörnung eine Erhöhung der Festigkeit einhergeht. Ursächlich hierfür sind die mit zunehmender Partikelgröße a) abnehmende spezifische Partikeloberfläche und b) die zunehmenden Porengrößen. Dies hat eine Verringerung der Adsorption des applizierten Wassers zur Folge, wodurch das Wasser in der Lage ist, tief in die Schicht einzudringen. Als Resultat werden der Schichtenverbund und damit die Festigkeit erhöht.

Neben den mechanischen Eigenschaften bestimmt die Granulometrie gleichzeitig die Formtreue der additiv hergestellten Proben. In Bild 18 ist der Einfluss der Korngrößenverteilung auf den Kennwert der Formtreue (links) und die visuelle Erscheinung der Proben (Fotos rechts) dargestellt. Die Formtreue ist hier definiert durch den Quotienten der Breite an der Würfeloberseite zur Soll-Breite von 40 mm . Demnach nimmt die Formtreue erwartungsgemäß mit zunehmendem w/z-Wert ab. Es ist aber auch deutlich zu sehen, dass die Formtreue bei grobkörnigeren Partikelpackungen schlechter ist, vgl. rechts unten. Besonders groß ist die Formabweichung im unteren Bereich der Probekörper mit der typischen Ausbildung eines Fußes. Dieser könnte aus einer vertikalen Set-

3.3.3 Influence of granulometry on strength and shape accuracy (cbm)

The granulometry of the particle packing plays an important role with regard to the water distribution within the layers and thus the layer bonding. For this reason (and to enable a transfer of the theory to other printer systems), the influence of granulometry on the strength of samples produced with a commercially available printer was investigated in further investigations [17]. These experiments were carried out during a guest stay of Dirk Lowke in the winter semester 2016/17 at the University of California in Berkeley (USA). The description of the device can be found in Section 3.1.3. Fig. 17 shows the compressive strengths of calcium sulfoaluminate cement and quartz sand (ratio: 40 to 60% by volume) after 35 days as a function of the w/c value with variation of the aggregate particle size distribution (quartz sand with $d_{max} = 200, 350$ or $500 \mu\text{m}$). The layer thickness in these tests was 0.1 mm in each case. It can be seen that an increase in strength is associated with an increase in the diameter of the aggregate. This is due to the fact that with increasing particle size a) the specific particle surface decreases and b) the pore sizes increase. This results in a reduction in the adsorption of the applied water, which enables the water to penetrate deep into the layer. As a result, the layer bonding and thus the strength are increased.

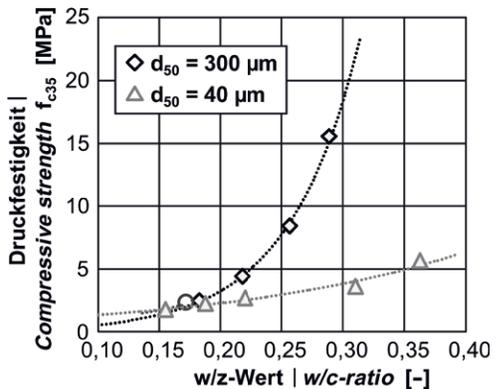


Bild 17: 35-d-Druckfestigkeit und Formtreue in Abhängigkeit des w/z-Werts bei variierendem mittlerem Korndurchmesser der Gesteinskörnung d_{50} , Schichtdicke $0,1 \text{ mm}$ | Fig. 17: Compressive strength after 35 d depending on the w/c-ratio by varying average grain diameter d_{50} of the aggregates and a layer thickness of 0.1 mm

zung und horizontalen Ausbreitung des unteren Bereichs infolge der Auflast der nachfolgendhergestellten Schichten resultieren. Mit zunehmendem w/z-Wert und zunehmender Partikelgröße nimmt die Dicke der Wasserschicht um die Partikel zu, was eine leichtere gegenseitige Partikelverschiebung zur Folge hat. Hier besteht Forschungsbedarf, um eine möglichst hohe Formtreue bei gleichzeitig hohen Festigkeiten realisieren zu können. Dies erfordert jedoch noch weitere Versuche.

3.3.4 Einfluss der Nachbehandlung (cbm)

Weiterhin wurde der Einfluss der Nachbehandlung auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Dabei stellte sich eine eintägige Feuchtlagerung bei 20 °C und 100 % relativer Feuchte als effektive Nachbehandlung heraus. Eine Wasserlagerung hingegen führte überraschenderweise zu keiner weiteren Festigkeitssteigerung. In Abhängigkeit des Zements wurde sogar eine signifikante Verringerung der Festigkeiten festgestellt. Dies konnte auf eine Rissbildung zwischen den Schichten infolge des Austrocknens nach der Wasserlagerung zurückgeführt werden. Sichtbar wurde dies durch ein deutliches Versagen des Schichtenverbunds bei der Biegezugprüfung. Höchstwahrscheinlich liegt ein direkter Zusammenhang zwischen der Nachbehandlungsempfindlichkeit (d. h. Rissentwicklung infolge Trocknungsschwindens) mit der Hydratationsgeschwindigkeit der Zemente

In addition to the mechanical properties, granulometry also determines the shape accuracy of the additively produced samples. Fig. 18 shows the influence of the particle size distribution on the characteristic shape fidelity and the visual appearance of the samples. The shape fidelity is defined here by the quotient of the width on the upper side of the cube to the nominal width of 40 mm. Accordingly, the shape accuracy decreases as expected with increasing w/c ratio. However, it can also be clearly seen that the shape fidelity is worse with coarser particle packings, see bottom right. The shape deviation is particularly large in the lower area of the test specimens with the typical formation of a wider base. This could result from vertical settlement and horizontal spreading of the lower area due to the load of the layers produced in the following layers. With increasing w/c ratio and increasing particle size, the thickness of the water layer around the particles increases, resulting in an easier mutual particle displacement. There is a need for research in this area in order to be able to achieve the highest possible dimensional accuracy while maintaining high strength.

3.3.4 Influence of the post-treatment (cbm)

Furthermore, the influence of post-treatment on the mechanical properties was investigated. 24 h storage at 20 °C and 100% relative humidity turned out to be an effective after treatment.

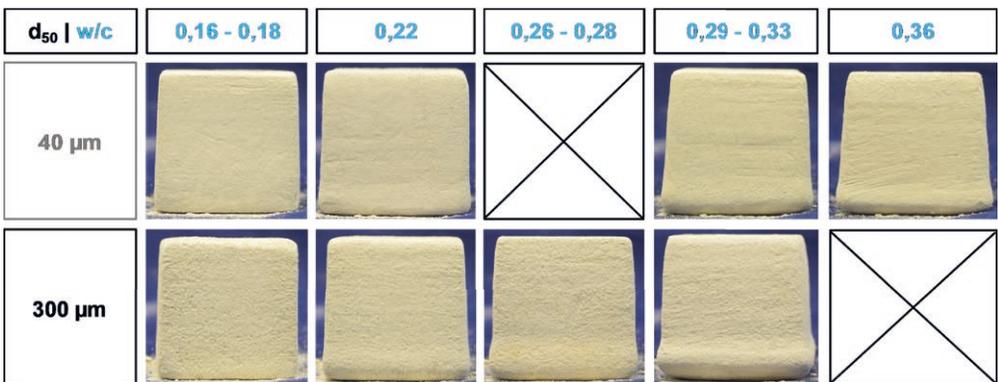


Bild 18: Formtreue in Abh. des w/z-Werts bei variierendem mittlerem Korndurchmesser der Gesteinskörnung d_{50} , Schichtdicke 0,1 mm | Fig. 18: Shape accuracy depending on the w/c-ratio by varying average grain diameter of the aggregates d_{50} , layer thickness of 0.1 mm

vor. Auch hier besteht dringender Forschungsbedarf, um ungeeignete Kombinationen von Material und Nachbehandlung zielsicher ausschließen zu können. Bei optimaler Material-Nachbehandlungs-Kombination konnten bislang Festigkeiten von bis zu 26 N/mm² nach 7 d bzw. 34 N/mm² nach 365 d erreicht werden.

3.3.5 Prozesstechnologische Einflüsse auf die Formtreue (hb)

Um die Grenzen des Herstellungsverfahrens – insbesondere kleinstmöglich herstellbare Elementgrößen – zu untersuchen, wurden verschiedene Testgeometrien entworfen. Bild 19 zeigt eine Darstellung des Bauraums mit einer Auswahl an modellierten Testkörpern mit unterschiedlichen Stift- und Lochdurchmessern, Steg- und Spaltbreiten sowie einfachen Keilen. Nach der Herstellung wurden die gedruckten Objekte mit einem 3D-Scanner vermessen und mit der ursprünglichen CAD-Geometrie verglichen. Bild 20 zeigt beispielhaft den Falschfarbenvergleich zweier Keile mit der zugehörigen Soll-Geometrie. Der Pfeil im jeweiligen Bild zeigt die Bewegungsrichtung des Druckkopfs während der Herstellung. Erste Versuche mit 40 Vol.-% Calciumaluminatzement zeigten Abweichungen zwischen dem CAD-Modell und dem gedruckten Objekt im Bereich von ± 3 mm.

Die Versuche zeigten auch, dass die Formtreue des Objekts stark vom Entpackungsprozess abhängt. Nach dem Druck müssen die Objekte von anhaftendem loseem Material, zum Beispiel durch Bürsten, befreit werden. Wird bei der Reinigung zu viel Druck ausgeübt, kann die finale Form des Objekts verfälscht werden. Standardisierte oder auch automatisierte Entpackungsprozesse müssen zunächst definiert und erprobt werden, um die erreichbare Formtreue der verschiedenen Kombinationen aus Material und Prozessparameter beurteilen zu können. Auch für eine Skalierung des Verfahrens zur Herstellung von Elementen in baupraktischer Größe besteht noch Forschungsbedarf für eine praktikable Entpackung und Nachbehandlung.

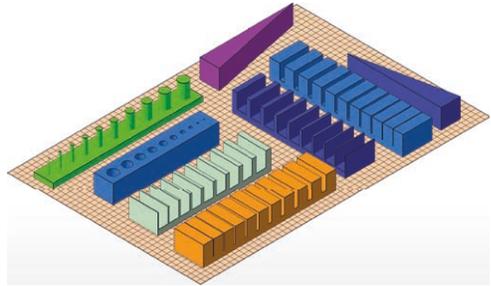


Bild 19: Darstellung des Druckerbaureums mit verschiedenen Testgeometrien | **Fig. 19:** Depiction of the printer build chamber with different test objects

Surprisingly, water storage did not lead to any further increase in strength. Rather, a significant, cement dependent reduction in strength was observed. This could be attributed to crack formation between the layers due to drying out after water storage. This became visible by a clear failure of the layer bond during the bending tensile test. It is highly probable that there is a direct correlation between the curing sensitivity (i.e. crack development due to drying shrinkage) and the hydration rate of the cements. Further research in this field is required in order to exclude unsuitable combinations of material and curing with certainty. With post treatment, strengths of up to 26 N/mm² after 7 d and 34 N/mm² after 365 d could be achieved.

3.3.5 Process technological influences on shape accuracy (hb)

In order to investigate the limits of the manufacturing process – especially the smallest possible element sizes that can be produced – different test geometries were designed. Fig. 19 shows a representation of the installation space with a selection of modelled test geometries with different pin and hole diameters, tongue and groove widths as well as simple wedges. After production, the printed objects were measured with a 3D scanner and compared to their original CAD geometry. Fig. 20 shows an example of the false-colour comparison of two wedges with the associated target geometry. The arrow in each image shows the direction of movement of the print head during production. Initial tests

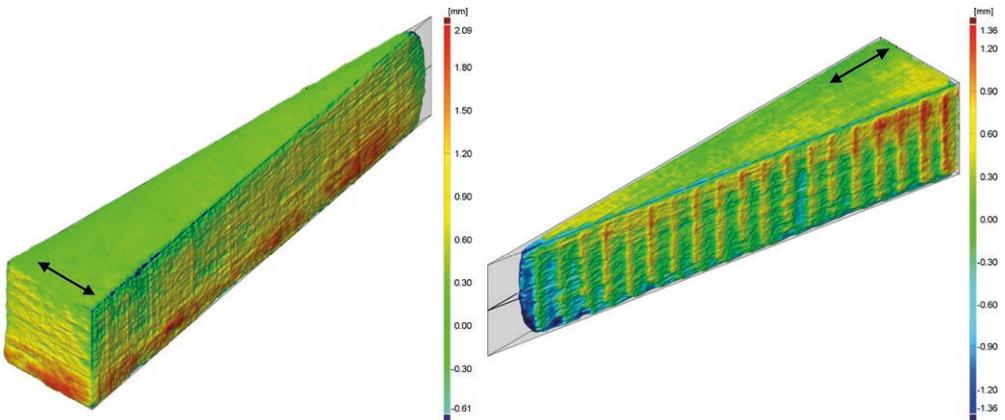


Bild 20: Vergleich zwischen Soll-Geometrie und 3D-Scan von gedruckten Keilen; links: Orientierung quer zur Druckrichtung, rechts: Orientierung längs zur Druckrichtung | **Fig. 20:** Comparison between target geometry and 3D scan of printed wedges; left: orientation perpendicular to print direction, right: orientation in print direction

3.3.6 Demonstratoren (hb)

Begleitend zu den Festigkeits- und Formtreueversuchen wurden mehrere kleinformatige Testobjekte und Demonstratoren (Bilder 21 und 22) hergestellt, die das Potential der selektiven Zementaktivierung verdeutlichen.

3.3.7 Fazit SCA

Nach Abschluss dieses Forschungsvorhabens können Bauteile mittels SCA mit für den Bau ausreichenden Festigkeiten von bis zu 16 MPa und nach Nachbehandlung sogar bis zu 26 MPa, jeweils nach 7 d, produziert werden. Für eine gute Festigkeit ist eine gute Verteilung des Wassers zwischen den Schichten maßgebend. Dies führt zu dem ungewöhnlichen Phänomen einer steigenden Festigkeit mit steigendem w/z-Wert. Dieser Effekt wurde später auch in [18], [19] gezeigt. Dies resultiert jedoch aus der kapillargetriebenen Wasserverteilung, die bei einem größeren Wasserangebot (und somit w/z-Wert) höhere Festigkeiten erzeugt. Es konnte gezeigt werden, dass für eine optimale Wasserverteilung bezüglich Festigkeit und Formtreue die Granulometrie des Partikelbetts eine wichtige Rolle spielt. Ebenso hat der Entpackungs- und Nachbehandlungsprozess einen großen Einfluss auf die finale Bauteilgeometrie und die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens. Die prozesstechnologischen

with 40 vol% calcium aluminate cement showed deviations between the CAD model and the printed object in the range of ± 3 mm.

The tests also showed that the shape fidelity of the object depends strongly on the unpacking process. After printing, the objects must be freed from adhering loose material, for example by brushing. If too much pressure is applied during cleaning, the final shape of the object can be distorted. Standardized or even automated unpacking processes must first be defined and tested in order to assess the achievable shape accuracy of the various combinations of material and process parameters. There is also still a need for research concerning the unpacking and post-treatment of large-scale building elements.

3.3.6 Demonstrators (hb)

In addition to the strength and shape retention tests, several small-format test objects and demonstrators (Figs. 21 and 22) were produced to illustrate the potential of selective cement activation.

3.3.7 Summary SCA

After completion of this research project, SCA can be used to produce components with sufficient strength of up to 16 MPa after 7 d and



Bild 21: Verschiedene durch selektive Zementaktivierung hergestellte Testobjekte zur Beurteilung der Formtreue | **Fig. 21:** Selection of test objects produced by selective cement activation to gauge the achievable accuracy

sowie materialtechnologischen Grundlagen für eine erfolgreiche Weiterentwicklung des Verfahrens konnten herausgearbeitet werden.

Aufgrund der momentan noch recht hohen Wasseraufnahme der Bauteile im erhärteten Zustand herrscht für eine Anwendung im Außenbereich noch weiterer Forschungsbedarf. Jedoch eignet sich der Baustoff bereits aufgrund der hohen Oberflächenauflösung und der möglichen Komplexität der Bauteile für die Herstellung von nicht bewitterten Bauteilen.

4 Fazit und Ausblick

Die additive Fertigung von Betonbauteilen kann durch selektives Binden von Gesteinskörnung mit Zement realisiert werden. In dem hier dokumentierten Projekt wurde das selektive Binden parallel und vergleichend in zwei Varianten untersucht: *Selective Cement Paste Intrusion* (SPI) und *Selective Cement Activation* (SCA).

Mit beiden Verfahrensvarianten sind Festigkeitswerte erreichbar, welche denen von herkömmlich gefertigtem Normalbeton entsprechen. Mit der SPI konnten Druckfestigkeiten von bis zu 78 MPa nach 7 d erreicht werden, mit der SCA bis zu 26 MPa nach 7 d. Die Frage nach den Möglichkeiten zur Integration von Bewehrung war nicht Gegenstand dieses Projektes.

after post-treatment up to 26 MPa after 7 d. For favourable material properties a good distribution of water between the layers is essential. This leads to the unusual phenomenon of increasing strength with increasing w/c ratio. This effect was later also shown in [18], [19]. This results from the capillary-driven water distribution, which produces higher material strength with a larger water supply (and thus w/c ratio). It could be shown that the granulometry of the particle bed plays an important role for optimum water distribution with respect to material strength and shape retention. The unpacking and post-treatment process also has a major influence on the final component geometry and the practical applicability of the process. The process-technological as well as material-technological basics for a successful further development of the process were determined.

Due to the currently high water absorption of the printed components in the hardened state, there is still a need for further research for an outdoor application. However, due to the high surface resolution and the possible complexity of the components, the building material is already suitable for the production of non-weathered components.



Bild 22: Innen verstrebt Rohrstücke, hergestellt durch selektive Zementaktivierung | **Fig. 22:** Pipes with internal structures manufactured by selective cement activation

Für SPI-Bauteile konnte bereits eine hohe Dauerhaftigkeit gegenüber Frost-, Frost-Tausalz-Angriffen und Karbonatisierung nachgewiesen werden. Sie eignen sich somit potentiell für den späteren Einsatz als bewehrtes Außenbauteil.

Im Vergleich zur Extrusion zeichnet sich das selektive Binden durch eine signifikant größere geometrische Freiheit aus. Überhänge und Brücken sind praktisch uneingeschränkt baubar, da die ungebundenen Partikel als Stützmaterial für auskragende Bereiche des Bauteils dienen. Allerdings sind keine ungefüllten, geschlossenen Hohlräume möglich, da in diesen ungebundenen Material gefangen ist.

Die geometrische Auflösung liegt bei beiden Varianten im Bereich von wenigen Millimetern. Grundsätzlich ist das Potential zu hohen Auflösungen bei der SCA höher als bei der SPI, da zur Aktivierung des Zementes lediglich Wasser ausgebracht werden muss, was eine feinere Düsenteknologie erlaubt. Allerdings erwies sich hier das Entpacken der Bauteile aus dem Sand-Zement-Gemisch als anspruchsvoll, sodass filigrane Strukturen nur bedingt machbar waren. Das Entpacken bei der SPI hingegen, wo die Bauteile lediglich aus einem reinen Sandbett geborgen werden müssen, lässt sich technisch wesentlich einfacher realisieren.

Im Rahmen des Projektes wurden eigens entwickelte Versuchsgeräte im Labormaßstab mit Ein-

4 Conclusion and outlook

The additive production of concrete components can be realized by selective binding of aggregates with cement. In the project documented here, the selective binding was investigated in parallel and comparatively in two variants: Selective Cement Paste Intrusion (SPI) and Selective Cement Activation (SCA).

With both process variants, material strength values can be achieved which correspond to those of conventionally produced concrete. With SPI, compressive strengths of up to 78 MPa after 7 d could be achieved, with SCA up to 26 MPa after 7 d. The question of the possibilities of integrating reinforcement was not the subject of this project.

For SPI components, a high durability against freeze-thaw and freeze-thaw attacks and carbonation could already be proven. Thus, they are potentially suitable for later use as reinforced exterior components.

Compared to extrusion, selective bonding is characterized by a significantly greater geometric freedom. Overhangs and bridges can be built practically without restrictions, as the unbound particles serve as support material for cantilevered areas of the component. However, no unfilled, closed cavities are possible, as unbound material remains trapped in these areas.

The geometric resolution of both variants is in the range of a few millimetres. In principle, the potential for high resolutions is higher with SCA than with SPI, since only water has to be applied to activate the cement, which allows finer nozzle technology. However, the process of unpacking the components from the sand/cement mixture proved to be challenging, so that filigree structures were only possible to a limited extent. Unpacking components produced via SPI where only a retrieval from a pure sand bed is necessary, is technically easier to implement.

The project used specially developed experimental equipment on a laboratory scale with a

zeldüse (SPI) oder kleinen Düsen-Arrays (SCA), kleinen Bauräumen (max. 450 mm × 600 mm × 500 mm) und geringen Baugeschwindigkeiten verwendet.

Die Ergebnisse des Projektes werden aktuell im laufenden Transferprojekt „Industrieller 3D-Betondruck durch selektive Zementaktivierung – Verfahren, Material, Anwendungen“ vertieft und weitergeführt. Da hier auf bereits vorhandene Technologie aus dem 2D-Großformatdruck zurückgegriffen werden konnte und nur Wasser als Fluid zum Einsatz kommt, waren die Voraussetzungen für eine schnelle technische Umsetzung in besonderem Maße gegeben. Gegenstand des Projektes ist die Skalierung der Verfahrensvariante SCA in den industriellen Maßstab. Hier wurden bereits deutliche Fortschritte bezüglich Bauraumgröße, Baugeschwindigkeit und Festbeeigenschaften erarbeitet.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 257344691 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion. 5. Aufl., München: Hanser, 2016
- [2] Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.: 3D Printing of Concrete Structures with Calcium Silicate based Cements using the Selective Binding Method – Effects of Concrete Technology on Penetration Depth of Cement Paste. In: Fehling, E.; Middelndorf, B.; Thiemicke, J. (Hrsg.): Proc. of 4th Int. Symp. on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials – HiPerMat, 09.–11.03.2016 in Kassel, Kassel: Kassel University Press, 2016, S. 193–202
- [3] Wagner, J.-P.; Reichertz, A.; Hannover, A.; Siebert, B.; Osterminski, K.; Braun, F.; Kirchgeßner, M.: Bluten von Frischbeton: Versuchsergebnisse mit dem Eimerverfahren des DBV-Merkblatts. Beton (2007) 12, S. 558–565
- [4] Perrot, A.; Rengeard, D.; Picandet, V.; Mélinge, Y.: Hydro-mechanical properties of fresh cement pastes containing polycarboxylate superplasticizer. Cement and Concrete Research (2013), S. 221–228
- [5] Weger, D.; Gehlen, C.; Lowke, D.: Additive Fertigung von Betonbauteilen durch selektive Zementleim-Intrusion. In: Ludwig, H. M. (Hrsg.): Tagungsband 20. Int. Baustofftagung – ibausil, 12.–14.09.2018 in Weimar, Weimar: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, Bd. 1, 2018, S. 1-01–1-16
- [6] Lowke, D.; Dini, E.; Perrot, A.; Weger, D.; Gehlen, C.; Dillenburger, B.: Particle-bed 3D printing in concrete construction – possibilities and challenges. Cement and Concrete Research 112 (2018) – Special Issue (SI): Digital Concrete 2018, S. 50–65 – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.018>

The method of selective cement activation is currently being studied in the ongoing transfer project “Industrial 3D Concrete Printing by Selective Cement Activation – Process, Material, Applications”. Since in this process variant, it was possible to fall back on already existing technology from 2D large format printing using only water as fluid, the conditions for a fast technical implementation seem particularly favourable. The object of the project is to scale up the SCA process variant for industrial application. Significant progress has already been made in terms of build volume, manufacturing speed and hardened concrete properties.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (number 257344691) within the Priority Programme SPP 1542.

- [7] Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.: 3D printing of concrete structures using the selective binding method – Effect of concrete technology on contour precision and compressive strength. In: Maekawa, K.; Kasuga, A.; Yamazaki, J. (Hrsg.): Proc. of 11th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 29.–31.08.2016 an der University of Tokyo (Japan), 2016, S. 403–410
- [8] Pierre, A.; Weger, D.; Perrot, A.; Lowke, D.: Penetration of cement pastes into sand packings during 3D printing: Analytical and experimental study. *Materials and Structures* 51 (2018) 22, 12 S. – DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1148-5>
- [9] Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.; Talke, D.; Henke, K.: Additive manufacturing of concrete elements using selective cement paste intrusion – Effect of layer orientation on strength and durability. In: Wangler, T.; Flatt, R. J. (Hrsg.): Proc. of the 1st Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete (ICCDF) 2018, 10.–12.09.2018 in Zürich (Schweiz), 2018, extended abstract (auf USB-Stick)
- [10] Estelle, P.; Lanos, C.; Perrot, A.; Amziane, S.: Processing the vane shear flow data from Couette analogy. *Applied Rheology* 18 (2008), S. 34037-1–34037-6
- [11] Koehler, E. P.; Fowler, D. W.: Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete. ICAR Report 105-3FICAR 5: Measuring the Workability of High Fines Concrete, Austin, TX (USA), 2004
- [12] DIN EN 12390-3:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009.
- [13] DIN CEN/TS 12390-9:2017-05 (DIN SPEC 91167): Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung; Deutsche Fassung CEN/TS 12390-9:2016.
- [14] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Hrsg.): BAW-Merkblatt: Frostprüfung von Beton (MFB). Ausgabe 2012, zugegriffen am 30.5.2018.
- [15] DIN CEN/TS 12390-10:2007-12: Prüfung von Festbeton – Teil 10: Bestimmung des relativen Karbonatisierungswiderstandes von Beton; Deutsche Fassung CEN/TS 12390-10:2007.
- [16] Lowke, D.; Weger, D.; Henke, K.; Talke, D.; Winter, S.; Gehlen, C.: 3D-Drucken von Betonbauteilen durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen – Erste Ergebnisse zu betontechnologischen und verfahrenstechnischen Einflüssen. In: Ludwig, H.-M. (Hrsg.): Tagungsbericht zur 19. Int. Baustofftagung – ibausil, 16.–18.09.2015 in Weimar, Weimar: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 2015, Beitrag 20-10, S. 1-1113-1-1120
- [17] Lowke, D.; Talke, D.; Dressler, I.; Weger, D.; Gehlen, C.; Ostertag, C.; Rael, R.: Particle-bed 3D-Printing by Selective Cement Activation – Applications, material and process technology. *Cement and Concrete Research* 134 (2020) – Special Issue for the 2nd RILEM Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication 2020 (SI: Digital Concrete 2020; Bos, F. P.; Salet, T. A. M.; Wolfs, R. (Hrsg.)), 106077, 13 S. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106077>
- [18] Shakor, P.; Sanjayan, J.; Nazari, A.; Nejadi, S.: Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing Construction and Building Materials 138 (2017), S. 398–409
- [19] Xia, M.; Nematollahi, B.; Sanjayan, J.: Compressive Strength and Dimensional Accuracy of Portland Cement Mortar Made Using Powder-Based 3D Printing for Construction Applications. In: Wangler, T.; Flatt, R. J. (Hrsg.): Proc. of 1st RILEM Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018, 10.–12.09.2018 in Zürich (Schweiz), RILEM Bookseries 19, Cham: Springer Int. Publ., 2019, S. 245–254
- [20] Henke, K.: Additive Baufertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton. Diss., TU München, 2016
- [21] Weger, D.; Talke, D.; Lowke, D.; Henke, K.: Video „3D-Betondruck, Variante ‚Paste Intrusion‘: Herstellung eines mit inneren Streben ausgesteiften Rohres“. ITSZ-Medienzentrum der TU München (gefördert durch Informationszentrum Beton GmbH), 2017
- [22] Talke, D.; Henke, K.; Weger, D.: Selective Cement Activation (SCA) – new possibilities for additive manufacturing in construction. In: Lázaro, C.; Bletzinger, K.-U.; Oñate, E. (Hrsg.): Form and Force – Proc. of the IASS Annual Symp. 2019 – Structural Membranes 2019, 07.–10.10.2019 in Barcelona (Spanien), IASS, 2019, 8 S.

Bildnachweise | Picture credits

- Bild | Picture 1: Klaudius Henke [20]
- Bild | Picture 2: Standbild aus [21]
- Bilder | Pictures 3, 4, 13, 14, 19, 20, 22: Daniel Talke
- Bild | Picture 5: Daniel Weger [2]
- Bilder | Pictures 6, 7, 9–12: Daniel Weger [5]
- Bild | Picture 8: Daniel Weger
- Bild | Picture 15: Dirk Lowke [6], [16]
- Bild | Picture 16: Dirk Lowke [6]
- Bild | Picture 17: Dirk Lowke [17]
- Bild | Picture 18: Dirk Lowke, Daniel Weger [17]
- Bild | Picture 21: Daniel Talke [22]

Bereits zuvor publizierte Abbildungen wurden für den vorliegenden Bericht teilweise modifiziert. | Previously published illustrations have been partially modified for the present report.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Additive Fertigung frei geformter, bewehrter Betonbauteile durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen | Additive manufacturing of free formed reinforced concrete elements by selective binding with calcium silicate cements

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen Professor und Lehrstuhlinhaber Professor and chair holder
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	GE 1973/19-1 (Projektnummer Project number: 257344691)
Adresse Address:	TU München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Franz-Langinger-Straße 10, 81245 München
Kontakt Contact:	+49 89 0289 27061 gehlen@tum.de www.bgu.tum.de/cbm
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter Professor und Lehrstuhlinhaber Professor and chair holder
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	WI 2879/4-1 (Projektnummer Project number: 257344691)
Adresse Address:	TU München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion (hb), Arcisstraße 21, 80333 München
Kontakt Contact:	+49 89 289 22416 winter@tum.de www.bgu.tum.de/hb
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.10.2014–30.09.2017 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 31.12.2017
Team Team:	Daniel Talke (hb) Daniel Weger (cbm) Klaudius Henke (hb) Dirk Lowke (cbm)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Lowke, D.; Weger, D.; Henke, K.; Talke, D.; Winter, S.; Gehlen, C.: 3D-Drucken von Betonbauteilen durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen – Erste Ergebnisse zu betontechnologischen und verfahrenstechnischen Einflüssen. In: Ludwig, H. M. (Hrsg.): Tagungsband der 19. Int. Baustofftagung ibausil, 16.–18.09.2015 in Weimar, Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 2015, Beitrag 20-10, S. 1-1113-1-1120
- Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.: 3D Printing of Concrete Structures with Calcium Silicate based Cements using the Selective Binding Method – Effects of Concrete Technology on Penetration Depth of Cement Paste. In: Fehling, E.; Middendorf, B.; Thiemicke, J. (Hrsg.): Proc. of Hipermat 2016 – 4th Int. Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials, 09.–11.03.2016 in Kassel, erschienen in Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 27, Kassel: kassel university press, 2016, S. 193–202
- Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.: 3D printing of concrete structures using the selective binding method – Effect of concrete technology on contour precision and compressive strength. In: Maekawa, K.; Kasuga, A.; Yamazaki, J. (Hrsg.): Proc. of 11th Int. fib PhD Symp. in Civil Engineering, 29.–31.08.2016 in Tokio (Japan), 2016, S. 403–410
- Henke, K.; Talke, D.; Winter, S.: Multifunctional Concrete – Additive Manufacturing by the Use of Lightweight Concrete. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 10133, Book of Abstracts: S. 85, Langfassung auf USB-Stick, 9 S.
- Pierre, A.; Weger, D.; Perrot, A.; Lowke, D.: Penetration of cement pastes into sand packings during 3D printing: Analytical and experimental study. Materials and Structures 51 (2018) 22, 12 S. – DOI: 10.1617/s11527-018-1148-5.
- Lowke, D.; Dini, E.; Perrot, A.; Weger, D.; Gehlen, C.; Dillenburger, B.: Particle-bed 3D printing in concrete construction – possibilities and challenges. Cement and Concrete Research 112 (2018) – Special Issue (SI): Digital Concrete 2018, S. 50–65 – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.018>

- Weger, D.; Gehlen, C.; Lowke, D.: Additive Fertigung von Betonbauteilen durch selektive Zementleim-Intrusion. In: Ludwig, H. M. (Hrsg.): Tagungsband der 20. Int. Baustofftagung ibausil, 12.–14.09.2018 in Weimar, Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 2018, S. 1-1–1-16
- Lowke, D: Partikelbett 3D-Drucktechniken für den Betonbau – Möglichkeiten und Herausforderungen. In: Ludwig, H. M. (Hrsg.): Tagungsband der 20. Int. Baustofftagung ibausil, 12.–14.09.2018 in Weimar, Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 2018, S. 1-257–1-269
- Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.; Talke, D.; Henke, K.: Additive manufacturing of concrete elements using selective cement paste intrusion – Effect of layer orientation on strength and durability. In: Wangler, T.; Flatt, R. J. (Hrsg.): Proc. of 1st Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete (ICCDF) 2018, 10.–12.09.2018 in Zürich (Schweiz), 2018, extended abstract (auf USB-Stick)
- Weger, D.; Gehlen, C.; Lowke, D.: 3D-Betondrucken – Stand der Forschung an der TUM. In: Fischer, O.; Gehlen, C.; Große, Ch.; Heinz, D. (Hrsg.): Beiträge zur 6. DAfStb-Jahrestagung mit 59. Forschungskolloquium, 11./12.10.2018 in München, TU München, 2018, S. 25–35
- Lowke, D.; Talke, D.; Dressler, I.; Weger, D.; Gehlen, C.; Ostertag, C.; Rael, R.: Particle-bed 3D-Printing by Selective Cement Activation – Applications, material and process technology. Cement and Concrete Research 134 (2020) – Special Issue for the 2nd RILEM Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication 2020 (SI: Digital Concrete 2020; Bos, F. P.; Salet, T. A. M.; Wolfs, R. (Hrsg.)), 106077, 13 S. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106077>

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertationen | Dissertations

- Weger, D.: Additive Fertigung von Betonstrukturen mit der Selective Paste Intrusion – SPI. 2020
- Talke, D.: Additive Fertigung mittels selektiver Zementaktivierung. (Fertigstellung geplant | Completion planned for 2022)

Studienarbeiten | Student's research projects

- Schmidt, L.: 3D-Drucken von Beton – Einfluss von Schichtdicke & w/z-Wert. cbm, Bachelorarbeit, 2014
- Maric, M.: 3D printing of concrete – Effect of water cement ratio and layer thickness on concrete strength characteristics. cbm, Seminararbeit, 2015
- Elekes, M.: Einfluss der rheologischen und betontechnologischen Eigenschaften von Zementleimen auf die Konturtreue und die Druckfestigkeit bei Verwendung der „selective paste intrusion method“. cbm, Bachelorarbeit, 2016
- Geppert, F.: 3D-Drucken von Beton – Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Wasserpermeabilität und Einfluss der Packungsdichte auf die Wasserpermeabilität und Wasserverteilung von im selektiv aktivierenden Druckverfahren hergestellten Bauteilen. cbm, Bachelorarbeit, 2016
- Gerber, S.: 3D-Drucken von Beton – Einfluss von Schichtdicke, W/Z-Wert, Zementgehalt und Zementart. cbm, Bachelorarbeit, 2016
- Gerceker, B. E.: Rheologische Optimierung von Leimen für das Fertigungsverfahren Selective Paste Intrusion: Einfluss verschiedener Fließmittel. cbm, Seminararbeit, 2016
- Lipp, A.: 3D Drucken mit Beton – Einfluss betontechnologischer Parameter auf die Konturtreue und die Festigkeit bei Verwendung der „Cement Paste Intrusion Method“. cbm, Seminararbeit, 2016
- Lomakovych, V.: Druckköpfe zur dosierten Ausbringung von Wasser für die additive Fertigung von großformatigen Bauteilen durch selektives Binden von Gesteinskörnung mit Zement. hb, Bachelorarbeit, 2016
- Maric, M.: 3D printing from concrete. cbm, Masterarbeit, 2016
- Reich, M.: Testgeometrien für das selektive Binden von Quarzsand – Konzeption, Entwicklung und Entwurf. hb, Bachelorarbeit, 2016
- Reßle, S.: 3D-Drucken von Beton mittels Selective Paste Intrusion. cbm, Bachelorarbeit, 2016
- Rzeznik, N.: Ökologische Einsparpotentiale durch Additive Fertigung mit kraftflussoptimierter und multi-funktionaler Form. cbm, Masterarbeit, 2016
- Wostatek, C.: Konzeption von Zementleimen für das additive Fertigungsverfahren selective paste intrusion. cbm, Masterarbeit, 2016

- Roos, M.: Additive Fertigung calciumsilikatbasierter Zemente. cbm, Bachelorarbeit, 2017
- Schwangler, M.: Ökologische Studie zu Leichtbeton und Normalbeton; Vergleich der Baustoffe im gesamten Lebenszyklus aus energetischer Sichtweise. hb, Bachelorarbeit, 2017
- Zehetbauer, T.: 3D-Drucken von Beton – Einfluss der Nachbehandlung auf die Festigkeit von im selektiv aktivierenden Druckverfahren hergestellten Bauteilen. cbm, Bachelorarbeit, 2017
- Zimmermann, B.: Ökologische Optimierung von Bauteilen durch den Einsatz der Additiven Fertigungsmethode „Selective Cement Paste Intrusion“ – Einsatz von Additiven zur Konturtreue- und Festigkeitssteigerung, cbm Bachelorarbeit, 2017

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Industrieller 3D-Betondruck durch selektive Zementaktivierung – Verfahren, Material, Anwendungen | Industrial 3D concrete printing by selective cement activation – process, material, applications

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen, Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke (TU Braunschweig), Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project
Förderzeitraum Funding period:	01.11.2017–29.02.2020
Partner Partner:	Progress Maschinen & Automation AG, Brixen, Südtirol

- A01: Particle-bed 3D printing by selective cement activation (SCA) – particle surface functionalisation, particle-bed compaction and reinforcement implementation

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke (TU Braunschweig), Prof. Dr. Arno Kwade (TU Braunschweig)
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 277
Förderzeitraum Funding period:	01.01.2020–31.12.2023

- A02: Particle-bed 3D printing by selective cement paste intrusion (SPI) – particle surface functionalisation, particle synthesis and integration of WAAM reinforcement

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen, Prof. Dr. Arno Kwade (TU Braunschweig), Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh (TU München)
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 277
Förderzeitraum Funding period:	01.01.2020–31.12.2023

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Seit 2016: Effiziente Steuerung der rheologischen Eigenschaften als Schlüssel für die digitale Fertigung von Bauteilen aus Beton – Experimentelle Untersuchung und numerische Simulation: Int. Kooperation des cbm mit A. Pierre (University of Cergy-Pontoise), A. Perrot (University of Bretagne Sud) und D. Lowke (ehem.: TUM, heute: TU Braunschweig) zur additiven Fertigung von Betonelementen mittels SCI (gefördert durch das Bayerische-Französische Hochschulzentrum – BFHZ) | Since 2016: Efficient rheology control as key factor for digital fabrication in concrete construction – Experimental study and numerical simulation: Int. cooperation with A. Pierre (University of Cergy-Pontoise), A. Perrot (University of Bretagne Sud) and D. Lowke (former: TUM, today: TU Braunschweig) with focus on additive manufacturing of concrete elements by means of SPI (funded by Bayerisch-Französisches Hochschulzentrum (BFHZ) / Centre de Coopération Universitaire Franco-Bavarois (CCUFB))
- Wintersemester 2016/2017: Gastforschungsaufenthalt von Dirk Lowke an der UC Berkley im Rahmen des Projekts „3D Printing of Concrete Structures“ (gefördert durch das Bayerisch-Kalifornische Hochschulzentrum – BaCaTec) | Winter semester 2016/2017: SResearch stay of Dirk Lowke at UC Berkley within the project „3D Printing of Concrete Structures“ (funded by the Bavaria California Technology Center – BaCaTec)
- Januar 2017: Vorstellung der Forschungsaktivitäten auf der Messe „Bau“ in München | January 2017: Presentation of the state of research at the exhibition “Bau” in Munich

Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile | Fundamental research towards an adaptive formwork system development for freeform concrete building components

► Carl-Alexander Graubner¹, Ulrich Knaack², Tilo Prose¹, Björn Freund¹, Matthias Michel², Sascha Hickert²

► ¹ Institut für Massivbau (IfM), TU Darmstadt

► ² Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D), TU Darmstadt (bis 30.9.2014 Lehrgebiet Entwerfen und Konstruieren, TH Ostwestfalen-Lippe)

1 Ausgangssituation

Für die Realisierung nach bionischen Prinzipien entworfener Betontragwerke mit frei geformten Bauteilkonturen ist die erforderliche Schalung in technischer und ökonomischer Hinsicht von eminenter Bedeutung. Im Forschungsvorhaben wurde sich mit der Entwicklung adaptiver und aktiv regulierbarer Schalungssysteme befasst, welche durch den Einsatz neuartiger Materialien und Konstruktionsprinzipien flexibel auf beliebig geneigte und gekrümmte Bauteiloberflächen reagieren kann. Das Schalungssystem selbst soll nach bionischen Prinzipien agieren. Computergestützt ansteuerbare, elektrisch regulierbare Stellgliedsysteme ermöglichen effiziente, materialsparende Herstellverfahren und minimieren die Beanspruchung des Schalungssystems.

Zwischen dem auf die Schalung einwirkenden Frischbetondruck und dem verwendeten Schalungssystem besteht ein komplexer, nichtlinearer Zusammenhang, welcher insbesondere für geneigte und frei geformte Bauteiloberflächen wissenschaftlich noch nicht untersucht wurde. Die vielfältigen Einflussgrößen auf den Frischbetondruck werden analysiert. Aus den so gewonnenen Erkenntnissen wird ein allgemein-

1 Starting point

Formwork has great significance for the realisation of concrete load-bearing structures designed according to bionic principles with free-formed contours in technical and economic regard. The research project focussed on developing adaptive and actively controllable formwork systems that can flexibly respond to arbitrarily inclined and curved building part surfaces using new material and construction principles. The formwork itself is supposed to act according to bionic principles. Computer-aided, electrically controllable control element systems allow for efficient, material-saving manufacturing methods and minimise the load on the formwork system.

A complex non-linear relationship exists between the pressure of the fresh concrete on the formwork and the formwork system used. This relationship has not yet been scientifically examined for inclined and free-formed building part surfaces. The various parameters influencing the pressure of fresh concrete are analysed. The identified findings are used to work out a universally valid engineering model to specify the pressure of fresh concrete that acts on inclined and curved formwork surfaces. The re-

gültiges Ingenieurmodell zur Bestimmung des auf geneigte und gekrümmte Schalungsflächen einwirkenden Frischbetondrucks erarbeitet. Die mit diesem Modell erhaltenen Ergebnisse wurden exemplarisch anhand von Bauteilversuchen verifiziert.

sults gained from this model were exemplarily verified through building part tests.

2 Zielsetzung und Arbeitsprogramm

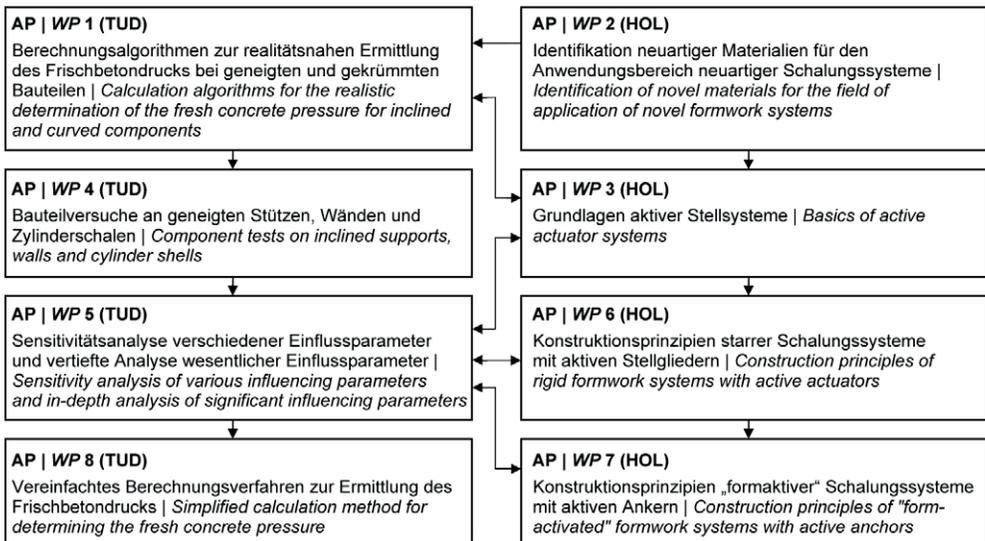
2 Objective and work programme

Der Grundgedanke des Forschungsvorhabens war die wirklichkeitsnahe Erfassung der Interaktion zwischen dem einwirkenden Frischbetondruck und der widerstehenden Schalung als Grundlage für die Entwicklung neuartiger adaptiver Schalungssysteme, deren Geometrie aktiv gesteuert werden kann.

The underlying thought behind the research project was a realistic registration of the interaction between the pressure exerted by the fresh concrete and the resisting formwork for the development of novel, adaptive formwork systems whose geometries can be actively controlled.

Als Grundlage für aktiv regulierbare Schalungssysteme sollten des Weiteren materialsparende und somit dem bionischen Bildungsprinzip angemessene Konstruktionsprinzipien für Schalungssysteme erforscht werden. Die gewählte Projektstruktur und das Zusammenwirken der Projektpartner und der einzelnen Arbeitspakete ist in Bild 1 dargestellt.

Furthermore, as a basis for actively adjustable formwork systems, material-saving construction principles for formwork systems should be researched, thus appropriate to the bionic formation principle. The chosen project structure and the interaction between the project partners and the individual work packages are shown in Fig. 1.



mit | with: TUD: TU Darmstadt, Team Graubner; HOL: Hochschule Ostwestfalen-Lippe (später ebenfalls | later also TU Darmstadt), Team Knaack

Bild 1: Übersicht über das Arbeitsprogramm | Fig. 1: Overview of the work program

3 Computergesteuerte adaptive Schalungen für Wände und Schalen aus Beton (Team Knaack)

3.1 Analyse von Gebäudegeometrien

Bei der Formgebung erstarrender Werkstoffe nimmt der Formenbau einen signifikanten Anteil der Herstellungskosten in Anspruch. Dies gilt insbesondere bei gekrümmten Geometrien und besonders dann, wenn das herzustellende Bauteil flächiger Natur, wie z. B. ein Betonbauteil ist, das als Wand oder Teil eines Schalentragswerks zur Nutzung kommen soll. Zur Grundlagenermittlung wurden 160 realisierte Gebäude mit gekrümmten Stahlbetonbauteilen bzw. Schalentragswerke hinsichtlich ihrer Krümmungsverteilung untersucht und Häufungen von Krümmungen bzw. eine Systematik, welche in der architektonischen Formsprache vermehrt auftritt, identifiziert.

Diese Daten dienen als Grundlage, um die Beanspruchung der Schalungsflächen sowie die notwendige Dimensionierung der aktiven Stellglieder der zu entwickelnden adaptiven Schalungssysteme einzugrenzen. Die in der Analyse verwendeten Radien (Bild 2) basieren auf vorliegenden Grundrissen und Schnitten. Ausschlaggebend für die Auswahl der Radien ist die Dominanz des Radius in Bezug auf das gesamte Gebäude. Kategorisiert wurden die erhobenen Daten zum einen auf Bauteilebene (tragende Wand, Fassade, Dach, Schalentragswerk), zum anderen hinsichtlich der Gebäudegeometrie (einsinnig gekrümmt, antiklastisch, synklastisch).

In einer Evaluationsmatrix wurden geometrische, konstruktive und funktionale Eigenschaften in Beziehung gesetzt. Zur Entwicklung der adaptiven Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile sind die Krümmungen von tragenden, lotrechten Bauteilen mit Freiformflächenanteil (antiklastische Flächen) von Bedeutung. Aus der Systematik der architektonischen Formsprache konnte aus der Evaluationsmatrix herausgestellt werden, dass die meist komplexen Gebäudegeometrien Anwendung in Ge-

3 Computer-controlled adaptive formwork for walls and shells made of concrete (team Knaack)

3.1 Analysis of building geometries

In shaping solidifying materials, mould construction takes up a significant proportion of the manufacturing costs. This particularly applies to curved geometries, especially if the components to be produced are flat, such as concrete components for walls or parts of a shell structure. One hundred sixty realised buildings with curved reinforced concrete components or shell structures were identified to determine the basic parameters. The selection criteria included curvature distribution, accumulations of curvature, or a system that occurs more frequently in the architectural form language.

The collected data served as a basis to limit the stress on formwork planes as well as the necessary dimensioning of the active control elements of the adaptive formwork systems to be developed. The radii used in the analysis (Fig. 2) are based on available floor plans and sections. The decisive factor for selecting the radii is the dominance of the radius in relation to the entire building. The data collected were categorised at the component level (load-bearing wall, façade, roof, load-bearing shell structure), on the one hand, and with regard to the building geometry (single-sided curvature, anticlastic, synclastic), on the other hand.

Geometric, structural and functional properties were correlated in an evaluation matrix. The curvatures of load-bearing, vertical components with free-form surfaces (anticlastic surfaces) are important for developing adaptive formwork systems for free-form concrete building components. The evolution matrix based on the systematics of architectural form language showed that the most complex building geometries find application in building types with a representative character (e.g. museum building). The radii of massive load-bearing structures used to create vertical enveloping surfaces were primarily found in the radius spectrum

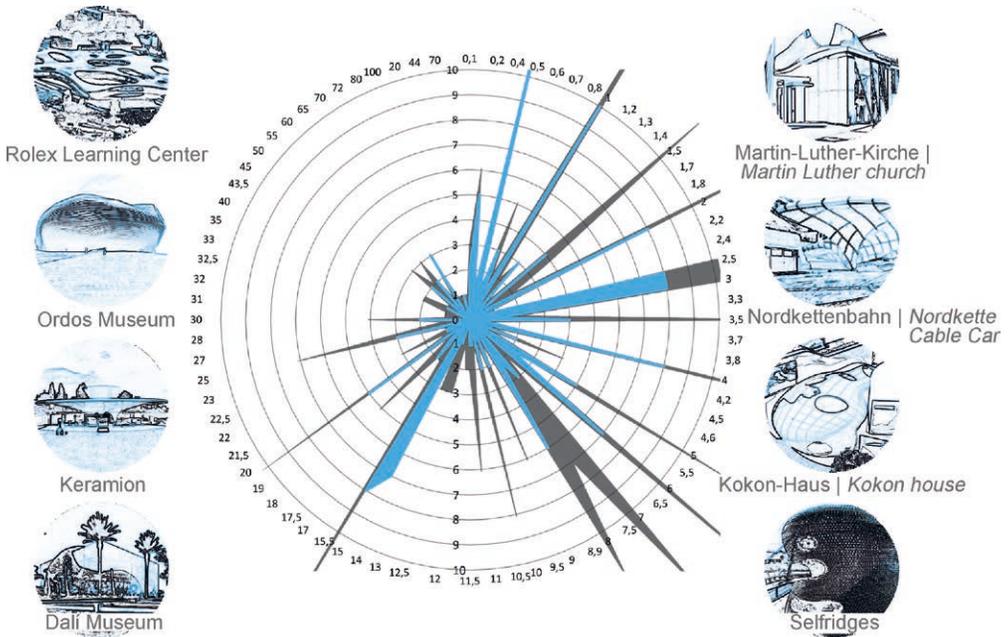


Bild 2: Radiendiagramm mit Gebäuden, die eine antiklastische gekrümmte Fläche aufweisen | Fig. 2: Radius diagram with buildings that have an anticlastically curved area

bäudetyphen mit repräsentativen Eigenschaften (z. B. Museumsbau) finden. Die verwendeten Radien massiver Tragkonstruktionen zur Erzeugung von vertikalen Hüllflächen dominierten im Radienspektrum größer 6 m. Weiter zeichnete sich im architektonischen Trend der sogenannten Nicht-Standard-Architektur (Blob-Architektur, Freiformarchitektur) Tendenzen von komplexen, fließenden, biomorphen Formen mit Radien größer 13 m auf [1].

3.2 Grundlagen aktiver Stellgliedersysteme

Adaptive Schalungen bestehen primär aus einer stützenden, flächigen Schalhaut und beweglichen Stützelementen, denen die Formgebung der Schalungsoberfläche obliegt. Die geometrische und mechanische Interaktion von Stützelementen und Stützfläche stellt eine besondere Herausforderung dar. Recherchen haben gezeigt, dass sich an dieser Stelle maßgebliche Problemstellungen für eine großflächige Nutzung ergeben.

larger than 6 m. Furthermore, the architectural trend of so-called non-standard architecture (blob architecture, free-form architecture) tends to show complex, flowing, biomorphic forms with radii greater than 13 m [1].

3.2 Fundamentals of control element systems

Adaptive formwork primarily consists of a planar supporting skin and movable support elements, which are responsible for shaping the formwork surface. The geometric and mechanical interaction of support elements and support surface poses a particular challenge. Research has shown that these locations account for the most significant problems for large-scale use.

If a flat surface is bent into a curved shape by deflecting the support elements, the distance between its edges is shortened (Fig. 3). Support elements that are firmly connected to the surface must follow this movement. Therefore, they cannot be rigidly mounted on a base plate

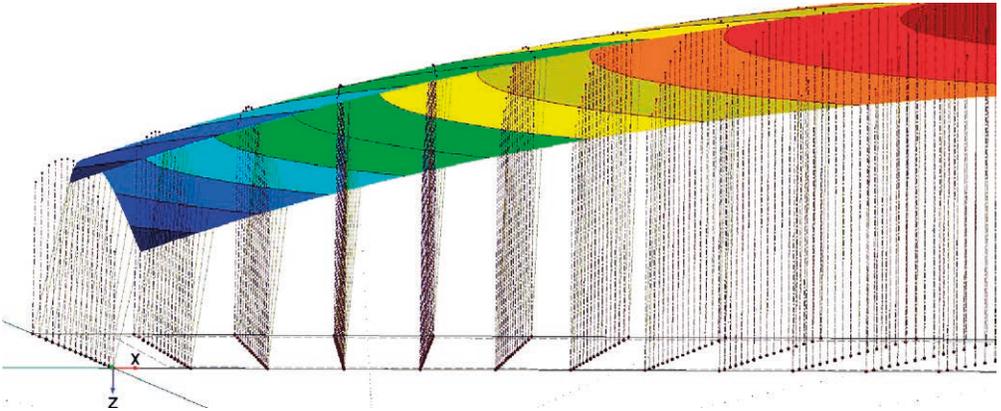


Bild 3: Beim Krümmen einer ebenen Fläche verkürzt sich der Abstand der Ränder zueinander. Um Zwängungen zu vermeiden, müssen die Stützelemente sich neigen. Hierbei ändert sich die Krümmung der Fläche. | **Fig. 3:** If a flat surface is deformed, the distance between the edges is shortened. The support elements must be able to incline to avoid unwanted strain. Inclination changes the curvature.

Wird eine ebene Fläche durch Auslenkung der Stützelemente in eine gekrümmte Form gebracht, verkürzt sich der Abstand ihrer Ränder zueinander (Bild 3). Stützelemente, die fest mit der Fläche verbunden sind, müssen dieser Bewegung folgen. Sie können daher nicht auf einer Grundplatte starr gelagert werden und müssen als Pendelstäbe ausgebildet sein. In der Simulationsumgebung wurde die grundlegende Funktionsweise der Einrichtung mit ihren mechanischen und geometrischen Abhängigkeiten als Ganzes vom Abtasten einer vorgegebenen Fläche bis zum Einstellen der Aktuatoren simuliert. Mit dieser Methode konnte auch gezeigt werden, dass sich neigende Stützelemente an den Rändern eine Formabweichung bewirken, die durch eine Kompensation am Hub der Stützelemente korrigiert werden muss [2].

3.3 Grundlagen der elastischen Formapproximation

Erwartungsgemäß bestehen die größten Abweichungen einer durch elastisches Umformen approximierten Fläche zu ihrer Referenzgeometrie an den Rändern, Bild 4. Die Breite der abweichenden Randbereiche und die sinnvolle Anzahl der Stützelemente bestimmen die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des adaptiven Systems.

and must be designed as pendulum rods. In the simulation environment, the basic functioning of the set-up with its mechanical and geometric dependencies was simulated as a whole, from scanning a given surface to setting the actuators. This method also showed that tilting support elements cause a shape deviation at the edges, which has to be corrected by compensation at the base of the support elements [2].

3.3 Fundamentals of the elastic shape approximation

As expected, the greatest deviations in a surface approximated by elastic shaping from its reference geometry occur at the edges, Fig. 4. The width of the deviating edge areas and the reasonable number of support elements determine the performance and economy of the adaptive system.

Interpolation surfaces can be represented by crossed arrays of elastically bent rods. Therefore, the investigations into the accuracy of the edges were first carried out on a replacement rod. For this study, a simulation environment was created that can be used to represent and measure the complex processes of adaptivity. The Rhinoceros® software package was used for this purpose. The integrated graphical programming interface allows the parametrisation of geometries.

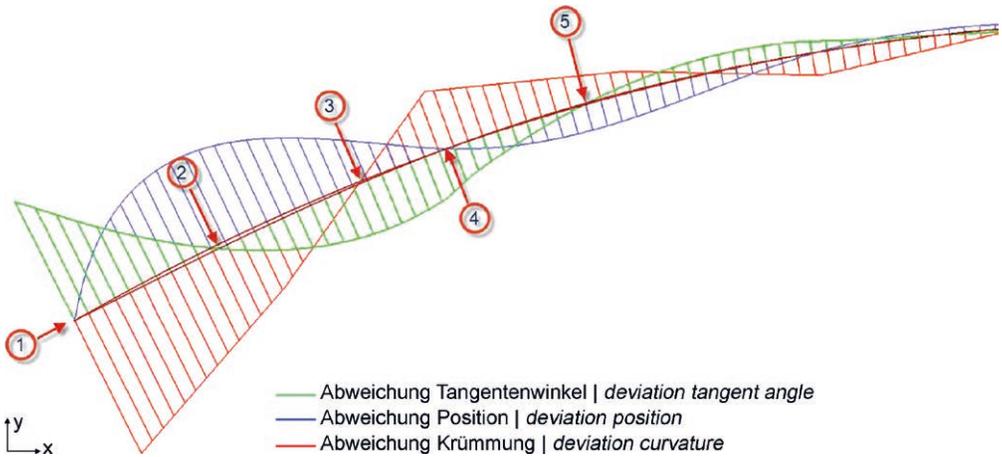


Bild 4: Bei der Approximation eines Kreisbogens durch eine Biegelinie bestehen naturgemäß auftretende Abweichungen, die hier als Graphen auf der Biegelinie abgetragen sind. Die Abfolge und Gestalt der Extrema und der Nullstellen ist stets gleichartig und unabhängig von Anzahl und Dichte der Stützpunkte. So liegen auch potentielle Grenzen der Nutzbarkeit stets gleich in Relation zu den Stützpunkten 1-5. | **Fig. 4:** There are deviations by default when trying to approximate a circle section by a bending curve. The deviation graphs are plotted along the curve. The scheme of the curve's extremes and zeropoints are alike and independent from number and distance of the supporting elements. The position of potential border points of usability are in constant relation to the actuators (points 1 to 5).

Interpolationsflächen können durch gekreuzte Scharen von elastisch gebogenen Stäben repräsentiert werden. Daher wurden die Untersuchungen zur Genauigkeit der Ränder zunächst an einem Ersatzstab vorgenommen. Für diese Untersuchung wurde eine Simulationsumgebung geschaffen, mit deren Hilfe man die komplexen Vorgänge der Adaptivität darstellen und messen kann. Hierzu wurde das Softwarepaket Rhinoceros® genutzt. Die darin implementierte graphische Programmierschnittstelle erlaubt es, Geometrie zu parametrisieren. Innerhalb dieser Schnittstelle bestehen wiederum Programme zur numerischen Berechnung von Strukturen. Somit können unmittelbar numerische Lösungen von Modellen erhalten werden, die in Abhängigkeit bestimmter gestaltungsgewebender Parametereinstellungen in Echtzeit aufgebaut werden, wie es eine schrittweise untersuchte Interaktion von Stellgliedern mit adaptiven Flächen erfordert.

Mit diesen Werkzeugen wurde eine Biegelinie des Ersatzstabes einem Kreisbogen angenähert, wobei die Anzahl der Stützpunkte parametrisch variierbar ist. Die Approximation eines Kreisbogens durch eine Biegelinie wird stets Abweichungen ergeben, da sie an ihren Enden

Within this interface, there are programmes for the numerical calculation of structures. Thus, numerical solutions of models can be obtained immediately, built in real-time depending on certain formative parameter settings, as required when examining an incremental interaction of actuators with adaptive surfaces.

With these tools, a bending line of the replacement rod was approximated to a circular arc, whereby the number of support points can be varied parametrically. Approximation of a bending line to a circular arc will always result in deviations because, unlike the circular arc, it has no curvature at its ends. These deviations from the reference geometry are recorded and evaluated as position, inclination and curvature deviations over the course of the bending line, as shown exemplarily in Fig. 4. The course of the deviations turns out to be independent of the density of the supporting points and is always uniformly distributed between them. An increasing density of the supporting points positively influences the position deviation but not the curvature deviation.

Points on the bending line of the replacement rod were investigated as possible boundary

im Gegensatz zum Kreisbogen keine Krümmung aufweist. Diese Abweichungen zur Referenzgeometrie werden als Lage-, Neigungs- und Krümmungsabweichung über den Verlauf der Biegelinie aufgezeichnet und ausgewertet, wie beispielhaft in Bild 4 dargestellt ist. Der Verlauf der Abweichungen stellt sich als unabhängig von der Dichte der Stützpunkte dar und ist stets gleichförmig zwischen diesen verteilt, wobei die Lageabweichung besonders günstig von einer zunehmenden Dichte der Stützpunkte beeinflusst wird, während die Krümmungsabweichung gar nicht von der Dichte der Stützpunkte profitiert.

Um zu untersuchen, wie breit der wegen zu großer Abweichungen von der Idealform nicht nutzbare Rand der adaptiven Fläche mindestens ist, wurden Punkte auf der Biegelinie des Ersatzstabes als mögliche Grenzstellen der Formtreue untersucht. Die Ergebnisse wurden für einen fiktiven Flächenübergang zu einer benachbarten gleichartigen Fläche numerisch ausgewertet und visualisiert, Bild 5, links. Es zeigt sich, dass ein brauchbarer Übergang am Randabstand vom 1,38-Fachen der Stützpunkt-abstände erwartet werden kann. Entgegen den Erwartungen konnte gezeigt werden, dass kleinere Abstände zwischen den Stützpunkten aus o. g. Gründen nicht umfassend zu einer Verbesserung der Abbildungsqualität führen.

Eine günstige Teilungsdichte wurde aus dem Abgleich von steigendem Aufwand für Stützpunkte und der abnehmenden Abweichung bei Verwendung von mehr Stützpunkten ermittelt, Bild 5, rechts. Zusätzlich wurde eine Methode zur Lagekompensation der Ränder aufgezeigt, die darauf abzielt, im ersten Feld die Krümmung exakt auf die Referenzkrümmung einzustellen und so ab dem zweiten Stützpunkt eine hohe und annähernd von der Anzahl der Stützpunkte unabhängige Reproduktionsgenauigkeit zu erreichen. Hierbei wird das Endauflager vertikal verschoben, bis das Auflagerpaar am Stabende die Sollkrümmung ab dem zweiten Stützpunkt genau einstellt. Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung der Abbildungstreue und der Wirtschaftlichkeit, Bild 5, rechts.

points of the shape fidelity to identify the minimum width of the adaptive surface's edge, unusable due to excessive deviations from the ideal shape. The results were numerically evaluated and visualised for a fictitious surface transition to a similar neighbouring surface, Fig. 5, left. It turns out that a usable transition at the edge can be expected with a factor of 1.38 of the support point distances. Contrary to expectations and for the reasons mentioned above, the results showed that smaller distances between the interpolation points do not improve the representation quality.

A favourable distribution density was determined by balancing the increasing effort for support points and the decreasing deviation when using more support points, Fig. 5, right. In addition, a method for position compensation of the edges was demonstrated, aiming to adjust the curvature exactly to the reference curvature in the first field and thus to achieve a high reproduction accuracy from the second support point onwards that is almost independent of the number of support points. Hereby, the end support is moved vertically until the support pair at the end of the rod exactly adjusts the nominal curvature from the second support point onward. This leads to a significant improvement in representation fidelity and economy, Fig. 5, right.

3.4 Basics of transforming flat surfaces into doubly-curved geometries

The economic field of application of adaptive systems lies in their use to produce doubly-curved shapes. However, an orthotropic surface with strongly reduced shear stiffness can absorb the deformation exclusively via shear distortion without inducing normal stresses of a significant magnitude [3]. Thus, interpolation surfaces can not only be abstracted as crossed arrays of elastically bendable rods but can also be materialised in this way, acquiring favourable properties in the process. To create such a supporting surface, crossed arrays of thin, flexible rods are placed on top of each other and rotatably connected with

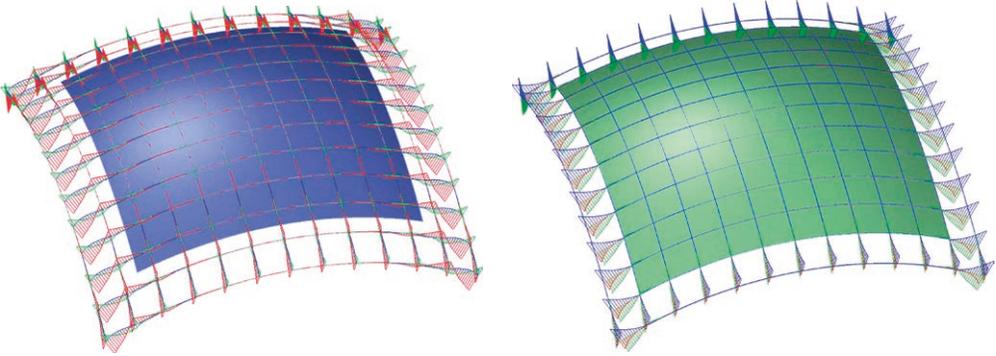


Bild 5: Abweichungsgraphen mit verbleibender nutzbarer Formfläche bei Grenze an Punkt 5 aus Bild 4 (links) und das gleiche System nach Kompensation (rechts): Die Nutzbarkeitsgrenze kann zu Punkt 4 aus Bild 4 erweitert werden und die Approximationsgenauigkeit ist verbessert. | **Fig. 5:** Deviation graphs with remaining usable surface for a border chosen at point 5 of Fig. 4 (on the left); on the right: The same system after compensation: The border can be extended to point 4 of Fig. 4, approximation accuracy is improved.

3.4 Grundlagen der Umformung ebener Flächen in doppelt gekrümmte Geometrien

Der wirtschaftliche Einsatzbereich adaptiver Systeme liegt in der Nutzung zur Herstellung doppelt gekrümmter Formen. Eine orthotrope Fläche mit stark reduzierter Schubsteifigkeit kann die Umformung aber ausschließlich über eine Schubverzerrung aufnehmen, ohne dass Normalspannungen in maßgeblicher Größe induziert werden [3]. Interpolationsflächen können also nicht nur als gekreuzte Scharen von elastisch biegbaren Stäben abstrahiert, sondern auch in dieser Weise materialisiert werden und dabei günstige Eigenschaften erhalten. Um so eine Stützfläche zu erstellen, werden gekreuzte Scharen dünner, elastisch biegbarer Stäbe übereinandergelegt und drehbar an Scherengelenken so miteinander verbunden, dass eine rautenförmige Verzerrung möglich ist.

3.5 Konstruktive Betrachtungen zur Stützfläche aus gekreuzten Stäben

Die Analyse von Implementierungen einer solchen Einrichtung aus gekreuzten Stäben als Stützfläche zeigt konstruktive Problemstellungen auf. Die maßgeblichen identifizierten Zwangspunkte betreffen den gleitenden Anschluss starrer Stützelemente, das Überwinden des Torsionswiderstands der Glieder und vor allem das Unvermögen einer darauf befestigten

scissor joints in a way that allows for rhombic distortion.

3.5 Structural considerations of the supporting surface made of crossed rods

Analysing implementations of such a supporting surface made of crossed rods shows constructive problems. The relevant constraining points identified are the sliding connection of rigid support elements, overcoming the torsional resistance of the elements, and, above all, the inability of an attached cover surface made of a soft isotropic material to follow the deformations of the support structure, in particular its shear distortion, without instabilities.

The requirements derived therefrom suggest a support surface that behaves smoothly in the tangential plane concerning normal and shear forces so that it performs a two-sided deformation via both compression and distortion. However, calculations on highly elastic isotropic materials that could accommodate this type of deformation rule them out. The results point to the fundamental problem of adaptive surfaces, namely that flat materials that are soft enough in the tangential plane to allow reshaping do not have the necessary bending stiffness against the plate plane to carry applied building material loads with little deformation.

Deckfläche aus einem weichen isotropen Material, die Verformungen des Rostes, insbesondere dessen Schubverzerrung, ohne Instabilitäten mitzugehen.

Die daraus abgeleiteten Anforderungen sprechen für eine Stützfläche, die sich in Tangentialebene weich gegenüber Normal- und Schubkräften verhält, sodass sie eine zweisinnige Umformung sowohl über Stauchung als auch über Verzerrung leistet. Berechnungen an hochelastischen isotropen Materialien, die diese Art der Umformung leisten könnten, schließen diese jedoch aus. Die Ergebnisse verweisen auf das grundlegende Problem adaptiver Flächen, dass nämlich flächige Materialien, die in Tangentialebene weich genug sind, eine Umformung zu erlauben, nicht über die erforderliche Biegesteifigkeit gegen die Plattenebene verfügen, um aufgebrachte Baustofflasten verformungsarm abzutragen.

3.6 Potenzial auxetischer Strukturen zur Nutzung als adaptive Stützfläche

Strukturierte Materialien, auch mechanische Metamaterialien genannt, sind Gefüge aus kleinstablich sich wiederholend angeordneten Strukturelementen, wie sie beispielsweise durch bestimmte Perforationen entstehen. Die Art der Kopplung der Strukturelemente untereinander führt in der Regel zu einem als auxetisch bezeichnetem Materialverhalten, weil Formänderungen in der Scheibenebene mit dem Verdrehen einzelner Strukturelemente einhergehen, was zu einem umgekehrten Querdehnverhalten mit negativer Poissonszahl führt (Bild 6). Materialien dieser Art sind durch Ronald Resch um 1970 erstmals Gegenstand u. a. von Patenten geworden, z. B. [4]. In [5] und [6] werden die geometrischen und mechanischen Grundlagen flächiger Materialien beschrieben, deren wichtigstes Merkmal die Aufnahme von großen Dehnungs- und Verzerrungsbeträgen ist. Quellen zur Biegesteifigkeit solcher Werkstoffe um die Plattenebene sind jedoch nicht bekannt.

Mit den eingangs beschriebenen digitalen Werkzeugen wurden verschiedene auxetische Strukturen diskret als Finite-Elemente-Modelle

3.6 Potential of auxetic structures for use as adaptive support surfaces

Mechanical metamaterials are structures consisting of small-scale, repetitively arranged structural elements, such as those created by certain perforations. The way in which the structural elements are coupled to each other usually leads to a material behaviour known as auxetic because shape changes in the plane are accompanied by twisting of individual structural elements, which leads to a reversed transverse strain behaviour with a negative Poisson's ratio (Fig. 6). This type of material first became the subject of research and patents by Ronald Resch around 1970, e.g. [4]. In [5] and [6], the geometrical and mechanical fundamentals of planar materials are described, whose most important feature is the absorption of large amounts of strain and distortion. However, sources on the bending stiffness of such materials around the panel plane are not known.

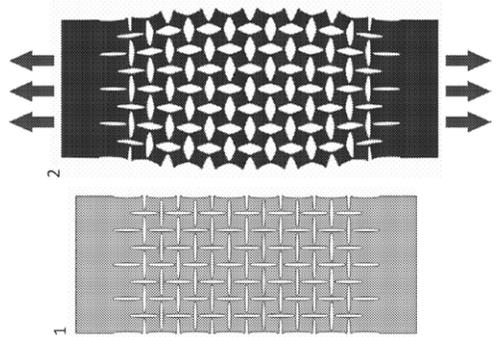


Bild 6: Perforierte Fläche mit auxetischen Eigenschaften, aus [7] | Fig. 6: Perforated surface with auxetic behaviour, taken from [7]

Various auxetic structures were discretised as finite element models (FE models) with planar and beam elements (Fig. 7) using the digital tools described earlier. Their stiffnesses against individual stresses were investigated. It was shown that the stiffness values under panel bending can be influenced independently of the tangential stiffness by adjusting the structure for certain structures. Hereby, the equivalent stiffness is higher against panel bending than against tangential forces, which corresponds to

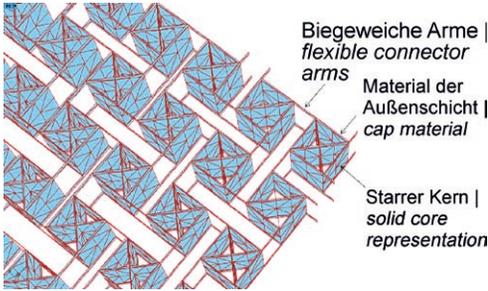


Bild 7: Parametrisch generiertes FE-Modell eines untersuchten Systems, bestehend aus starren Kernen und biegeweichen Kopplungsarmen | **Fig. 7:** Parametrically generated FE model of an analysed structure consisting of rigid cores and flexible coupling arms

(FE-Modelle) mit Flächen- und Stabelementen aufgebaut (Bild 7) und deren Steifigkeiten gegen einzelne Beanspruchungen untersucht. Es zeigte sich, dass bei bestimmten Gefügen die Steifigkeitswerte unter Plattenbiegung unabhängig von der Tangentialsteifigkeit durch das Anpassen des Gefüges beeinflusst werden können. Die äquivalente Steifigkeit ist dabei gegen Plattenbiegung höher als gegen Tangentialkräfte, was dem Anforderungsprofil einer adaptiven Stützfläche entspricht.

3.7 Adaptive Stützflächen aus strukturiertem Material mit auxetischen Eigenschaften

Auf Grundlage des erstellten Modells wurden verschiedene Ausprägungen von Strukturordnungen hinsichtlich ihres Potenzials untersucht, um eine größere Biegesteifigkeit gegenüber der Normalsteifigkeit zu erhalten.

the requirement profile of an adaptive support surface.

3.7 Adaptive support surfaces made of mechanical metamaterial with auxetic properties

Based on the model created, different manifestations of structural arrangements were investigated in terms of their potential to obtain greater bending stiffness compared to normal stiffness.

As a result of this series of calculations with different arrangement patterns or structural elements, one structural arrangement proved to be particularly favourable in terms of constructive aspects and performance. These are rigid square elements extending vertically and at their top and bottom sides, are connected to the respective neighbouring elements with bars in a mirror-symmetrical arrangement, Fig. 8.

Under normal uniaxial force, eccentrically applied forces act on the cores from the connected couplings. The cores tend to twist around their high point under these forces. This twisting is counteracted by the bending stiffness of the couplings connected to them; however, allowing large elastic bending deformations due to their thin bendable cross-section. The twisting of the cores is thus permitted to a defined extent. Since the force applied twists the cores in one direction, the structure contracts in the transverse direction. If this negative transverse

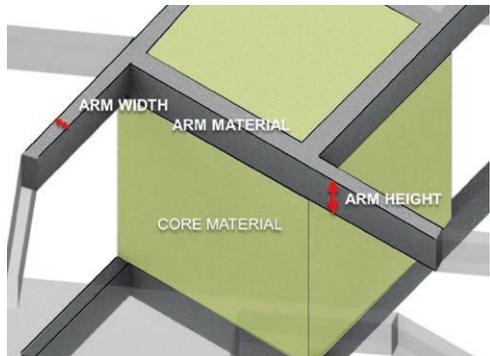
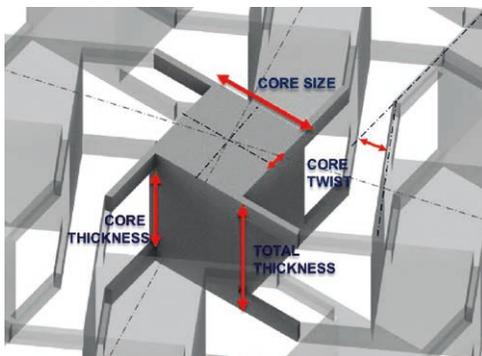


Bild 8: Darstellung der Gestaltparameter (links) und der Strukturparameter (rechts) am System aus Bild 7 mit verdrehten Kernen | **Fig. 8:** Representation of the design parameters (left) and the structural parameters (right) of the system depicted in Fig. 7 with rotated cores

Als Ergebnis dieser Berechnungsreihe mit verschiedenen Anordnungsmustern oder Strukturelementen erwies sich eine Strukturordnung in Bezug auf konstruktive Gesichtspunkte und Leistungsfähigkeit besonders günstig: Diese besteht aus steifen quadratischen Elementen, die eine vertikale Ausdehnung besitzen und die an ihrer Ober- und Unterseite durch Stabelemente mit den jeweils benachbarten Elementen in spiegelsymmetrischer Anordnung verbunden sind, Bild 8.

Unter uniaxialer Normalkraft wirken auf die Kerne exzentrisch ansetzende Kräfte aus den angeschlossenen Kopplungen. Die Kerne tendieren unter diesen Kräften zum Verdrehen um ihren Hochpunkt. Diesem Verdrehen steht die Biegesteifigkeit der an sie angeschlossenen Kopplungen entgegen, die aber wegen ihres dünnen biegeweichen Querschnitts große elastische Biegeverformungen zulassen. Das Eindrehen der Kerne wird somit in einem definierten Maß zugelassen. Die Verdrehung der Kerne infolge der Last in einer Richtung führt zum Zusammenziehen des Gefüges in Querrichtung. Wenn diese negative Querdehnung nicht behindert wird, wird das Gefüge somit weich gegenüber einer Normalkraft in Scheibenebene. Wenn sich die Kopplungen zwischen den Kernen unter Biegung verformen, wird zudem eine Schubverzerrung zugelassen. Bei Normalkraft und Schub in Scheibenebene werden stets das obere und das untere auxetische System gleichgerichtet verformt. Das Gefüge verhält sich weich.

strain is not hindered, the structure will thus become weak against a normal force in the plane. In addition, if the couplings between the cores deform under bending, shear distortion occurs as well. With normal force and thrust in the plane, the upper and lower auxetic system are always deformed in the same direction. The structure behaves “softly”.

3.8 Experimental production and testing of the support surface

The results were examined on 3D-printed samples, and the consistency of the results was verified by measuring the stiffnesses. Based on a reforming simulation, a structure was configured and 3D-printed on a scale of 1 : 2.5 of the dimensions intended for use as a formwork skin (Fig. 9, left). The surface thus created (Fig. 9, right) was mounted on actively controllable control elements that serve as support elements (Fig. 10). This resulted in a 45 mm thick, 1.2 m × 1.2 m adaptive support surface, controlled by 36 control elements and radii of up to a minimum of 2 m. The control elements are controlled via the developed simulation environment. As expected, the deformation of the supporting surface takes place proportionally through strains under normal forces and distortions in the tangential plane. The good expansibility allows the control elements to be clamped and not pivoted, as the change in length is absorbed by the curvature resulting from the expansibility of the structure.

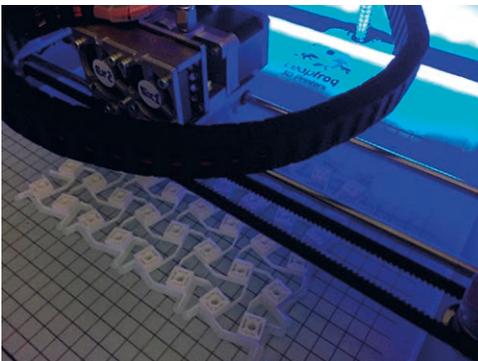


Bild 9: 3D-Druck von Kleinproben zur Verifikation der Simulationsergebnisse | **Fig. 9:** Three dimensional print of small test samples for simulation verification

3.8 Versuchsweise Herstellung und Erprobung der Stützfläche

Die Resultate wurden an 3D-gedruckten Mustern untersucht und die Stimmigkeit der Resultate durch Messungen der Steifigkeiten verifiziert. Auf Grundlage einer Umformsimulation wurde ein Gefüge im Maßstab 1 : 2,5 der für eine Nutzung als Schalhaut angestrebten Dimensionen konfiguriert und 3D-gedruckt (Bild 9, links). Die so erzeugte Fläche (Bild 9, rechts) wurde auf aktiv ansteuerbare Aktuatoren als Stützelemente montiert (Bild 10). So entstand eine 45 mm starke, 1,2 m × 1,2 m große adaptive Stützfläche, die von 36 Aktuatoren angesteuert wird und Radien bis minimal 2 m abbilden kann. Die Ansteuerung der Aktuatoren wird dabei über die entwickelte Simulationsumgebung geleistet. Wie erwartet, findet die Umformung der Stützfläche anteilig durch Dehnungen unter Normalkräften und durch Verzerrungen in der Tangentialebene statt. Die gute Dehnbarkeit erlaubt es, dass die Aktuatoren eingespannt und nicht schwenkbar gelagert sind, da die Längänderung durch Einprägen einer Krümmung infolge des Dehnvermögens des Gefüges aufgenommen wird.

4 Frischbetondruck bei frei geformten Betonbauteilen (Team Graubner)

4.1 Berechnungsmodelle zur Ermittlung des Frischbetondrucks

4.1.1 Allgemeines

Zur theoretischen Untersuchung des Frischbetondrucks frei geformter Betonbauteile wurde ein parametrisiertes numerisches Modell entwickelt. Die Modellierung erfolgte mit dem FEM-Programmsystem ANSYS. Hinsichtlich der Schalungs- bzw. Bauteilgeometrie können nahezu beliebige Neigungen und Krümmungen im Aufriss abgebildet werden, was bislang nicht möglich war. Das numerische Modell erfasst das zeitlich veränderliche Materialverhalten des Frischbetons während eines Betonierprozesses sowie die Reibung zwischen Frischbeton und



Bild 10: Funktioneller Modellversuch mit adaptiver Stützfläche im Maßstab 1 : 2,5 und aktiv steuerbaren Aktuatoren | **Fig. 10:** Functional mock-up testing with adaptive support surface (scale 1 : 2.5) and actively controllable control elements

4 Pressure of fresh concrete for free-formed concrete components (team Graubner)

4.1 Calculation models to determine the pressure of fresh concrete

4.1.1 General

A parameterised numerical model was developed for the theoretical investigation of the fresh concrete pressure of free-formed concrete components. The modelling was carried out with the FEM programme system ANSYS. With regard to the formwork or component geometry, almost any inclinations and curvatures can be represented in the elevation, which was previously not possible. The numerical model captures the time-varying material behaviour of the fresh concrete during a concreting process as well as the friction between fresh concrete and formwork skin or between fresh concrete and reinforcement. The consistency classes F5 and F6 were recorded in the material model for the first time in the project.

4.1.2 Model description

Input parameters are the casting rate as vertical rate of rise v , the final setting time of the fresh concrete t_E (or $t_{E,eff}$ if the time until the start of placement is taken into account), the weight of the fresh concrete γ_c , and the geometric param-

Schalhaut bzw. zwischen Frischbeton und Bewehrung. Im Vorhaben erfolgte erstmals eine Erfassung der Konsistenzklassen F5 und F6 im Materialmodell.

4.1.2 Modellbeschreibung

Eingangsparameter sind die Betoniergeschwindigkeit als vertikale Steiggeschwindigkeit v , das Erstarrungsende des Frischbetons t_E (bzw. $t_{E,eff}$ bei Berücksichtigung der Zeit bis zum Einbaubeginn), die Wichte des Frischbetons γ_c sowie die geometrischen Parameter je nach betrachteter Bauteilgeometrie wie Bauteilhöhe bzw. Betonierhöhe H , Bauteildicke b , Neigung zur Lotrechten α oder Krümmungsradius R (Bild 11).

Der Frischbeton wurde mit Scheibenelementen modelliert, die in übereinanderliegende Schichten unterteilt wurden. Zur Abbildung des zeitlich veränderlichen Materialverhaltens des Frischbetons können jeder Schicht unterschiedliche Materialparameter zugeordnet werden. Die Steifigkeiten von Schalhaut und Schalungssystem können realistisch oder vereinfacht mittels Translationsfedern abgebildet werden. Die Verbindung zwischen Frischbeton und Schalhaut bzw. Frischbeton und Bewehrung erfolgt

ters depending on the component geometry considered, such as component height or concreting height H , component thickness b , inclination to the vertical α or radius of curvature R (Fig. 11).

The fresh concrete was modelled with planar elements divided into superimposed layers. Different material parameters can be assigned to each layer to map the time-varying material behaviour of the fresh concrete. The stiffness of the formwork skin and the formwork system can be represented realistically or simplified using translating springs. The connection between fresh concrete and formwork skin or fresh concrete and reinforcement is made with non-linear node contact elements and associated target surfaces. Hereby, shear and compressive stresses can be transmitted. The simulation is carried out employing transient or steady-state calculation. The two calculation methods are described in detail in [8] and [9].

4.1.3 Material parameters

In the numerical model, the inelastic material law according to Drucker and Prager [10] was assigned to the planar elements, which requires the angle of internal friction α and the cohesion

Simulationsparameter | simulation parameters

- Konsistenzklasse | consistency class
- Wandhöhe, -dicke | wall height & thickness
- Neigung | inclination
- Steiggeschwindigkeit | rate of rise
- Erstarrungsende | solidification
- Wichte | density

F6
 $H = 3,5 \text{ m}$, $b = 20 \text{ cm}$
 $\alpha = 45^\circ$
 $v = 1,2 \text{ m/h}$
 $t_{E,eff} = 8,8 \text{ h}$
 $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$

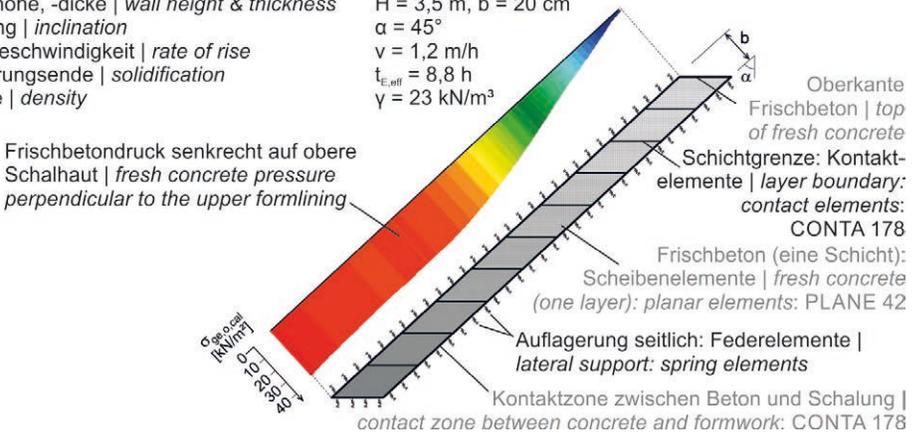


Bild 11: Exemplarisches Beispiel des numerischen Modells für eine geneigte Wand mit Frischbetondruckverteilung senkrecht zur oberen Schalhaut | Fig. 11: Exemplary example of the numerical model for an inclined wall with the distribution of fresh concrete pressure on the upper formwork surface

mit nichtlinearen Knoten-Kontaktelementen und zugehörigen Zieloberflächen. Dabei können Schub- und Druckspannungen übertragen werden. Die Simulation erfolgt mittels transienter oder stationärer Berechnung. Die beiden Berechnungsverfahren sind ausführlich in [8] und [9] beschrieben.

4.1.3 Materialparameter

Im numerischen Modell wurde den Scheibenelementen das nichtelastische Stoffgesetz nach Drucker und Prager [10] zugewiesen, das als Materialparameter den Winkel der inneren Reibung α und die Kohäsion c benötigt. Die Kohäsion wurde mit $c = 0$ angenommen und der Winkel der inneren Reibung inkl. Kohäsionsanteilen φ_{ges} über den Seitendruckbeiwert $\lambda = \sigma_h / \sigma_v$ unter Annahme eines aktiven Erddrucks wie folgt berechnet:

$$\varphi_{\text{ges}}^{[\text{rad}]} = -2 \cdot \arctan \sqrt{\lambda + \frac{\pi}{2}} \quad (1)$$

Für die Kontaktelemente wurde zur Abbildung der Reibung zwischen Frischbeton und Schalhaut als Parameter der Reibbeiwert μ benötigt. Daher wurden als integrale Parameter zeitliche Funktionen des Seitendruckbeiwerts $\lambda(t / t_{E,\text{eff}})$ und des Reibbeiwerts $\mu(t / t_{E,\text{eff}})$ für die zu untersuchenden Frischbetone benötigt. Bisher existierten derartige Funktionen nur für Frischbetone der Konsistenzklasse SVB, die innerhalb von [11] entwickelt wurden. Anhand der in den Materialversuchen ermittelten Messergebnisse zum Seitendruck- und Reibbeiwert wurden zeitliche Funktionen für diese beiden Beiwerte entwickelt. Dabei wurden für die in den Großversuchen (Abschnitt 4.2.2) verwendeten Betone Funktionen als Ist-Werte sowie in Verbindung mit in der Literatur verfügbaren Messwerten [11] zeitliche Funktionen für die Konsistenzklassen F5 und F6 als Mittel- und Quantilwerte abgeleitet.

Es zeigte sich, dass sich die Funktionen der Seitendruckbeiwerte für Betone beider Konsistenzklassen nur geringfügig voneinander unterscheiden, weshalb gemeinsame Formulierungen entwickelt wurden. Hinsichtlich des

c as material parameters. The cohesion was assumed to be $c = 0$, and the angle of internal friction including cohesion components φ_{ges} was calculated with the coefficient of lateral pressure $\lambda = \sigma_h / \sigma_v$, assuming an active earth pressure as follows:

$$\varphi_{\text{ges}}^{[\text{rad}]} = -2 \cdot \arctan \sqrt{\lambda + \frac{\pi}{2}} \quad (1)$$

For the contact elements, the coefficient of friction μ was required as a parameter for mapping the friction between the fresh concrete and the formwork skin. Therefore, temporal functions of the coefficient of lateral pressure $\lambda(t / t_{E,\text{eff}})$ and the coefficient of friction $\mu(t / t_{E,\text{eff}})$ were required as integral parameters for the fresh concretes to be investigated. Until now, such functions existed only for fresh concretes of consistency class SCC, which were developed within [11]. Temporal functions were developed for these two coefficients using the measurement results for the coefficients of lateral pressure and friction determined in the material tests. In the process, functions were derived as actual values for the concretes used in the large-scale tests (section 4.2.2) and, in conjunction with measured values available in the literature [11], temporal functions for the consistency classes F5 and F6 as mean and quantile values.

It was found that the functions of the lateral pressure coefficients for concretes of both consistency classes differed only slightly from each other, which is why common formulations were developed. Concerning the coefficient of friction, separate functions were developed for pure formwork skin friction and reinforced components, each as quantile and mean values. Here, the influence of vibrations on the coefficients of lateral pressure and friction is considered, as induced by internal vibrators when compacting fresh concrete. Fig. 12 shows the curves of the quantile values of the coefficients of lateral pressure and friction for the consistency classes F5, F6 and SCC. The shown curves of the coefficients of friction take reinforcement into account. Details on the derivation of the functions and the corresponding equations can be found in [8].

Reibbeiwerts wurden getrennte Funktionen entwickelt, für reine Schalhautreibung und für bewehrte Bauteile jeweils als Quantil- und Mittelwerte. Hierbei wird der Einfluss von Vibrationen auf Seitendruck- und Reibbeiwert berücksichtigt, wie sie beim Verdichten von Frischbeton durch Innenrüttler induziert werden. Bild 12 zeigt exemplarisch die Verläufe der Quantilwerte von Seitendruck- und Reibbeiwert für die Konsistenzklassen F5, F6 und SVB. Die dargestellten Verläufe der Reibbeiwerte berücksichtigen eine Bewehrung. Details zur Herleitung der Funktionen und die zugehörigen Gleichungen sind in [8] zu finden.

4.1.4 Modellverifizierung

Zur Verifizierung des entwickelten numerischen Modells wurden die durchgeführten Großversuche (Abschnitt 4.2.2) und weitere in der Literatur dokumentierte Versuche nachgerechnet, bei denen Betone der Konsistenzklassen F5, F6 und SVB verwendet wurden. Nähere Informationen zu Parametern und Messergebnissen aus der Literatur sind in [8] enthalten. Sowohl für Versuche mit lotrechten als auch mit geneigten Schalungen zeigten die Rechenwerte gute bzw. sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten, sowohl im Vergleich der Verläufe des Frischbetondrucks über die Schalungslänge als auch hinsichtlich der Werte der maximalen Frischbetondrücke.

In Bild 13 sind die gemessenen und berechneten Werte der maximalen Frischbetondrücke für Versuche mit Betonen der Konsistenzklasse F6 dargestellt. Die rechnerischen Werte im linken Diagramm wurden mit den Mittelwertfunktionen, die des rechten Diagramms mit den Quantilwertfunktionen ermittelt. Beide Diagramme zeigen eine gute Übereinstimmung von Rechen- und Messwerten und verdeutlichen die Eignung des numerischen Modells. Die Verifikationen für die Konsistenzklassen F5 und SVB sowie weitere Details und Hintergründe sind in [8] aufgeführt.

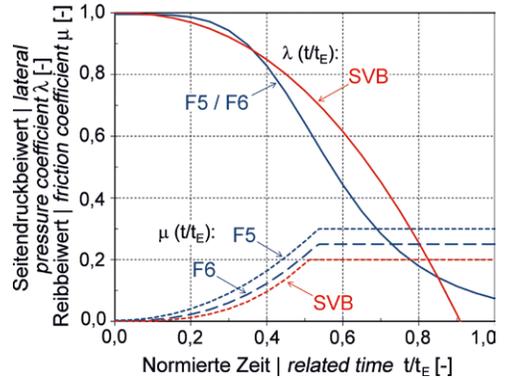


Bild 12: Seitendruckbeiwert λ und Reibbeiwert μ als Quantilwerte für die Konsistenzklassen F5, F6 und SVB | Fig. 12: Coefficient of lateral pressure λ and coefficient of friction μ as quantile values for consistency classes F5, F6 and SCC

4.1.4 Model verification

The large-scale tests carried out (section 4.2.2) and other tests documented in literature were recalculated using concretes of consistency classes F5, F6 and SCC to verify the numerical model developed. More detailed information on parameters and measurement results from literature can be found in [8]. For tests with both vertical and inclined formwork, the calculated values showed good or very good agreement with the measured values, both in the comparison of the fresh concrete pressure curves across the length of the formwork and with regard to the values of the maximum fresh concrete pressures.

Fig. 13 shows the measured and calculated values of the maximum fresh concrete pressures for tests with concretes of consistency class F6. The calculated values in the left graph were determined with the mean value functions, those in the right chart with the quantile value functions. Both charts show good agreement between calculated and measured values and illustrate the suitability of the numerical model. The verifications for the consistency classes F5 and SCC and further details and background details are listed in [8].

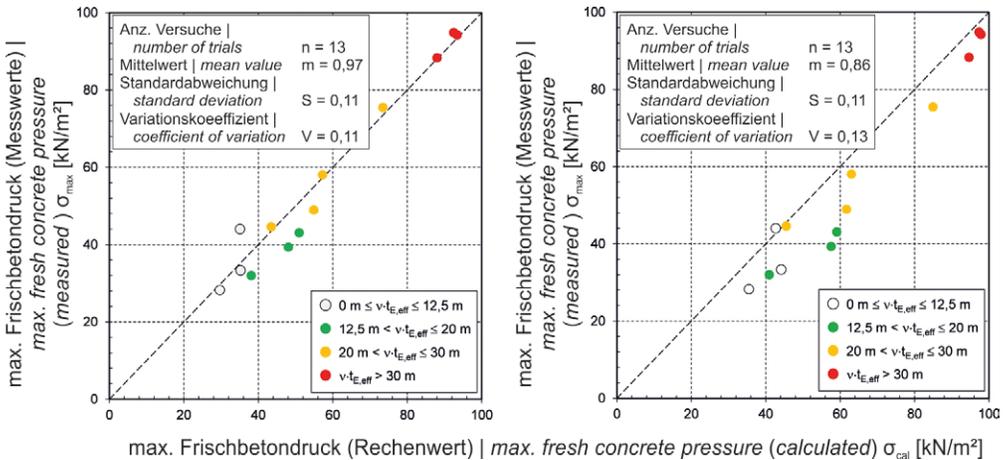


Bild 13: Mess- und Rechenwerte für Versuche mit Betonen der Konsistenzklasse F6 mit Mittelwert- (links) und Quantilwertfunktionen (rechts) von Seitendruck- und Reibbeiwerten | **Fig. 13:** Measured and calculated pressure values of full-scale tests with consistency classes F6 and mean values (left) and quantile values functions (right) of the coefficients of lateral pressure and friction

4.2 Bauteilversuche

4.2.1 Allgemeines

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden zwei Versuchsprogramme durchgeführt. Innerhalb von Versuchsprogramm I wurde der Frischbetondruck lotrechter und geneigter Wände in realmaßstäblichen Großversuchen experimentell untersucht. Im Fokus von Versuchsprogramm II standen Untersuchungen zum Seitendruck- und Reibbeiwert.

4.2.2 Versuche an lotrechten und geneigten Wänden

In den Großversuchen wurden eine lotrechte und eine geneigte Wand zeitgleich betoniert, Bild 14. Somit konnten die Ergebnisse aus Tests mit lotrechter Schalung als direkte Referenz für die mit geneigter Schalung herangezogen werden.

Es wurden die Einflüsse der Betoniergeschwindigkeit v , der Konsistenz des Frischbetons, der Verdichtungsintensität, der Bewehrung, der Bauteildicke b und der Schalungsneigung α auf den Frischbetondruck untersucht. Die maßgeblichen Versuchsparameter sind detailliert in [8] und [9] aufgeführt. In Bild 15 sind die ermittel-

4.2 Component tests

4.2.1 General

Two experimental programmes were carried out as part of the experimental investigations. Part of test programme I investigated the pressure of fresh concrete in vertical and inclined walls experimentally in large, real-scale tests. Test programme II focused on investigations into the lateral pressure and friction coefficients.

4.2.2 Tests on vertical and inclined walls

In the large-scale tests, a vertical and an inclined wall were concreted simultaneously, Fig. 14. Thus, the results from tests with vertical formwork could be used as a direct reference for those with inclined formwork.

The influences of the casting rate v , the consistency of the fresh concrete, the compaction intensity, the reinforcement, the component thickness b and the formwork inclination α on the fresh concrete pressure were investigated. The relevant test parameters are listed in detail in [8] and [9]. Fig. 15 plots the specified maximum pressures of fresh concrete of the vertical formwork σ_{tot} and the inclined upper formwork $\sigma_{ge,o}$. The REF test served as a refer-

ten maximalen Frischbetondrücke der lotrechten Schalung σ_{lot} und der geneigten oberen Schalung $\sigma_{ge,o}$ aufgetragen. Als Referenz diente der Versuch REF mit einer Betoniergeschwindigkeit von 2 m/h, Konsistenzklasse F5, Wanddicke 20 cm, bewehrt ($2 \times Q188A$), 38 mm Innenrüttler und Neigung 0 bzw. 45°.

Die Versuchsergebnisse der Versuche 2–5 verdeutlichen den maßgeblichen Einfluss der Betoniergeschwindigkeit v (1 und 4 m/h) und der Frischbetonkonsistenz (F4 und SVB) auf den Frischbetondruck bei lotrechten und geneigten Wänden. Versuch 6 bestätigt den großen Einfluss der Verdichtungsintensität auf den Frischbetondruck. Die Versuche 8–11 mit einer Wanddicke von 10 cm zeigen den signifikanten Einfluss der Verdichtungsintensität auf den Frischbetondruck. Die Versuche 8–11 mit einer Wanddicke von 10 cm zeigen den signifikanten Einfluss der Verdichtungsintensität auf den Frischbetondruck.

In Bild 16 sind die in den Versuchen maximal aufgetretenen Frischbetondrücke, normiert auf den hydrostatischen Frischbetondruck, dargestellt. Auf der Abszisse sind die normierten Drücke der lotrechten Schalung $\sigma_{lot} / \sigma_{hyd}$ und auf der Ordinate die der oberen geneigten Schalung $\sigma_{ge,o} / \sigma_{hyd}$ aufgetragen. Bild 16 zeigt, dass der Frischbetondruck einer geneigten oberen Schalung immer kleiner ausfällt als bei einer lotrechten Schalung mit ansonsten gleichen Eigenschaften. Die normierten Frischbetondrücke der lotrechten und der geneigten Schalung der Versuche 5, 7 und 11 liegen nahe



Bild 14: Versuchsstand für Betonierversuche; im Vordergrund geneigtes Schalungssystem, im Hintergrund lotrechtes Schalungssystem | **Fig. 14:** Test set-up for concreting tests; front: inclined formwork system, background: vertical formwork system

ence with a casting rate of 2 m/h, consistency class F5, wall thickness 20 cm, reinforced ($2 \times Q188A$), 38 mm internal vibrator and inclination 0 or 45°.

The test results of tests 2–5 illustrate the decisive influence of the casting rate v (1 and 4 m/h) and the fresh concrete consistency (F4 and SCC) on the fresh concrete pressure for vertical and inclined walls. Test 6 confirms the significant influence of the compaction intensity on the pressure of fresh concrete. Tests 8–11 with a wall thickness of 10 cm show the considerable influence of the wall thickness on the fresh concrete pressure.

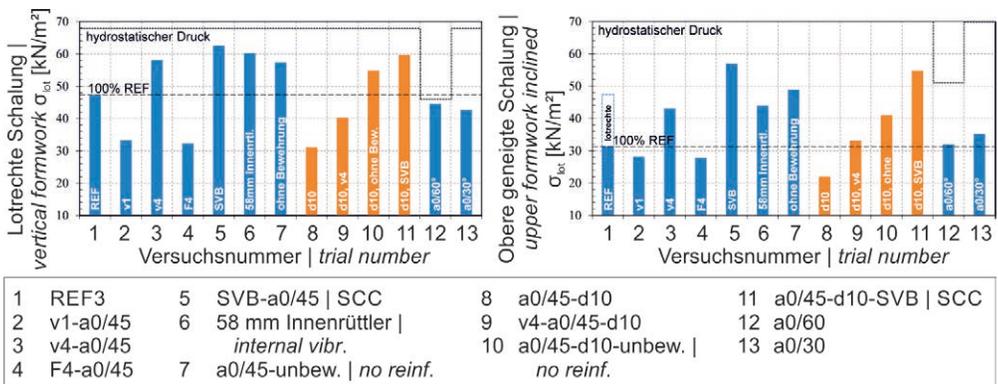


Bild 15: Maximale Frischbetondrücke auf die lotrechte Schalung σ_{lot} (links) und die obere geneigte Schalung $\sigma_{ge,o}$ (rechts) | **Fig. 15:** Maximum pressure of fresh concrete on the vertical formwork σ_{lot} (left) and the upper inclined formwork $\sigma_{ge,o}$ (right)

dem hydrostatischen Frischbetondruck. Dabei stellten sich die Maximalwerte erst am Betonierende ein und wären bei größerer Betonierhöhe weiter angestiegen. Dies zeigt, dass bei Frischbetondrücken nahe dem hydrostatischen Wert der Einfluss der Vibration gering ist. Bei Frischbetondrücken deutlich unterhalb dem hydrostatischen Wert sind die Unterschiede des Frischbetondrucks einer lotrechten und einer geneigten Schalung ausgeprägter, was auf die unterschiedlichen Entfernungen des Innenrüttlers zum Ort des maximalen Frischbetondrucks zurückgeführt wird. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass durch die direkte Wirkung des Frischbetoneigengewichts auf die untere Schalung die dadurch vergrößerte Reibung zwischen Frischbeton und Schalhaut bzw. Bewehrung reduzierend auf den Frischbetondruck wirkt. Ausführliche Erläuterungen können [8] entnommen werden.

4.2.3 Versuche zum Seitendruck- und Reibbeiwert

Im Versuchsprogramm II wurde der Seitendruck- und Reibbeiwert in der von Proske [11] entwickelten kombinierten Versuchsapparatur für die in den Großversuchen verwendeten Betone analysiert. Die Ergebnisse wurden zur Entwicklung von zeitlichen Funktionen für Seitendruck- und Reibbeiwert herangezogen. Details sind in [8] nachzulesen.

4.3 Theoretische Untersuchungen zum Frischbetondruck

Mit dem entwickelten und verifizierten numerischen Modell wurden umfangreiche theoretische Untersuchungen zum Frischbetondruck frei geformter Betonbauteile durchgeführt. Im Detail wurden lotrechte und im Aufriss geneigte sowie radial gekrümmte Wände analysiert. Besonderer Fokus lag auf dem Einfluss der Wanddicke auf den Frischbetondruck, insbesondere bei sehr dünnwandigen Betonbauteilen. Die Untersuchungen erfolgten für Betone der Konsistenzklassen F5, F6 und SVB, da bei filigranen geneigten oder gekrümmten Betonbauteilen derartige Betone sinnvollerweise eingesetzt

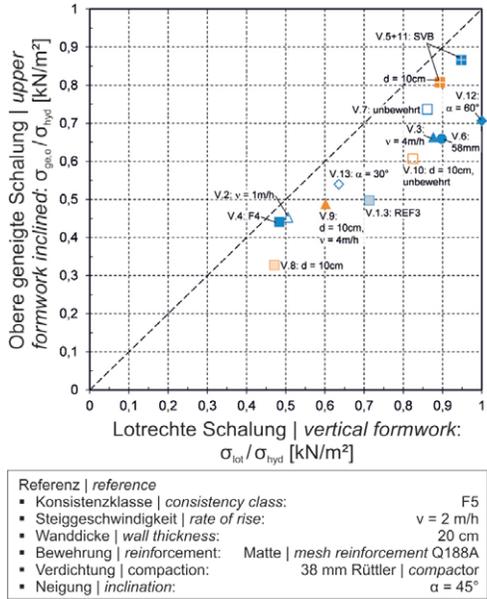


Bild 16: Normierte Frischbetondrücke der lotrechten und der oberen geneigten Schalung | **Fig. 16:** Normalized pressure of fresh concrete of the vertical and the upper inclined formwork

Fig. 16 shows the maximum pressure of fresh concrete occurring in the tests, normalised to the hydrostatic pressure of fresh concrete. The normalised pressure of the vertical formwork $\sigma_{lot} / \sigma_{hyd}$ are plotted on the abscissa and those of the upper inclined formwork $\sigma_{ge,o} / \sigma_{hyd}$ are plotted on the ordinate. Fig. 16 shows that the fresh concrete pressure of an inclined upper formwork is always smaller than that of a vertical formwork with otherwise the same properties. The normalised fresh concrete pressures of the vertical and the inclined formwork from tests 5, 7 and 11 are close to the hydrostatic pressure of fresh concrete. The maximum values were only reached at the end of the concreting process. They would have increased further with a greater pouring height, indicating that with fresh concrete pressures close to the hydrostatic value, the influence of vibration is small. The differences in the pressure of fresh concrete in a vertical and an inclined formwork are more pronounced if the pressure of fresh concrete is significantly below the hydrostatic value. This is attributed to the different distances of the internal vibrator to the location

werden. Betrachtet wurden der Einfluss der Betoniergeschwindigkeit v , des Erstarrungsendes $t_{E,eff}$, der Bauteildicke b , der Bewehrung sowie der Neigung des Bauteils zur Lotrechten α . Der Frischbetondruck von im Aufriss radial gekrümmten Wänden wurde für drei unterschiedliche Wandtypen, die sich im Öffnungswinkel und durch die Verhältnisse zwischen Betonierhöhe und Radius unterschieden, für verschiedene Krümmungsradien R untersucht, Bild 17.

Bei lotrechten Wänden wurde festgestellt, dass neben Betoniergeschwindigkeit und Erstarrungsende des Betons insbesondere die Bewehrung und die Wanddicke einen signifikanten Einfluss auf den maximalen Frischbetondruck haben. Anhand der Berechnungsergebnisse wurde eine Gleichung abgeleitet, mit welcher der maximale Frischbetondruck lotrechter Wände in Abhängigkeit der vorgenannten maßgeblichen Eingangsparmeter berechnet werden kann [8].

Der Frischbetondruck geneigter Wände wird nicht nur durch deren Neigung, sondern wie bei einer lotrechten Wand auch von Betoniergeschwindigkeit und Erstarrungsende sowie von den zugrundeliegenden Funktionen des Reibbeiwerts und der Bauteildicke beeinflusst. In Bild 18 sind exemplarisch für die Konsistenzklasse F6 Verläufe normierter Frischbetondrücke $\sigma_{a,max} / \sigma_{h,max}$ für mehrere Wanddicken und Betoniergeschwindigkeiten aufgetragen. Der normierte Frischbetondruck beschreibt das Verhältnis des Frischbetondrucks senkrecht zur oberen geneigten Schalung zum Frischbetondruck einer lotrechten Wand mit ansonsten gleichen Eigenschaften. Anhand von Bild 18 wird ersichtlich, dass der Frischbetondruck einer geneigten Schalung mit zunehmender Neigung den Frischbetondruck einer lotrechten

of the maximum fresh concrete pressure. Furthermore, it is assumed that due to the direct impact of the dead weight of the fresh concrete on the lower formwork, the resulting increased friction between fresh concrete and formwork skin or reinforcement has a reducing effect on the pressure of fresh concrete. Detailed explanations can be found in [8].

4.2.3 Lateral pressure and friction coefficient tests

In test programme II, the lateral pressure and friction coefficients were analysed in the combined test apparatus developed by Proske [11] for the concretes used in the large-scale tests. The results were used to develop temporal functions for the lateral pressure and friction coefficients. Details can be found in [8].

4.3 Theoretical investigations of the pressure of fresh concrete

The developed and verified numerical model was used for extensive theoretical investigations on the pressure of fresh concrete of free-formed concrete components. Vertical and inclined as well as radially curved walls were analysed in detail. Particular focus was placed on the influence of the wall thickness on the pressure of fresh concrete, especially for very thin-walled concrete components. The investigations were carried out for concretes of the consistency classes F5, F6 and SCC, since such concretes are used for filigree inclined or curved concrete components. The influence of the casting rate v , the setting end $t_{E,eff}$, the component thickness b , the reinforcement, and the component's inclination to the vertical α were considered. The fresh concrete pressure of walls radially curved in elevation was investigated for three different wall types, which differed in the opening angle and the ratios between concreting height and radius for different radii of curvature R , Fig. 17.

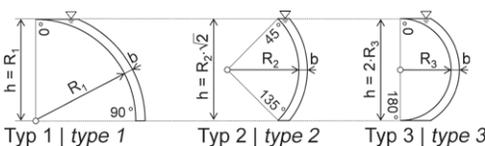


Bild 17: Radial gekrümmte Wände im Aufriss | Fig. 17: Walls radially curved in elevation

For vertical walls, it was found that the reinforcement and the wall thickness, in particular, have a significant influence on the maximum

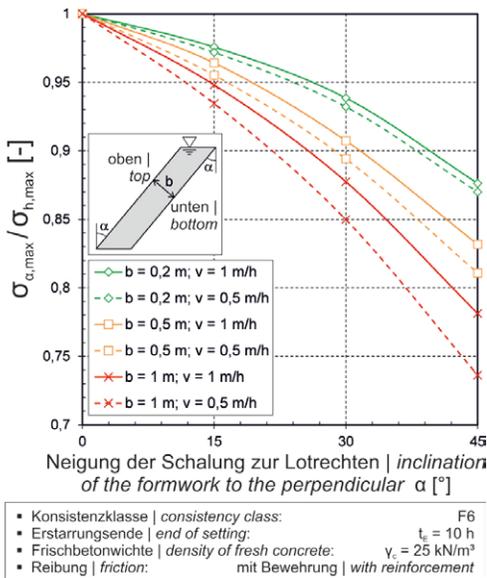


Bild 18: Normierte Frischbetondrücke geneigter Wände (oberes Schalungselement) | Fig. 18: Normalised pressure of fresh concrete of inclined walls (upper formwork element)

Schalung deutlich unterschreitet. Der Frischbetondruck für eine untere Schalung kann durch Addition des senkrecht zur Schalhaut wirkenden Eigengewichtsanteils des Frischbetons errechnet werden. Die Ergebnisse zum Frischbetondruck bei den im Aufriss radial gekrümmten Wänden sind in [8] ausführlich dokumentiert.

4.4 Berechnungsvorschlag zur Bestimmung des Frischbetondrucks

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen wurde ein Berechnungsvorschlag zu Bestimmung des Frischbetondrucks von lotrechten, geneigten und gekrümmten Betonbauteilen erarbeitet. Der Zuverlässigkeitsindex wurde entsprechend JCSS [13] mit $\beta = 3,7$ berücksichtigt. Die Modellunsicherheiten wurden separat für jede betrachtete Konsistenzklasse ermittelt. Für den Bemessungsansatz wurde der Teilsicherheitsbeiwert für den Grenzzustand der Tragfähigkeit mit $\gamma_F = 1,5$ vorgegeben. Mit den Kalibrierfaktoren für die betrachteten Konsistenzklassen F5, F6 und SVB wurden die zuvor ermittelten Bestimmungsgleichungen zur

pressure of fresh concrete in addition to the casting rate and the final setting time of the concrete. An equation was derived based on the calculation results, with which the maximum fresh concrete pressure of vertical walls can be calculated depending on the aforementioned decisive input parameters [8].

The pressure of fresh concrete of inclined walls is not only influenced by their slope, but also, as with a vertical wall, by the casting rate and the final setting time, and by the underlying functions of the coefficient of friction and the component thickness. Fig. 18 shows exemplary curves of normalised pressure of fresh concrete pressure $\sigma_{\alpha, \max} / \sigma_{h, \max}$ for several wall thicknesses and casting rates (consistency class F6). The normalised pressure of fresh concrete describes the ratio of the pressure of fresh concrete perpendicular to the upper inclined formwork to the pressure of fresh concrete of a vertical wall with otherwise the same properties. Fig. 18 shows that, with increasing inclination, the pressure of fresh concrete in an inclined formwork is significantly lower than that in a vertical formwork. The pressure of fresh concrete for a lower formwork can be calculated by adding the self-weight portion of the fresh concrete acting perpendicular to the formwork. The results for the pressure of fresh concrete of walls radially curved in elevation are documented in detail in [8].

4.4 Calculation proposal to determine the pressure of fresh concrete

Based on the previous investigations, a calculation proposal to determine the pressure of fresh concrete of vertical, inclined and curved concrete components was developed. According to JCSS, the reliability index was considered with $\beta = 3.7$ [13]. The model uncertainties were determined separately for each consistency class considered. For the dimensioning approach, the partial safety factor for the ultimate limit state was specified as $\gamma_F = 1.5$. With the calibration factors for the considered consistency classes F5, F6 and SCC, the previously determined conditional equations to calculate the maximum

Berechnung des maximalen Frischbetondrucks modifiziert, wie ausführlich in [8] erläutert ist.

pressure of fresh concrete were modified, as explained in detail in [8].

In Bild 19 sind charakteristische Werte des maximalen Frischbetondrucks bei lotrechten Wänden und variierender Betoniergeschwindigkeit für einen Beton F6 dargestellt. Es wird erneut deutlich, dass der Frischbetondruck von bewehrten sowie von dünnen Bauteilen deutlich kleiner ausfällt als bei unbewehrten oder dickeren Bauteilen. Der in Bild 19 eingezeichnete Verlauf des Frischbetondrucks nach DIN 18218 [14], die derzeit den Stand der Technik darstellt, verdeutlicht, dass bei gleichem Sicherheitsniveau durch den neuartigen Berechnungsvorschlag deutlich kleinere Frischbetondrücke bei der Dimensionierung von Schalungssystemen angesetzt werden können.

Fig. 19 shows the characteristic values of the maximum pressure of fresh concrete for vertical walls, and varying casting rates are shown for F6 concrete. Once again, it becomes clear that the pressure of fresh concrete of reinforced and thin components is significantly lower than that of unreinforced or thicker components. The path of the pressure of fresh concrete according to DIN 18218 [14] shown in Fig. 19, which currently represents state of the art, illustrates that the new calculation model allows using significantly lower pressure values of fresh concrete in the dimensioning of formwork systems while maintaining the same safety level.

Bild 20 zeigt Verläufe der charakteristischen Werte des maximalen Frischbetondrucks senkrecht zur oberen Schalhaut einer geneigten Wand für mehrere Neigungswinkel und Bauteildicken bei Konsistenzklasse F6. Bei Verlassen des Anwendungsbereichs von DIN 18218 [14] wird auf den

Fig. 20 shows curves of the characteristic values of the maximum pressure of fresh concrete perpendicular to the upper formwork skin of an inclined wall for several angles of inclination and component thicknesses at consistency class F6. When going beyond the scope of DIN 18218 [14], reference is made to the hydrostatic pressure

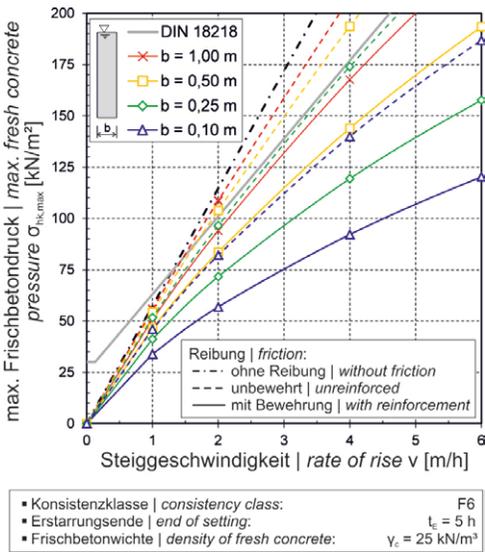


Bild 19: Charakteristische Werte des maximalen Frischbetondrucks lotrechter Wände nach dem Berechnungsvorschlag und nach DIN 18218 [14] | **Fig. 19:** Characteristic values of the maximum pressure of fresh concrete pressure of vertical walls according to the calculation proposal and DIN 18218 [14]

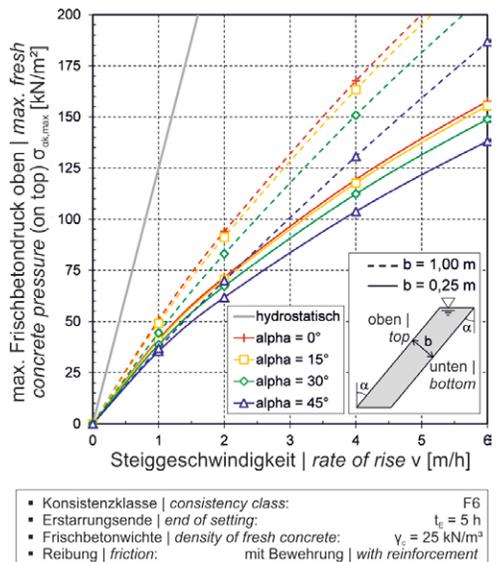


Bild 20: Charakteristische Werte des maximalen Frischbetondrucks geneigter Wände nach dem Berechnungsvorschlag | **Fig. 20:** Characteristic values of the maximum pressure of fresh concrete pressure of inclined walls according to the calculation proposal

hydrostatischen Frischbetondruck verwiesen, der ebenfalls in Bild 20 eingezeichnet ist. Beim Vergleich der Verläufe des Frischbetondrucks nach DIN 18218 und Berechnungsvorschlag wird deutlich, dass sowohl bei gewöhnlichen Wanddicken von $b = 0,25 \text{ m}$ als bei auch sehr großen Wanddicken wie $b = 1 \text{ m}$ der Frischbetondruck geneigter Wände den hydrostatischen Frischbetondruck signifikant unterschreitet.

Die den Diagrammen in Bild 19 und Bild 20 zugrundeliegenden Gleichungen für die Konsistenzklasse F6 sowie für F5 und SVB sind in [8] enthalten, ebenso die zugehörigen Lastbilder zum Ansatz des Frischbetondrucks auf die Schalungssysteme.

5 Kommerzielles Verwertungspotential

Eine Patentrecherche ergab, dass ein auxetisches Gefüge in der im Abschnitt 3.6 beschriebenen Form nicht dem bekannten Stand der Technik entspricht. Daher wurde das Patent „System zur Aufnahme von außen einwirkender Kräfte“ angemeldet (erteilt 2018) [15] (Bild 21). Im Patent wird die Möglichkeit, Biege- und Normalsteifigkeit unabhängig voneinander einzustellen, thematisiert. So wird auch eine Variante beschrieben, die umgekehrt zur hier beschrie-

ben of fresh concrete, also depicted in Fig. 20. When comparing the pressure curves of fresh concrete according to DIN 18218 and the calculation proposal, it becomes clear that the pressure of fresh concrete of inclined walls is significantly lower than the hydrostatic pressure of fresh concrete, both for normal wall thicknesses of $b = 0.25 \text{ m}$ and for very large wall thicknesses such as $b = 1.00 \text{ m}$.

The equations underlying the charts in Fig. 19 and Fig. 20 for consistency class F6 and for F5 and SCC are included in [8], just as the associated load diagrams for the impact of the fresh concrete pressure on the formwork systems.

5 Commercial exploitation potential

A patent search revealed that an auxetic structure in the form described in section 3.6 does not correspond to the known state of the art. Therefore, a patent entitled “System for absorbing forces acting from outside” was filed in June 2016 and issued in 2018 [15], Fig. 21. The patent application addresses the possibility of adjusting bending and normal stiffness independently. Therefore, it also describes a variant that could be ‘programmed’ to behave stiffly against normal forces in the plane and softly against panel bending, in contrast to the design

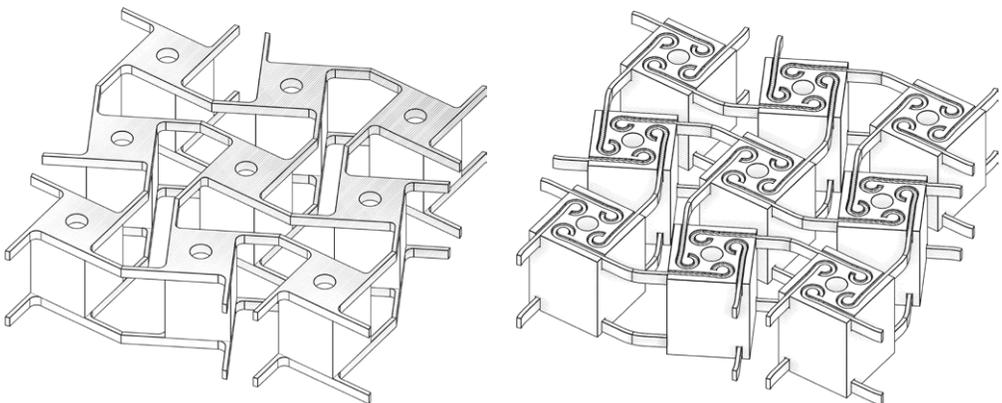


Bild 21: Auszug aus dem Patent [15]; links: Materialisierungsbeispiel aus zwei gelaserten Blechen und starren Blöcken als Abstandhalter, rechts: starre Blöcke z. B. aus UHPC, mit Nuten zur Aufnahme von Federbügeln als Kopplungen | **Fig. 21:** Extract from the patent [15]; left: materialisation example of two laser-cut metal sheets and rigid spacer blocks, right: rigid blocks, e.g. made of UHPC, with grooves to accommodate spring clips as couplings

benen Ausbildung gegen Normalkräfte in Scheibenebene steif und gegen Plattenbiegung weich ‚programmiert‘ werden könnte. Es wurde in diesem Zusammenhang auch erkannt, dass sich auxetische Stützflächen auch zur Formgebung anderer Materialien eignen, wie zum Beispiel Gläsern oder Polymeren, wobei in letzterem Fall auf eine dichtende Deckfläche verzichtet werden kann. Im Patentantrag wurden Materialisierungsvarianten der auxetischen adaptiven Stützfläche dargestellt, die aufzeigen, dass die Herstellung einer solchen adaptiven Stützfläche auch ohne 3D-Druck sehr einfach sein kann. So ist beispielsweise denkbar, die Kerne selbst aus Beton herzustellen und die Verbindungen als Federbügel in Nuten einzulassen.

6 Zusammenfassung

Die günstigen Eigenschaften von Beton bleiben bei der Herstellung von Schalen und freien Formen aufgrund des hohen Schalungsaufwandes oft ungenutzt. Die Technik der adaptiven Schalung kann diesen Aufwand erheblich reduzieren. Die Technologie wurde jedoch bislang nicht in einer industriellen Herstellung von tragenden Bauteilen eingesetzt. Problemstellungen wie die Ungenauigkeit der Ränder oder die vielen konstruktiven Zwänge bei der Implementierung einer Stützfläche aus gekreuzten Scharen von elastisch verformbaren Stäben wurden als Hemmnisse auf dem Weg hin zur Nutzung erkannt.

Die Forschung in diesem Feld zeigt zunächst auf, dass in einer Simulationsumgebung, aus parametrisierbarer Geometrie in Verbindung mit einer numerischen Lösungseinheit die komplexen Vorgänge einer adaptiven Einrichtung simuliert werden können. Diese Methode wird u. a. genutzt, das komplexe Verhalten neigender Stütz- und Stellglieder vorherzusagen und um eine Genauigkeitsvorhersage für adaptive Fläche zu treffen. Die Erkenntnis, dass mechanische Metamaterialien mit auxetischen Eigenschaften hervorragende Eigenschaften für die Nutzung als adaptive lastabtragende Flächen haben, ist neuartig und erlaubt, die entscheidenden Probleme der bisherigen Im-

described here. In this context, it was also recognised that auxetic support surfaces are also suitable for shaping other materials, such as glasses or polymers, whereby in the latter case, a top sealing surface can be dispensed with. The patent application includes materialisation variants of the adaptive auxetic support surface, demonstrating that such adaptive support surfaces can be very simple to produce, even without 3D printing. It is, for example, conceivable to make the cores out of concrete and to set spring clip connections into grooves.

6 Summary

The favourable properties of the material concrete often remain unused in the production of shells and free forms due to the high effort needed to create the formwork. Adaptive formwork technology can reduce this effort considerably. However, this technology has not yet been used in the industrial production of load-bearing components. Problems such as edge inaccuracy or the many design constraints in implementing a support surface of crossed flexible rods arrays were identified as obstacles on the way to implementation.

Research in this field demonstrates that the complex processes of an adaptive device can be simulated in a simulation environment consisting of parameterisable geometry in conjunction with a numerical solution unit. This method is used, among other things, to predict the complex behaviour of inclining support and control elements and to make an accuracy prediction for adaptive surfaces. The realisation that mechanical metamaterials with auxetic properties have excellent properties for use as adaptive load-bearing surfaces is novel. It allows the crucial problems of previous implementations of adaptive shaping to be remedied. It was shown that the mechanical properties of these materials could be programmed so that bending and normal stiffness can be adjusted independently, which could not be achieved with any conventional material. The 3D-printed adaptive support surface of the large-scale test demon-

plementierungen der adaptiven Formgebung abzustellen. Es wurde aufgezeigt, dass diese Materialien in ihren mechanischen Eigenschaften so programmiert werden können, dass Biege- und Normalsteifigkeit unabhängig voneinander einstellbar sind, was mit keinem herkömmlichen Material zu erreichen wäre. Mit der 3D-gedruckten adaptiven Stützfläche des Großversuchs konnte erfolgreich aufgezeigt werden, dass Eigenschaften dieser an sich einfach aufgebauten adaptiven Stützflächen so konfiguriert werden können, dass sie an eine vorgegebene Umgebung angepasst werden können und sich als adaptive Fläche sehr gut eignen. Die Nutzung mechanischer Metamaterialien mit auxetischen Eigenschaften zur Formgebung wurde nach Recherchen für neuartig befunden, so dass hierfür ein Verfahren zur Patentierung eingeleitet wurde. Hierbei wird auch das Potenzial dieser Systeme über die Formgebung von Beton hinaus thematisiert und beschrieben.

Der Frischbetondruck geneigter oder gekrümmter Betonbauteile war bisher weitestgehend unerforscht. Die DIN 18218 macht keine Angaben zur Bestimmung des Frischbetondrucks bei Lotabweichungen größer 5° bzw. für gekrümmte Betonbauteile. Auch konnten bisher existierende Modell nicht den Einfluss der Bauteildicke und der Bewehrung auf den Frischbetondruck bei Verwendung von Betonen mit fließfähiger oder sehr fließfähiger Konsistenz erfassen. Die Untersuchungen haben den großen Einfluss der Reibung zwischen Frischbeton und Schalhaut bzw. zwischen Frischbeton und Bewehrung sowie der Bauteildicke auf den Frischbetondruck verdeutlicht und belegt. Durch den neuartigen Berechnungsvorschlag zur Bestimmung des Frischbetondrucks von lotrechten, geneigten und gekrümmten Betonbauteilen bei Verwendung von Betonen mit (sehr) fließfähiger oder selbstverdichtender Konsistenz ist es möglich, für vorgenannte Betonbauteile den Frischbetondruck zu ermitteln. Durch die Möglichkeit der Berücksichtigung der Bewehrung bzw. der Bauteildicke können der Frischbetondruck realitätsnaher bestimmt und Schalungssysteme wirtschaftlicher bemessen werden. Darüber hi-

strated successfully that properties of these relatively simple adaptive support surfaces could be configured in such a way that they can be adapted to a given environment and are very suitable as an adaptive surface. Research found the use of mechanical metamaterials with auxetic properties for shaping to be novel, which is why a patenting procedure was initiated. The potential of these systems beyond the shaping of concrete is also discussed and described.

The pressure of fresh concrete of inclined or curved concrete components has been largely unexplored until now. DIN 18218 does not provide any information on the specification of the pressure of fresh concrete for vertical deviations greater than 5° or for curved concrete components. Also, existing models could not capture the influence of the component thickness and the reinforcement on the pressure of fresh concrete when using concretes with flowable or very flowable consistency. The investigations have clarified and proven the significant influence of the friction between fresh concrete and the formwork or between fresh concrete and reinforcement as well as the component thickness on the pressure of fresh concrete. The new calculation proposal to determine the pressure of fresh concrete of vertical, inclined and curved concrete components when using concretes with flowable, very flowable or self-compacting consistency makes it possible to specify the pressure of fresh concrete for the aforementioned concrete components. Since the reinforcement or the component thickness can be taken into consideration, the pressure of fresh concrete can be determined more realistically, and formwork systems can be designed more economically. Furthermore, the smaller calculated values of the pressure of fresh concrete enable completely new types of formwork systems for free-formed wall-like concrete components, especially for thin-walled concrete components.

naus werden insbesondere bei dünnwandigen Betonbauteilen durch die kleineren rechnerischen Werte des Frischbetondrucks völlig neuartige Typen von Schalungssystemen für wandartige freigeformte Betonbauteile ermöglicht.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198151796 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding project no. 198151796 within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Hickert, S.; Knaack, U.: Freigeformte Betonkonstruktionen: Formen, Schalungssysteme und technische Potentiale.. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 176–185 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171490>
- [2] Michel, M.: Electronic controlled adaptive formwork for freeform concrete walls and shells. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. S. 281–289
- [3] Bergsma, O. K.: Three Dimensional Simulation of Fabric Draping. PhD thesis, Delft University of Technology, 1995
- [4] Huffman, D. A.: Curvature and creases: A primer on paper. IEEE Transactions on Computers 10 (1976) C-25, S. 1010–1019
- [5] Davis, E.; Demaine, E. D.; Demaine, M. L.; Ramseyer, M. J.: Reconstructing David Huffman's Origami Tessellations. Journal of Mechanical Design 135 (2013) 11, 7 S. – DOI: 10.1115/1.4025428
- [6] Lim, T.-C.: Auxetic Materials and Structures. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014
- [7] Boyce, Ch. M.; Socrate, S.; Greviskes, B. P.; Boyce, M. C.: Structured materials with tailored isotropic and anisotropic poisson's ratios including negative and zero poisson's ratios. US20110059291A1, 2011
- [8] Freund, B.: Frischbetondruck lotrechter, geneigter und gekrümmter Betonbauteile bei Verwendung von Betonen mit hoher Fließfähigkeit. Diss., TU Darmstadt, 2017
- [9] Freund, B.; Proske, T.; Graubner, C.-A.: Experimentelle Untersuchungen und numerische Verifizierung zum Frischbetondruck bei geneigten Schalungssystemen. Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014) 11, S. 803–811 – DOI: 10.1002/best.201400062
- [10] Drucker, D. C.; Prager, W.: Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. Quarterly of Applied Mathematics 10 (1952) 2, S. 157–165
- [11] Proske, T.: Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton – Ein wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung. Diss., TU Darmstadt, 2007
- [12] Graubner, C.-A.; Beitzel, H.; Beitzel, M.; Bohnemann, C.; Boska, E.; Brameshuber, W.; Dehn, F.; König, A.; Lingemann, J.; Motzko, C.; Müller, H. S.; Pistol, K.; Proske, T.; Stettner, C.; Zilch, K.: Schalungsbelastung durch Hochleistungsbetone mit fließfähiger Konsistenz. Forschungsbericht F09-7-2008, gefördert durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Nr. Z6-10.08.18.7-07.29 / II2-F20-07-022), Institut für Massivbau der TU Darmstadt, 2008
- [13] Probabilistic Model Code 2001: Probabilistic Model Code – Part 1 – Basic of design, 12th draft, Joint Committee on Structural Safety, Zürich, 2001
- [14] DIN 18218:2010-01: Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen.
- [15] Michel, M.: System zur Aufnahme von außen einwirkender Kräfte. German Patent DE10 2016 112 143.6, Anmeldung: 07.02.2016, veröffentlicht: 01.04.2018

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1, 2 [2]: Sascha Hickert
 - Bilder | Pictures 3–5, 7–10, 21 [15]: Matthias Michel
 - Bild | Picture 6: [7]
 - Bilder | Pictures 11, 13–20 [8]; 12 [8]/[9]: Björn Freund
- Bereits publizierte Bilder wurden meist (in Teilen) modifiziert. | Already published images were mostly modified (in parts).

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile

Fundamental research towards an adaptive formwork system development for freeform concrete building components

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner Geschäftsführender Direktor Executive director
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	GR 1712/11-1/2 (Projektnummer Project number: 198151796)
Adresse Address:	TU Darmstadt, Institut für Massivbau (IfM), Franziska-Braun-Straße 3, 64287 Darmstadt
Kontakt Contact:	+49 6151 16 21400 info@massivbau.tu-darmstadt.de www.massivbau.tu-darmstadt.de
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack Leitung FG Fassadentechnik Head of department 'Facade technology'
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	KN 470/2-1/2 (Projektnummer Project number: 198151796)
Adresse Address:	TU Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D), Franziska-Braun-Straße 3, 64287 Darmstadt <i>(bis until 30.09.2014: Detmold, Hochschule Ostwestfalen-Lippe)</i>
Kontakt Contact:	+49 6151 16 23013 knaack@ismd.tu-darmstadt.de https://www.ismd.tu-darmstadt.de/
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.10.2011–30.09.2015 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 31.07.2016
Team Team:	Björn Freund (IfM, 01.10.2011–31.03.2015) Matthias Michel (ISM+D, 01.10.2011–30.09.2013) Sascha Hickert (ISM+D) Tilo Proske (IfM)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Freund, B.; Proske, T.; Graubner, C.-A.: Frischbetondruck bei geneigten Schalungen – Sachstandbericht. In: Franz, V.; Hoffmann F. H.; Motzko, C.; Fricke, J. G. (Hrsg.): Tagungsband des 21. Kassel-Darmstädter Baubetriebsseminars Schalungstechnik, Gesellschaft für baubetriebliche Weiterbildung – Arbeitskreis Schalung, 24./25.11.2011 in Kassel, 2011, Kap. C1, S. 1–11
- Proske, T.; Freund, B.; Graubner, C.-A.: Models for prediction of formwork pressure. In: Billberg, P. (Hrsg.): Proc. of the Int. Workshop on Self-Compacting Concrete, 01.06.2012 in Stockholm (Schweden), RILEM TC-FPC "Form pressure generated by fresh concrete", Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 2012, S. 84–92
- Freund, B.: Fresh concrete pressure on inclined or curved formwork. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 331–334
- Michel, M.: Electronic controlled adaptive formwork for freeform concrete walls and shells. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 281–289
- Freund, B.: Großversuche zur Untersuchung des Frischbetondrucks bei geneigten Schalungssystemen. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07./08.11.2013 in Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 179–184
- Graubner, C.-A.; Freund, B.; Proske, T.: Frischbetondruck und Sichtbetonqualität bei geneigten Schalungen – Teil 1. In: Franz, V.; Hoffmann F. H.; Motzko, C.; Fricke, J. G. (Hrsg.): Tagungsband des 23. Kassel-Darmstädter

Baubetriebsseminars Schalungstechnik, Gesellschaft für baubetriebliche Weiterbildung – Arbeitskreis Schalung, 28./29.11.2013 in Kassel, 2013, Kap. B1a, S. 1–11

- Freund, B.; Proske, T.; Graubner, C.-A.: Frischbetondruck bei frei geformten Schalungssystemen. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 208–217 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171516>
- Hickert, S.; Knaack, U.: Freigeformte Betonkonstruktionen – Formen, Schalungssysteme und technische Potentiale. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 176–185 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171490>
- Knaack, U.; Hickert, S.: Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 186–197 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171637>
- Billberg, P.; Rousel, N.; Amziane, S.; Beitzel, M.; Charitou, G.; Freund, B.; Gardner, J. N.; Graubner, C.-A.; Keller, L.; Khayat, K. H.; Lange, D. A.; Omran, A. F.; Perrot, A.; Proske, T.; Quattrociocchi, R.; Vanhove, Y.: Field validation of models for predicting lateral form pressure exerted by SCC. *Cement and Concrete Composites* 54 (2014) 11, S. 70–79
- Freund, B.; Proske, T.; Graubner, C.-A.: Experimentelle Untersuchungen und numerische Verifizierung zum Frischbetondruck bei geneigten Schalungssystemen. *Beton- und Stahlbetonbau* 109 (2014) 11, S. 803–811 – DOI: 10.1002/best.201400062
- Michel, M.; Knaack, U.: Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonschalen und Wände. *Bautechnik* 91 (2014) 12, 845–853 – DOI: 10.1002 / bate.201400081
- Hickert, S.; Knaack, U.: Evaluation of free-form concrete architecture, moulding systems and their technical potentials. *Journal of Facade Design and Engineering* 3 (2015) 3–4, S. 273–288 – DOI: <https://doi.org/10.7480/jfde.2015.3-4.978>
- Knaack, U.; Hildebrand, L.; Hickert, S.: imagine 8 – CONCRETABEL. In: Knaack, U.; Klein, T.; Bilow, M. (Hrsg.): *imagine series*, Vol. 8, Rotterdam: NAI/010 publ., 2015
- Graubner, C.-A.; Freund, B.: Frischbetondruck bei frei geformten Betonbauteilen – Ein neuartiges Bemessungskonzept für Schalungssysteme. *BFT International* 82 (2016) 2, S. 80–82 – Proc. der 60. Betontage, 23.–25.02.2016 in Neu-Ulm
- Freund, B.; Proske, T.: Frischbetondruck fließfähiger und selbstverdichtender Betone auf geneigte Schalungen, In: Fenner, J. (Hrsg.): *Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko*, Darmstadt: Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt, 2017, S. 165–178

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertationen | Dissertations

- Freund, B.: Frischbetondruck lotrechter, geneigter und gekrümmter Betonbauteile bei Verwendung von Betonen mit hoher Fließfähigkeit. IfM, 2017
- Hickert, S.: Fabrik Formwork – Entwicklung und Bewertung eines textilen Schalungssystems. ISM+D, 2019

Studienarbeiten am IfM | Student's research projects at IfM

- Ritz, M.: Entwicklung eines Rheometers zur Bestimmung der statischen Fließgrenze von Frischbeton. Bachelorarbeit, 2013
- Kaut, M.: Vergleich von Rheometern zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Frischbeton. Bachelorarbeit, 2013
- Möller, L. K.: Entwicklung formoptimierter Betonbauteile aus hochfestem Beton. Bachelorarbeit, 2013
- Bhattacharya K.: Numerical investigation of the formwork-pressure by inclined and curved concrete walls. Studienarbeit (DAAD), 2014
- Cao, Q.: Numerische Untersuchungen zum Frischbetondruck bei geneigten Schalungssystemen. Masterarbeit, 2014
- Hänsel, M.: Ermittlung mechanischer zeitveränderlicher Parameter von Frischbeton und Validierung eines Simulationsprogramms für Frischbetondruck. Masterarbeit, 2014

- Klein, J.: Ermittlung von mechanischen zeitveränderlichen Materialparametern von Frischbeton. Bachelorarbeit, 2014
- Ziegler, A.: Entwicklung eines Ansatzes zur Bestimmung des Frischbetondrucks bei geneigten Schalungssystemen. Bachelorarbeit, 2015

Patent | Patent

- Michel, M.: System zur Aufnahme von außen einwirkender Kräfte. German Patent DE10 2016 112 143.6, Anmeldung: 07.02.2016, veröffentlicht: 01.04.2018

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Entwicklung textiler Schalungssysteme zur Reduzierung von Bauabfällen und Ermöglichung frei geformter Betonbauteile | Development of textile formwork systems to reduce construction waste and enable freely formed concrete components

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack
Förderer Funding:	PERI (Industrieförderung Industrial promotion)
Laufzeit Period:	2016–2018

- Entwicklung textilbasierter selbsterrichtender Schalungssysteme | Development of textile-based self-aerated formwork systems

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack
Förderer Funding:	PERI (Industrieförderung Industrial promotion)
Laufzeit Period:	2018–2019

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation des SPP-Jahrestreffens in Darmstadt im November 2013 | Organization of the SPP annual meeting in Darmstadt, November 2013
- Kreativworkshop im Rahmen des SPP-Treffens 2013 | Creative workshop as part of the SPP annual meeting 2013

Sandwichbauteile mit gefalteten und gekrümmten Betondeckschichten | Sandwich panels with folded plate and curved concrete facings

- ▶ Alexander Stark, Josef Hegger
- ▶ Institut für Massivbau, RWTH Aachen University

1 Einleitung

In der aktuellen Baupraxis werden mit Standard-Tragelementen meist rechteckige Grundrisse erzeugt. Ausgenommen sind weitspannende Konstruktionen, wie Kuppeln von Domen oder Kühltürme von Kraftwerken. Im Gegensatz dazu waren Schalen aus Stahlbeton im Hochbau im vergangenen Jahrhundert weit verbreitet. Dazu wurden in der Regel große Strukturen in situ betoniert. Zusätzlich wurden weit spannende Fertigteile mit relativ geringer Breite hergestellt. Diese Falwerke oder doppelt gekrümmten Elemente wurden zum Teil mit einer Dicke von weniger als 10 cm realisiert und häufig im sofortigen Verbund vorgespannt. Bedenken hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit können ein Grund dafür gewesen sein, dass solche Konstruktionen heute üblicherweise nicht mehr gebaut werden.

Projektziel war die Entwicklung von Sandwichelementen mit dünnen, gefalteten oder gekrümmten Betondeckschichten, die die Vorteile beider Konstruktionsprinzipien vereinen. Mit diesem Verfahren können leichte Elemente mit hoher Tragfähigkeit hergestellt werden, die effektive Fertigteillösungen für weit spannende Dachkonstruktionen bieten. Darüber hinaus können ausreichende bauphysikalische Eigenschaften wie Wärme- oder Schalldämmung erfüllt werden.

Die Entwicklung von Hochleistungswerkstoffen wie hochfestem Beton (engl. kurz HSC) und ul-

1 Introduction

In current building practice, standard load-bearing elements are mostly of rectangular shape. Exceptions are large shell structures, such as cupolas of domes or cooling towers of power plants. In contrast, shells made of reinforced concrete (RC) were widely applied for building construction in the last century. For this purpose, large structures were usually cast in situ. Additionally, long-span precast elements with limited width were produced. These folded plate or doubly curved elements were realised with a thickness of less than 10 cm and usually prestressed with steel tendons. Concerns regarding the corrosion resistance might have been a reason that such constructions are not build regularly today.

The motivation of this project is the development of sandwich panels with thin, spatially shaped cross-sections, which unify advantages of both construction principles. With this method, light elements with high load-bearing capacities can be established which provide effective precast solutions for long-span roof constructions. Furthermore, sufficient physical properties, such as heat or sound insulation can be fulfilled.

The development of high performance materials, such as high strength concrete (HSC) and ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPC) as well as reinforcement made of fibre reinforced polymer (FRP) are major in-

trahochfestem Faserbeton (engl. kurz UHPFRC) sowie Bewehrungen aus faserverstärktem Kunststoff (FVK) sind wesentliche Innovationen im Bauwesen der vergangenen Jahrzehnte. Die Korrosionsbeständigkeit und hohe Zugfestigkeit von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) ermöglicht langlebige und dünne Betonelemente, da nicht der Korrosionsschutz, sondern v. a. der Verbund zwischen Beton und Bewehrung maßgebend werden.

Um einen Rahmen für Herstellmethoden und Berechnungsverfahren zu schaffen, muss die Interaktion der innovativen Materialien und Bauweisen Schritt für Schritt untersucht werden. Bislang wurden Sandwichelemente mit gefalteten oder gekrümmten UHPFRC- oder Textilbetondeckschichten noch nicht untersucht. Die erhöhte Steifigkeit der Deckschichten muss bei der Berechnung berücksichtigt werden. Für das Kernmaterial ist ein Herstellungsverfahren anzuwenden, das eine hohe Verbundfestigkeit bietet und für nicht-ebene Deckschichten geeignet ist.

Ziel dieses Forschungsprojektes war es, die Basis für die Entwicklung von weitgespannten Sandwichelementen für Dachkonstruktionen zu schaffen (Bild 1). Um dieses Ziel zu erreichen, wurden experimentelle, numerische und theoretische Untersuchungen durchgeführt, um gefaltete und doppelt gekrümmte Sandwichelemente mit vorgespannten Deckschichten aus Hochleistungsbeton und CFK-Bewehrung zu realisieren. Insbesondere wurden während der Entwicklung die folgenden Schritte durchgeführt:

- Auswahl geeigneter Materialien,
- Entwicklung geeigneter Fertigungstechniken für das Vorspannen von CFK, das Betonieren

novations of construction materials of the last decades. The corrosion resistance and high tensile strength of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) makes thin and durable concrete elements possible, since only bond requirements of the reinforcement need to be fulfilled.

To establish a framework for production processes and analysis procedures, the interaction of innovative materials and construction methods has to be investigated step by step. So far, sandwich panels with folded plate or curved UHPFRC or TRC facings have not been investigated, yet. The additional stiffness of these facings needs to be considered in the analysis. For the core material, a production method has to be applied which provides high and reliable bond strength and is suitable for non-flat-sections.

This research project aims at providing the background for the development of long-span sandwich panels for roof structures (Fig. 1). In order to achieve this aim, experimental, numerical and theoretical investigations were conducted to provide folded plate and doubly curved sandwich panels with prestressed facings made of high performance concrete and CFRP reinforcement. In particular, the following steps were applied during the development:

- Selection of adequate materials,
- Development of suitable production techniques for prestressing of CFRP, casting of non-planar concrete sections and for non-flat sandwich panels,
- Experimental, numerical and analytical investigations on

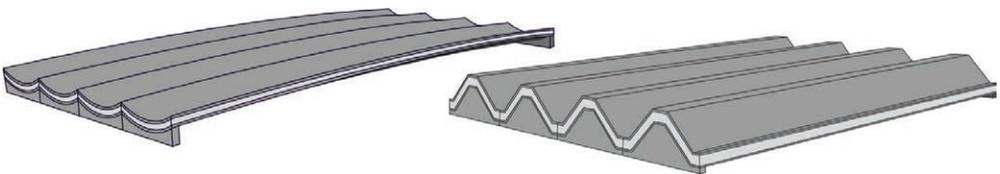


Bild 1: Doppelt gekrümmte und gefaltete Sandwichplatten für Dachkonstruktionen | **Fig. 1:** Doubly curved and folded plate sandwich panels for roof constructions

von nicht ebenen Betonteilen und das Herstellen von nicht ebenen Sandwichelementen,

- Experimentelle, numerische und analytische Untersuchungen zu den Themen
 - Verbundverhalten von CFK-Spanngliedern,
 - Zug- und Schubbelastung von kleinformatischen Sandwichquerschnitten,
 - Identifizierung von mehraxialen Lastübertragungsmechanismen für Sandwichelemente,
 - Ebene, gefaltete und doppelt gekrümmte Sandwichbalken.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt. Der Bericht basiert auf [1], wo ausführliche weiterführende Informationen zu finden sind.

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Allgemeines

Experimentelle Untersuchungen wurden durchgeführt, um die Basis für die Entwicklung von räumlichen Sandwichelementen zu schaffen. Ein zentraler Bestandteil war die Entwicklung von Herstellmethoden. Nach der Bestimmung der Materialeigenschaften von Beton, CFK und Kernschaum wurden das Verbundverhalten der CFK-Spannbewehrung untersucht und Mindestabmessungen von dünnen Betondeckschichten abgeleitet (81 Auszugsversuche, 25 Tests der Übertragungslänge). Anschließend wurden gefaltete und doppelt gekrümmte (hyperbolisches Paraboloid, HP) Betonelemente mit CFK-Vorspannung entwickelt. Großformatige Tests wurden an 8 gefalteten und 7 HP-Elementen durchgeführt.

Die Qualität der Verbundfuge zwischen Kernschaum und Betondeckschichten wurde in Zug- und Schubversuchen an kleinformatischen Querschnitten in 25 Zug- und 63 Schubversuchen bewertet. Mit den Ergebnissen der vorgenannten Untersuchungen wurden flache, gefaltete Platten und doppelt gekrümmte Sandwichelemente hergestellt und als großformatige Versuchskörper (9 ebene, 7 gefaltete und 8 HP) ge-

- Bond behaviour of CFRP prestressing tendons,
- Tensile and shear loading of small-scale sandwich sections,
- Identification of biaxial load transfer mechanisms for sandwich panels,
- Flat, folded plate and doubly curved sandwich panels.

In the following sections, the major outcome of these investigations is presented which is based on work conducted in [1].

2 Experimental testing

2.1 Preface

Experimental testing was conducted to provide the background for the development of spatially shaped sandwich panels. One key factor of the investigations was the development of production methods. After determination of the material properties of concrete, CFRP and core foam, the bond behaviour of CFRP reinforcement was investigated and minimum dimensions of thin concrete facings were derived (81 pull-out tests, 25 tests on the transfer length). Afterwards, folded plate and doubly curved (hyperbolic paraboloid, HP) concrete elements with CFRP prestressing tendons were developed. Tests were carried out on 8 folded plate and 7 HP elements.

The quality of the bond zone between core foam and concrete facings was analysed in tensile and shear tests on small-scale test specimens in 25 tensile and 63 shear tests. With the information of the aforementioned tests, flat, folded plate and doubly curved sandwich panels were produced and tested as large-scale specimens (9 flat, 7 folded plates and 8 HP). Additionally, the biaxial load transfer was investigated with 9 plates and 6 sandwich plates (e.g. [2]).

2.2 Applied materials

In the conducted investigations, two different concrete mixtures were applied:

testet. Zusätzlich wurde der biaxiale Lastabtrag mit 9 Einzelplatten und 6 Sandwichplatten (z. B. [2]) untersucht.

2.2 Verwendete Materialien

Es wurden zwei verschiedene Betonmischungen eingesetzt:

- HSC: Größtkorndurchmesser $d_g = 0,6$ mm;
- UHPFRC: $d_g = 0,5$ mm; mit Stahlfasern: Zugabemenge 0,9 Vol.-%, Faserlänge $l_f = 9$ mm, Faserdurchmesser $\varnothing = 0,15-0,17$ mm, Faser-Zugfestigkeit $f_y > 2.200$ MPa.

Die detaillierten Betonrezepturen sind in [1], [3] und [4] dargelegt. Die Materialkennwerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Um das Ziel dünner Betondeckschichten für Sandwichelemente zu realisieren, wurde in den Untersuchungen der Einsatz von Stahlbewehrung ausgeschlossen. Aufgrund seiner hohen Zugfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit wurde carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) für:

- Bewehrungsstäbe ($\varnothing 5,0$ mm, Tokyo Rope Ltd.),
- Spannbewehrung ($\varnothing 7,5$ mm siebendrähtige Litze, Tokyo Rope Ltd.),
- Textilgelege (Q95, solidian) und
- Schubgitter (C-Grid®)

- HSC: maximum aggregate diameter $d_g = 0.6$ mm;
- UHPFRC: $d_g = 0.5$ mm; with steel fibres: 0.9 Vol. %, fibre length $l_f = 9$ mm, fibre diameter $\varnothing = 0.15-0.17$ mm, fibre tensile strength $f_y > 2,200$ MPa.

The detailed mixture compositions can be found in [1], [3], [4]. The material properties are shown in Table 1.

The aim to provide thin concrete facings for sandwich panels excluded the usage of steel reinforcement at this point of the investigations. Due to the high tensile strength and corrosion resistance, Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) was used for :

- rebars ($\varnothing 5.0$ mm, Tokyo Rope Ltd.),
- prestressing tendons bar ($\varnothing 7.5$ mm seven-wire strand, Tokyo Rope Ltd.),
- mesh-like fabrics (Q95, solidian), and
- shear connectors (C-Grid®)

between the concrete facings. Additionally GFRP pin-connectors (Thermomass®) were tested in small-scale specimens. The material properties are shown in Table 2.

The PU core used in the experimental studies is a mixture of two components, which exhibits a density of about 90 kg/m³. The material properties are shown in Table 3.

Material Material	Zylinderdruckfestigkeit Cylinder compressive strength $f_{c_{m,cyl, 28d}}$ (1d) [MPa]	E-Modul Young's modulus $E_{cm,cyl, 28d}$ (1d) [GPa]	Biegezugfestigkeit Flexural strength $f_{ct,flex, 28d}$ (1d) [MPa]
UHPFRC	150 (65)	45 (32)	20 (7)
HSC	75 (35)	28,5 (23,0)	9,0 (5,0)

Tabelle 1: Materialparameter Festbetone | **Table 1:** Material properties of concrete mixtures

Material Material	E-Modul Young's modulus $E_{t,m}$ [GPa]	Zugfestigkeit Tensile strength $f_{t,m}$ [MPa]
Stab Bar $\varnothing 5$ mm	165	3.200
Litze Strand $\varnothing 7,5$ mm	150	2.650
solidian Q95	240	3.100-3.300
C-Grid®	200	2.300-2.600

Tabelle 2: Materialeigenschaften der Carbonbewehrung | **Table 2:** Material properties of CFRP tendons and meshes

Druck Compression		Zug Tension		Schub Shear	
Festigkeit Strength f_{comp} [MPa]	E-Modul Young's modulus E_{comp} [MPa]	Festigkeit Strength f_{tens} [MPa]	E-Modul Young's modulus E_{tens} [MPa]	Scherfestigkeit Shear strength τ [MPa]	Schubmodul Shear modulus G_c [MPa]
0,95	32	0,58	42	0,57	11,5

Tabelle 3: Materialeigenschaften PU | **Table 3:** Material properties of PU

zwischen den Deckschichten eingesetzt. Zusätzlich wurden punktförmige GFK-Verbindungsmitel (Thermomass®) testweise eingesetzt. Die Materialeigenschaften sind in Tabelle 2 dargestellt.

Der in den experimentellen Untersuchungen verwendete Polyurethankern (PU) ist eine Mischung aus zwei Komponenten, die eine Dichte von ca. 90 kg/m³ aufweist. Die Materialeigenschaften sind in Tabelle 3 dargestellt.

Die Materialien wurden nach [5]–[12] geprüft. Detaillierte Informationen sind in [1] dargestellt.

2.3 Herstellmethoden

2.3.1 Vorspannen und Betonieren der dünnen UHPFRC-Deckschichten

Für einen wirtschaftlichen und sicheren Vorspannprozess wurde eine wiederverwendbare Keilverankerung mit drei Aluminiumkeilen erarbeitet [1], [13] und [14]. Da ein Stab und eine siebendrähtige Litze eingesetzt wurden, wurde eine Lösung entwickelt, die die Anforderungen beider Formen berücksichtigt. Um die Reibung zwischen den CFK-Stäben und den Aluminiumkeilen zu erhöhen und einen kreisförmigen und glatten Querschnitt, insbesondere für die siebendrähtige Litze, zu generieren, wurde ein Klebstoff auf die CFK-Bewehrung aufgebracht. Der aus zwei Komponenten bestehende Klebstoff – als Polymerisationskatalysator Methylmethacrylat und als Monomer-Methylacrylester – war vor dem Einsetzen der Keile ausgehärtet.

Mit den entwickelten Verankerungen sind Spannungen von 3.200 MPa (CFK-Stab) bzw. 2.650 MPa (CFK-Litze) im Zugversuch realisierbar. Gemäß [15] sollten die Vorspannungen unter 65 % der Bruchfestigkeit der CFK-Spannglieder gehalten

The materials were tested according to [5]–[12], for detailed information see [1].

2.3 Production methods

2.3.1 Prestressing and casting of thin UHPFRC members

For an economic and safe prestressing process, a reusable wedge anchor with three aluminium wedges was developed [1], [13], [14]. Since a bar and a seven-wire strand were applied, a solution was preferable which fulfilled the demands of both shapes. To increase friction between the CFRP tendons and the aluminium wedges and to provide a circular and smooth cross-section, especially for the seven-wire strand, a resin was applied on the CFRP reinforcement. The resin consisting of two components – as polymerisation catalyst methyl methacrylate and as monomer methyl acrylic ester – was cured, i.e. hardened, before placing the wedges.

With the developed anchors, stresses of 3,200 MPa and 2,650 MPa were applicable in tensile tests on CFRP bars and seven-wire strands, respectively. According to [15], the jacking stresses should be kept below 65% of ultimate strength of the CFRP tendons to avoid creep rupture. The maximum tested prestressing was 1,750 MPa.

For all members with CFRP reinforcement orientated parallel to the longitudinal axis of the members, i.e. tests on the transfer length and flat as well as folded plate facings, the standard configuration of prestressing bed in the laboratory was used in combination with developed anchorages and adjustment screws. For the doubly curved section, i.e. hyperbolic paraboloids, straight but skew lines can be found. Hence, for investigated doubly curved



Bild 2: Entwickelter Vorspannrahmen für doppelt gekrümmte Bauteile; von links nach rechts: Rahmen mit Spanngliedern, Detail der schiefwinkligen gerade Bewehrung, Neigung der Hohlkolbenzylinder | **Fig. 2:** Developed prestressing frame for doubly curved elements; from left to right: frame with prestressing tendons; details of skew, but straight tendons; inclination of hollow piston cylinders

werden, um ein vorzeitiges Versagen zu vermeiden. Die maximal getestete und eingeleitete Vorspannung betrug 1.750 MPa.

Für alle Bauteile mit parallel zur Stablängsachse ausgerichteter CFK-Bewehrung, d. h. Versuche zur Übertragungslänge und ebene sowie gefaltete Betondeckschichten, wurde die Standardkonfiguration des Spannbetts der Versuchshalle in Kombination mit den entwickelten Verankerungen und Stellschrauben verwendet. Doppelt gekrümmte Elemente, d. h. hyperbolische Paraboloiden, sind zwar durch Geraden erzeugbar, konnte aber nicht im Standardvorspannbett hergestellt werden. Stattdessen wurde ein Spannrahmen entwickelt, der eine schiefe, aber geradlinige Konfiguration der Bewehrung ermöglicht (Bild 2). An jeder CFK-Litze wurden Hohlkolbenzylinder zum Vorspannen eingesetzt. Zusätzlich wurden Stellschrauben verwendet, um die korrekte Position der Litzen zu gewährleisten.

Für alle Elemente mit flächigen geradlinigen Kanten wurde Schalung standardmäßig einge-

elements the standard prestressing bed could not be used. Instead, a stiff frame was set up to allow for skew, but linear configuration of reinforcement (Fig. 2). Hollow piston cylinders were applied for jacking at each CFRP tendon. Additionally, adjusting screws were used to ensure correct positions of tendons.

For all elements with area by area straight edges, the formwork was placed in a standard way. Folded plate elements were cast from top flange in a closed formwork. For doubly curved elements, a closed formwork was set up using the principle of straight but skew lines. A thin medium density fibreboard (MDF) was placed in strips of 50 mm width on wooden frames (Fig. 3). These frames were shaped like the corresponding top or bottom surface at the particular position. Afterwards, a filler was applied on top of the MDF to provide a smooth surface (Fig. 3) which is impermeable to water. The elements were cast upside down to avoid discontinuities from casting at element's midspan (highest position). Therefore, at both ends openings were provided to cast the concrete mixture.

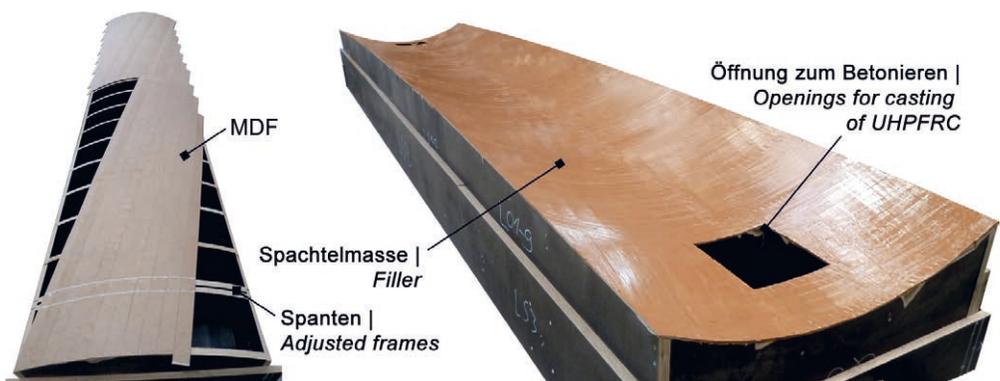


Bild 3: Schalung für doppelt gekrümmte Bauteile während der Montage (links, Unterseite) und fertiggestellte Schalung (rechts, Oberseite) | **Fig. 3:** Formwork for doubly curved elements during construction (left, bottom side) and finished formwork (right, top side)

setzt. Gefaltete Elemente wurden vom Obergurt in einer geschlossenen Schalung betoniert. Für doppelt gekrümmte Elemente wurde eine geschlossene Schalung nach dem Prinzip der geraden, aber windschiefen Geraden hergestellt. Eine dünne, mitteldichte Faserplatte (MDF) wurde in 50 mm breiten Streifen auf Holzspannten aufgebracht (Bild 3, links). Diese Spannten waren an der jeweiligen Stelle wie die entsprechende Ober- oder Unterseite geformt. Anschließend wurde Spachtelmasse auf die MDF-Platten aufgebracht, um eine glatte, wasserundurchlässige Oberfläche zu generieren (Bild 3, rechts). Die Deckschichten wurden um 180° um die Längsachse gedreht betoniert, um Fehlstellen in Feldmitte (höchste Position) zu vermeiden. Daher wurden an beiden Enden Betonieröffnungen vorgesehen. So wurden die daraus resultierenden Fehlstellen nahe der Auflager angeordnet, sodass die Trag- und Verformungsfähigkeit nicht negativ beeinflusst wurden. Es wurde nur von einer Seite betoniert. Dadurch war die Belüftung gewährleistet und es konnten glatte Oberflächen mit nur geringen Luft einschläüssen erzeugt werden.

Nach einem Aushärten und dem Entfernen der Oberseite der Schalung wurden die Vorspannkraft aufgebracht. Anschließend wurden die Elemente in die Endposition gedreht.

2.3.2 Ausschäumen der Sandwichbauteile

Auf Standardproduktionsmethoden für ebene Betonfertigteilsandwichplatten wurde verzichtet, um unterschiedliche Querschnittsformen zu ermöglichen und eine zuverlässig hohe

Thus, the resulting discontinuities were placed close to the supports, which did not negatively affect structural performance. The concrete mixture was cast from only one side until the formwork was filled up. Hence, ventilation was guaranteed and smooth surfaces with only small air inclusions were producible.

After one day of concrete hardening and stripping of the top side of the formwork, the prestressing forces were released. Afterwards, the elements were turned into final position.

2.3.2 Foaming of sandwich panels

Standard production methods for precast concrete sandwich panels were omitted to make various cross-sectional shapes possible and provide a reliable high bond strength between core foam and concrete facings.

A new production method based on investigations conducted in [3] was applied for all test specimens. Adapted from steel sandwich sections, a polyurethane (PU) mixture was foamed in pack between two hardened concrete layers. With this method, various shapes of cross-sections can be generated and a repeatable high bond quality was aimed.

In contrast to investigations conducted in [3], [4], [16], the mixture was poured in for large-scale elements. In Fig. 4, the production procedure for doubly curved sandwich panels is exemplarily shown. After weighing the two components for the reaction mixture of PU and preparing of formwork with hardened concrete facings, the PU mixture was poured in. The braced wooden



Bild 4: Herstellprozess für großformatige Sandwichelemente | Fig. 4: Production procedure for large-scale sandwich elements

Verbundfestigkeit zwischen Kernschaum und Betondeckschichten zu gewährleisten. Für alle Versuchskörper wurde ein neues Produktionsverfahren auf der Grundlage der in [3] durchgeführten Untersuchungen angewendet. Ausgehend von den Methoden für Stahl-Sandwichelemente wurde eine Mischung aus Polyurethan (PU) zwischen zwei ausgehärteten Betonschichten geschäumt. So können verschiedene Querschnittsformen und mit wiederholbar hoher Verbundqualität erzeugt werden.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen in [3], [4] und [16] wurde das Zweikomponentengemisch nun auch für großformatige Elemente eingesetzt. In Bild 4 ist das Herstellungsverfahren für doppelt gekrümmte Sandwichelemente exemplarisch dargestellt. Nach dem Wiegen der beiden Komponenten für das PU-Reaktionsgemisch und der Vorbereitung der Schalung mit ausgehärteten Betondeckschichten wurde das Gemisch eingefüllt. Die ausgesteifte Holzschalung wurde geschlossen und ein Kontergewicht aufgebracht, um den Schaumdruck der PU-Mischung aufzunehmen. Nach dem Aufschäumen wurde die Schalung entfernt. Bei der Herstellung der Elemente wurde keine spezielle Behandlung der Betonoberflächen vorgenommen.

formwork was closed and a counterweight was applied to withstand the pressure from expansion of the PU mixture. Afterwards, the formwork was removed.

For the production of the elements, no special treatment of the surfaces was applied.

2.4 Bond behaviour of CFRP reinforcement in concrete

Investigations on pre-tensioned CFRP tendons in different types of concrete were conducted to analyse the bond behaviour. On the one hand, in pull-out tests local bond strengths were determined, and on the other hand, in tests on the transfer length minimum concrete covers and transfer lengths were investigated. Major results of experimental testing in this chapter are based on published work, e.g. [1], [17], [18].

All in all, 81 pull-out tests on 150 mm cubes in dependence on [19] with different prestressing states and 25 tests on the transfer lengths were conducted. In UHPFRC, the CFRP bar and seven-wire strand showed a maximum bond strength of about 25 MPa for a prestressing of 1,350 MPa independently of tested concrete covers. Even for concrete cover to tendon diameter ratios c/d_p of 2.5 no splitting cracks

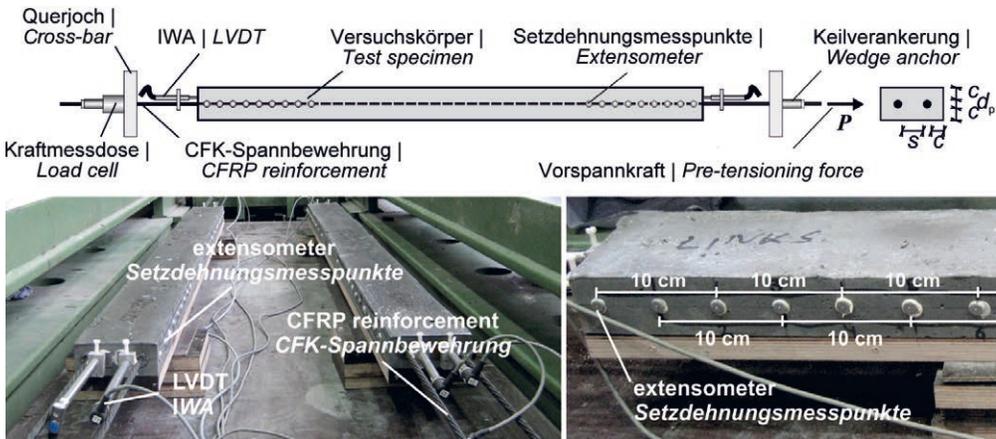


Bild 5: Versuchsaufbau der Spannkrafteinleitungsversuche | Fig. 5: Test setup of tests on the transfer length

2.4 Verbundverhalten der CFK-Bewehrung in Beton

Zur Untersuchung des Verbundverhaltens wurden Versuche an vorgespannten CFK-Spanngliedern in verschiedenen Betonen durchgeführt. Zum einen wurden in Pull-out-Tests lokale Verbundfestigkeiten ermittelt, zum anderen wurden die Übertragungslänge und Mindestbetondeckungen untersucht. Die wichtigsten Ergebnisse der experimentellen Prüfungen in diesem Abschnitt basieren auf bereits veröffentlichten Arbeiten, z. B. [1], [17] und [18].

Insgesamt wurden 81 Pull-out-Versuche an 150-mm-Würfeln in Anlehnung an [19] mit unterschiedlichen Vorspannzuständen und 25 Versuche zur Übertragungslänge durchgeführt. In UHPFRC zeigten der CFK-Stab und die sieben-drähtige Litze eine maximale Verbundfestigkeit von ca. 25 MPa bei einer Vorspannung von 1.350 MPa unabhängig von den geprüften Betondeckungen. Auch bei einem Verhältnis von Betondeckung zu Spannglieddurchmesser c/d_p von 2,5 traten keine Spaltrisse auf und die Versuchskörper versagten durch Herausziehen der Spannglieder. Im Vergleich zu Stahlritzen wurden um etwa 40 % höhere maximale Verbundfestigkeiten ermittelt. In HSC betrug die Haftfestigkeit etwa 15 MPa für mit 1.350 MPa vorgespannte CFK-Stäbe und -Litzen.

In Tests an zentrisch vorgespannten Balken (Bild 5) wurden die Mindestbetondeckung und der Abstand zwischen Stäben und Litzen für eine rissefreie Spannkrafteinleitung sowie die Übertragungslängen selbst ermittelt. Da die Versuchsergebnisse zur Bestimmung der Mindestabmessungen von dünnen Betondeckschichten verwendet werden sollten, wurden jeweils nur zwei Stäbe oder Litzen angeordnet. Ähnlich wie bei den Pull-out-Versuchen wurde die Bewehrung in einem steifen Rahmen vorgespannt. Die Vorspannkraft von 1.350 MPa wurde nach einem Tag Betonhärtung in 20%-Schritten aufgebracht. Bei jeder Ablassstufe wurden die Betonstauchungen mit den Setzdehnungsmessungen in halber Höhe bestimmt. Der Endschlupf der Spannglieder wurde kontinuierlich

erfolgt und die specimens failed by pull-out of the tendon. In comparison to steel strands, about 40% higher maximum bond strengths were determined. In HSC, the bond strength was about 15 MPa for CFRP bars and seven-wire strands prestressed to 1,350 MPa.

Tests on the transfer length (Fig. 5) were carried out to determine minimum concrete cover and spacing between bars and strands for a crack-free transmission zone as well as the transfer lengths. The test setup comprises small beams with two centrally placed CFRP prestressing tendons. Since the test results were used to determine minimum dimensions of thin concrete elements, only two bars or strands were applied. Similar to pull-out testing, the reinforcement was pre-tensioned in a stiff rig. The prestressing force was released after one day of concrete hardening in steps of 20%. At each step, the concrete compression strains were determined from extensometer measurement at mid height. The end slip of prestressing tendons was continuously identified by displacement transducers. Additionally, the pre-tensioning force was measured with load cells.

In this section, only key results are discussed. Further results can be found in [1], [17], [18]. During the tests, it was focused on crack-free minimum dimensions to provide preferably thin UHPFRC elements. Fig. 6 exemplarily shows end slip and compression strains for beams prestressed with CFRP strands in UHPFRC ($\sigma_p = 1,350$ MPa).

For intact cross-sections, the end slip increases almost proportionate to the induced prestressing force. The prestressing force was released in five steps and at each step, a small increase in end slip was observed. This may have been caused by bond creep. When concrete cover was not sufficient to remain un-cracked, a disproportional increase in end slip was observed at a particular release step. Beams prestressed with CFRP bars showed a similar behaviour, even though the small increases in end slip at release step were not observed. The concrete

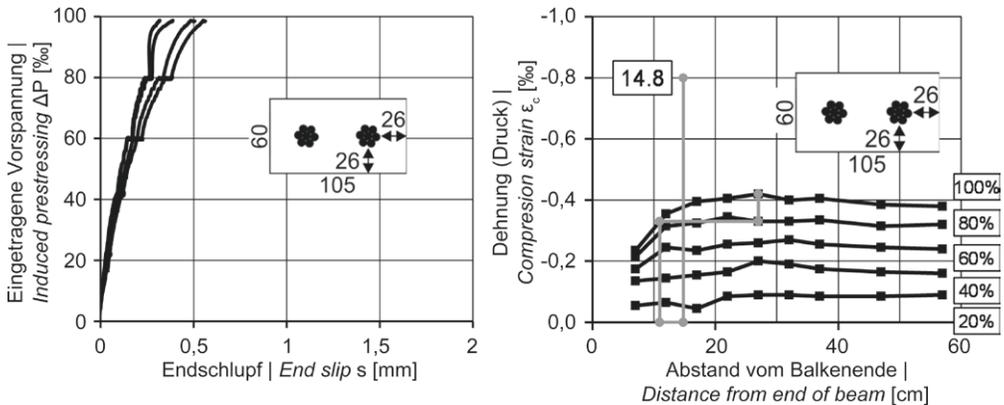


Bild 6: Endschlupf s von intakten Spannkrafteinleitungsbereichen (links) und Betondruckspannungen ϵ_c sowie Übertragungslängen für vorgespannte CFK-Litzen (rechts), schrittweise Steigerung der eingeleiteten Spannkraft P bis max. 1.350 MPa | **Fig. 6:** End slip s of intact transmission zones (left) and concrete compression strains ϵ_c and transfer lengths for pre-tensioned CFRP strands (right); step-wise induced prestressing P up to 1,350 MPa

mit induktiven Wegaufnehmern (IWA) ermittelt. Zusätzlich wurde die Vorspannkraft mit Kraftmessdosen aufgezeichnet.

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse erläutert. Weitere Resultate finden sich [1], [17] und [18]. Bei den Versuchen wurden vor allem die Mindestabmessungen ermittelt, um möglichst dünne, rissfreie UHPFRC-Deckschichten herzustellen. Bild 6 zeigt exemplarisch den Endschlupf und die Stauchungen von mit CFK-Litzen vorgespannten Balken aus UHPFRC (unterschiedliche Vorspanngrade).

Bei intakten Verankerungsbereichen nimmt der Endschlupf nahezu proportional zur aufgebrauchten Vorspannkraft zu. Bei jedem der fünf Vorspannschritte wurde ein kleiner Anstieg des Endschlupfes beobachtet. Dies kann durch Verbundkriechen verursacht worden sein. Bei gerissenen Versuchskörpern – bei denen also die Betondeckung nicht ausgereicht hatte – wurde beim Reißen ein überproportionaler Anstieg des Endschlupfes beobachtet. Mit CFK-Stäben vorgespannte Balken zeigten ein ähnliches Verhalten, obwohl die geringen Anstiege des Endschlupfes bei jedem Messvorgang nicht beobachtet wurden.

Die Übertragungslängen wurden nach [21] abgeleitet. Ungerissene Versuchskörper wiesen

compression strains were derived from extensometer measurements and transfer lengths derived according to [21].

Tests with intact transmission zone showed a transfer length of less than 150 mm for CFRP bars and strands in UHPFRC and about 240 mm in HSC (prestressing $\sigma_{mp0} = 1,350$ MPa). Reducing the prestressing force by 50%, the transfer lengths decreased about 10–15% [1]. In tests on steel strands in UHPFRC conducted by Bertram [20], a transfer length of 200 mm was measured for a prestressing of 1,350 MPa, even though the uniaxial compression strength was about 120 MPa (three days of concrete curing before release). For HSC, the transfer lengths were about 15% higher. Variation of spacing s/d_p (compare Fig. 5) had no important influence on the transfer length. For UHPFRC, minimum concrete cover ratios of $c/d_p = 3.0$ for strands and $c/d_p = 4.0$ for bars were necessary ($\sigma_{mp0} = 1,350$ MPa) for a crack-free transfer length. For HSC, $c/d_p = 4.0$ for strands were sufficient.

2.5 Sandwich sections under tensile and shear loading

The load-bearing capacity of sandwich panels is strongly controlled by the interface zone between core material and outer layers. To inves-

eine Übertragungslänge von weniger als 150 mm für CFK-Stäbe und -Litzen in UHPFRC und etwa 240 mm in HSC (Vorspannung $\sigma_{mp0} = 1.350$ MPa) auf. Durch die Reduzierung der Vorspannkraft um 50 % verringerten sich die Übertragungslängen um ca. 10–15 % [1]. In den von Bertram [20] durchgeführten Versuchen an Stahlilitzen in UHPFRC wurde bei einer Vorspannung von 1.350 MPa eine Übertragungslänge von 200 mm gemessen, obwohl die einachsige Druckfestigkeit etwa 120 MPa betrug (drei Tage Betonhärtung vor dem Ablassen). Bei HSC waren die Übertragungslängen etwa 15 % größer. Die Variation des Abstands zwischen den Spanngliedern s/d_p (s. Bild 5) hatte keinen wesentlichen Einfluss auf die Übertragungslänge. Für UHPFRC waren Mindestbetondeckungsverhältnisse von $c/d_p = 3,0$ für Litzen und $c/d_p = 4,0$ für Stäbe ($\sigma_{mp0} = 1.350$ MPa) für einerisseefreie Übertragungslänge erforderlich. Für HSC und Litzen waren $c/d_p = 4,0$ ausreichend.

2.5 Sandwichquerschnitte unter Zug- und Schubbelastung

Die Tragfähigkeit von Sandwichelementen wird durch die Verbundfuge zwischen Kernmaterial und Betondeckschichten maßgeblich beeinflusst. Um die Qualität der Herstellmethode durch Ausschäumen zu untersuchen, wurden Zug- und Schubversuche durchgeführt. Die Ergebnisse zur Zug- und Schubfestigkeit sowie der Steifigkeit dienten als Grundlage für numerische Modelle und theoretische Ansätze. Die wichtigsten hier vorgestellten experimentellen Ergebnisse wurden auch in [3], [4] zusammen mit Untersuchungen von Shams und in [1] veröffentlicht.

Die Versuche an kleinformatigen Probekörpern unter Zug- und Schubbelastung wurden mit in [16] und [22] angewendeten Versuchsaufbauten durchgeführt (Bild 7). Versuche ohne Verbindungselemente zwischen den Deckschichten dienten zum Nachweis der Haftfestigkeit im Vergleich zur einaxialen Zugfestigkeit des Kernmaterials. Die Anwendung eines CFK-Schubgitters und von punktförmigen GFK-Verbundmitteln wurde exemplarisch untersucht. Die

tigate the quality of the production method of foaming in pack of polyurethane, tensile and shear tests were conducted. The test results of tensile and shear strengths as well as stiffness served as basis for numerical models and theoretical approaches. Major experimental results presented here have also been published in [3], [4] together with investigations by Shams and in [1].

Testing was carried out on small-scale specimens under tensile and shear loads using test setups also applied by [16] and [22] (see Fig. 7). Tests without connector elements between the outer layers served for the verification of bond strength compared to the tensile strength of the core material only. The applications of a CFRP shear grid and CFRP pin connectors were exemplarily investigated. The load was induced displacement controlled with 1.0 mm/min. Besides the load, LVDTs (linear variable differential transformer) were used to measure the relative displacement Δv in tensile tests as well Δv and Δu for shear tests.

For tensile testing, the load was induced by cast-in channels since high bond strength was expected. Hence, the thickness of UHPFRC layers was chosen to 80 mm in order to anchor the cast-in channels. The bond zone was 350×350 mm² for all specimens. Without shear connectors, for UHPFRC facings, maximum bond strength was about 0.22 MPa, whereas for HSC facings 0.13 MPa was observed. For an applied CFRP shear grid a pronounced residual strength was measured for UHPFRC facings, but no increase in maximum load, since the bond strength of PU was already in the range of the maximum load of the shear grid. An embedment length of 30 mm was sufficient to prevent the shear grid from pulling out for UHPFRC and HSC. Smaller embedment lengths were not investigated, since thicknesses of concrete facings of beam elements were determined to 60 mm.

Under shear loading, a test set-up according to Shams [16] was utilised for flat specimens (Fig. 7,

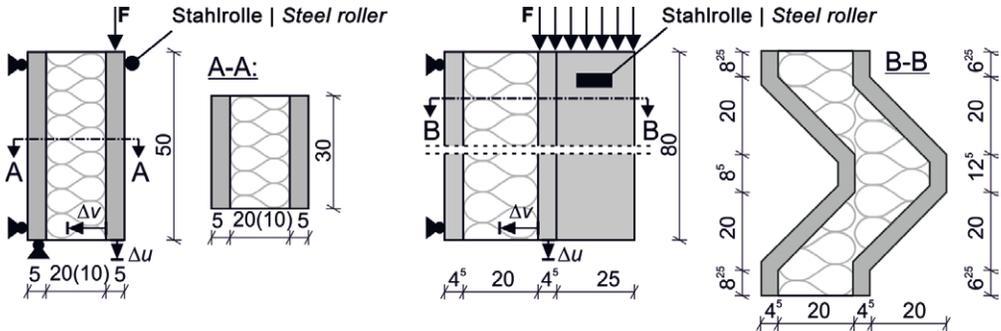


Bild 7: Versuchsaufbauten für Schubversuche an ebenen (links) und gefalteten Elementen (rechts) | Fig. 7: Experimental set-ups of shear tests for flat (left) and folded plate (right) elements

Belastung wurde mit 1,0 mm/min aufgebracht. Neben der Prüfkraft wurden IWA verwendet, um die relative Verschiebung v im Zugversuch sowie v und u im Schubversuch zu messen.

Für die Zugversuche wurde die Last durch in den Deckschichten eingelassene Ankerschienen aufgebracht, da eine hohe Haftfestigkeit erwartet wurde. Daher wurde die Dicke der UHPFRC-Schichten zu 80 mm gewählt. Die Verbundfläche betrug jeweils $350 \times 350 \text{ mm}^2$. Ohne Verbindungsmittel betrug die maximale Haftzugfestigkeit bei UHPFRC-Deckschichten etwa 0,22 MPa und bei HSC 0,13 MPa. Bei Verwendung von CFK-Schubgittern wurde ein ausgeprägtes Nachbruchverhalten bei UHPFRC-Deckschichten beobachtet, jedoch keine Erhöhung der maximal ertragbaren Belastung, da die Verbundfestigkeit von PU bereits im Bereich der maximalen Belastung des Schubgitters lag. Eine Verankerungslänge von 30 mm reichte dabei aus, um ein Herausziehen des Schubgitters bei UHPFRC und HSC zu verhindern. Kleinere Verankerungslängen wurden nicht untersucht, da die Dicke der Deckschichten der Sandwichbalken und -schalen auf 60 mm festgelegt worden war.

Unter Schubbelastung wurde ein Versuchsaufbau nach Shams [16] für ebene Versuchskörper verwendet (Bild 7, links). In ähnlicher Weise wurde ein Aufbau für Falwerke entwickelt (Bild 7, rechts).

Der Einsatz eines CFK-Schubgitters führte im Allgemeinen zu einem steiferen Verhalten und einem ausgeprägten Nachbruchverhalten (Bild 8).

left). In a similar manner, a set up for folded plate elements was developed (Fig. 7, right).

The application of a CFRP shear grid generally resulted in a stiffer behaviour and a pronounced post-failure state (Fig. 8). For the applied CFRP shear grid a sufficient amount of remaining load-bearing capacity of $\approx 80\%$ of maximum test load was observed, leading to an increase of over 100% in relative displacement Δu . This behaviour was observed for 100 mm and 200 mm core heights as well as for one or two applied shear grids. CFRP shear grids with embedment length of 30 mm in the UHPFRC facings failed within the free length between the facings. Hence, the short embedment length was sufficient. GFRP pin connectors with embedment length of 30 mm failed at maximum load and did not lead to remaining load-bearing capacity. For core heights of 100 mm and 200 mm, the maximum shear stresses were derived to 0.38 MPa and 0.27 MPa, respectively. The load-displacement behaviour until maximum load showed no significant difference compared to tests on specimens without connectors. The elements failed due to diagonal cracks in the core material or by debonding. As mentioned before, the induced bending moment resulted in tensile forces at top and compression forces at bottom of the specimens. For HSC facings, a similar load-displacement response was observed with maximum loads of about 35 kN. Applying shear connectors lead to a similar behaviour as for UHPFRC facings.

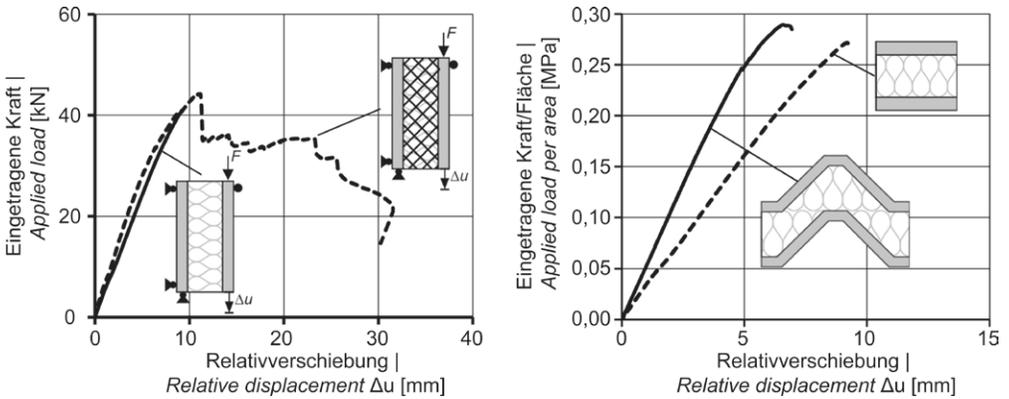


Bild 8: Repräsentative Versuchsergebnisse von Schubversuchen; links: Last-Verformungs-Diagramm, rechts: Schubspannung und zugehörige Relativverschiebung Δu | **Fig. 8:** Representative test results of shear tests on sandwich sections; left: load-deformation diagram, right: shear stress in bond zone with corresponding relative displacement Δu

Für das eingesetzte CFK-Schubgitter wurde eine ausreichende Resttragfähigkeit von ca. 80 % der maximalen Prüfkraft beobachtet, was zu einem Anstieg der Relativverschiebung Δu um über 100 % führte. Dieses Verhalten wurde sowohl bei Versuchskörpern mit 100 mm und 200 mm Kernhöhe sowie bei einem und zwei eingesetzten Schubgittern beobachtet. CFK-Schubgitter waren mit 30 mm in den UHPFRC-Deckschichten verankert und versagten innerhalb der freien Länge zwischen den Deckschichten. Somit war die kurze Verankerungslänge ausreichend. Punktförmige GFK-Verbundmittel (Verankerungslänge ebenfalls 30 mm) versagten bei maximaler Belastung und führten somit nicht zu einer erhöhten Resttragfähigkeit. Für Kernhöhen von 100 und 200 mm wurden die maximalen Schubspannungen mit 0,38 MPa bzw. 0,27 MPa bestimmt. Das Kraft-Verformungs-Verhalten von Versuchskörpern ohne Verbundmittel wies bis zur Maximallast keinen signifikanten Unterschied zu Versuchskörpern mit Verbundmitteln auf. Die Querschnitte versagten durch Diagonalrisse im Kernmaterial oder durch Delamination. Das entstehende Biegemoment in dem Versuchsaufbau führte zu Zug- und Druckkräften in den Versuchskörpern. Für HSC-Deckschichten wurde ein ähnliches Kraft-Verformungs-Verhalten bei maximalen Belastungen von ca. 35 kN beobachtet, auch der Einsatz von Verbundmitteln wirkte sich ähnlich aus wie bei UHPFRC.

The investigated folded plate cross-section with a core height of 200 mm showed an about 50% higher stiffness compared to flat sections with the same core height (Fig. 8). For this comparison, the applied load was normalised by the bond area. Again, slight tilting of the specimen could not be avoided. The elements failed due to shear cracks in the core material and partially from debonding at the top part of the specimens.

2.6 Sandwich panels under flexural loading

The results of investigations on small-scale specimens were used to set up sandwich panels with spatially shaped facings. In total, three different cross-sections were investigated. For the validation of the production method on large-scale specimens, elements with flat facings were produced. For elements with non-flat facings, a folded plate cross-section and doubly curved configuration were analysed.

The flexural behaviour of prestressed sandwich panels was investigated on simply supported beam elements. Flat and folded plate elements were tested with 2.4 m span under three-point loading. The span was increased to 4.0 m and four-point loading for doubly curved elements. All test specimens were loaded displacement controlled with 1.0 mm/min. Besides the test load, deflections and deformations were meas-

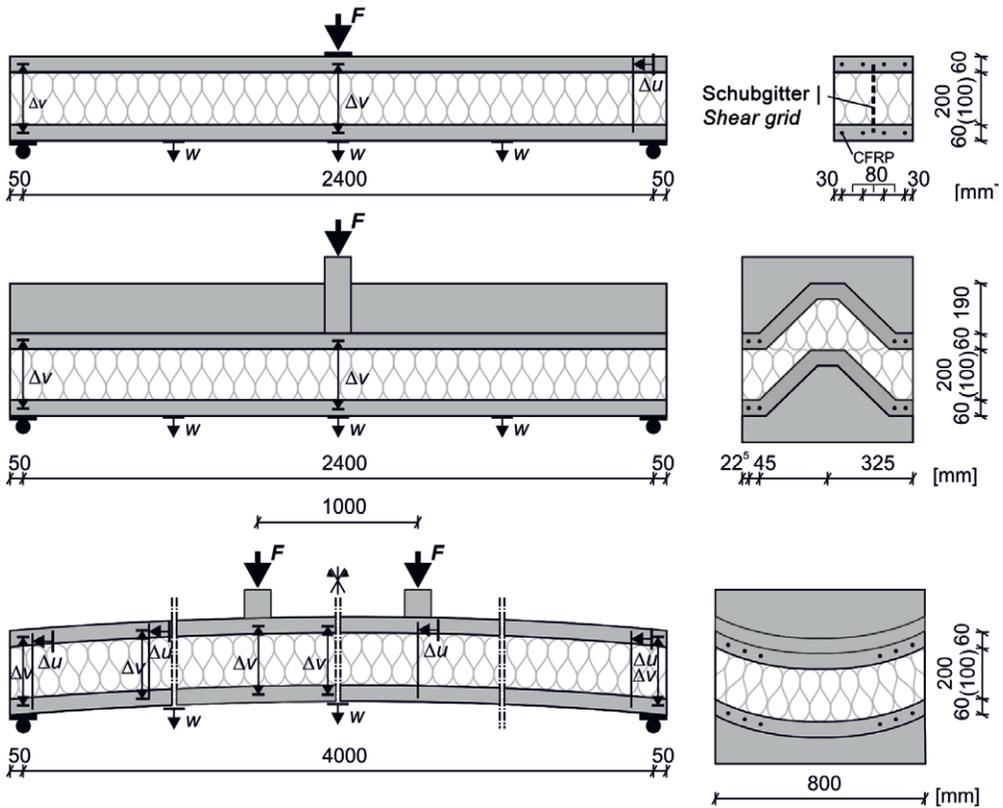


Bild 9: Versuchsaufbauten der Biegeversuche an Sandwichelementen | Fig. 9: Test setups of bending tests on sandwich panels

Der untersuchte Faltenwerkquerschnitt mit einer Kernhöhe von 200 mm zeigte eine um ca. 50 % höhere Steifigkeit im Vergleich zu ebenen Querschnitten mit gleicher Kernhöhe (Bild 8, rechts). Für diesen Vergleich wurde die aufgebrachte Last auf die Verbundfläche normiert. Auch hier konnte eine leichte Verkippung des Versuchskörpers nicht vermieden werden. Die Elemente versagten aufgrund von Schubrisen im Kernmaterial und teilweise durch Delamination im oberen Teil der Versuchskörper.

2.6 Sandwichbauteile unter Biegebeanspruchung

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen an kleinformatigen Probekörpern wurden Sandwichelemente mit räumlich geformten Deckschichten erarbeitet. Insgesamt wurden drei

unterschiedliche Querschnitte kontinuierlich mit LVDTs. Die Testaufbauten von Sandwichbalken sind in Fig. 9 dargestellt. Für die Bewertung des Sandwicheffekts wurden ein gefaltetes Platten- und ein doppelt gebogenes Element untersucht. Gefaltete Platten- und doppelt gebogene Elemente wurden kontinuierlich über ihre Breite abgestützt und belastet, um praktische Randbedingungen zu gewährleisten. Aufgrund der Komplexität in der Produktion wurden an diesem Stadium Scherverbinder nur für die ebenen Elemente montiert. Aufgrund der hervorragenden Festigkeit und Duktilität von UHPFRC wurden nur zwei ebene Sandwichbalken mit HSC-Fassungen exemplarisch getestet.

Neben der Querschnittsform wurde der Einfluss von Vorspannung untersucht. Vier Stäbe oder vier siebenadriges Stränge wurden als vorgespannte CFRP-Bewehrung verwendet:

verschiedene Querschnitte untersucht. Für die Validierung des Herstellungsverfahrens an großformatigen Versuchskörpern wurden Elemente mit ebenen Deckschichten hergestellt. Für Elemente mit nicht ebenen Deckschichten wurden ein Falterwerkquerschnitt und eine doppelt gekrümmte Konfiguration analysiert.

Das Biegetragverhalten von vorgespannten Sandwechenelementen wurde an Einfeldträgern untersucht (Bild 9). Ebene und Falterwerkelemente wurden mit 2,4 m Spannweite unter 3-Punkt-Belastung getestet. Die Spannweite wurde für doppelt gekrümmte Elemente auf 4,0 m mit 4-Punkt-Belastung erhöht. Die Tests wurden weggesteuert mit 1,0 mm/min durchgeführt. Neben der Prüfkraft wurden mit IWA kontinuierlich Durchbiegungen und Verformungen gemessen. Zur Beurteilung des Sandwecheffekts wurden gefaltete Einzeldeckschichten und doppelt gekrümmte Elemente untersucht. Gefaltete und doppelt gekrümmte Elemente wurden über die Breite kontinuierlich gelagert und belastet, um praxisrelevante Lagerungsbedingungen zu schaffen. Aufgrund der Komplexität in der Produktion wurden Verbundmittel nur bei den ebenen Elementen angeordnet. Aufgrund der deutlich höheren Festigkeit und Duktilität von UHPFRC wurden nur zwei ebene Sandwichträger mit HSC-Deckschichten exemplarisch getestet.

Neben der Querschnittsform wurde auch der Einfluss einer Vorspannung mit CFK-Bewehrung (vier Stäbe oder vier siebendrähtige Litzen) untersucht. Die Vorspannelemente waren wie folgt angeordnet:

- Ebene Elemente: in mittlerer Deckschichthöhe,
- Falterwerkelemente: in den unteren Flanschen der Deckschichten,
- Doppelt gekrümmte Elemente: diagonal (gerade, aber windschief).

Eine detaillierte Übersicht über alle Versuchsparameter und -ergebnisse ist in [1] zu finden.

Die Biegeversuche an **ebenen Sandwechenelementen** zeigten eine zufriedenstellende Reprö-

- Flat elements: reinforcement in mid-height;
- Folded plate elements: reinforcement in the bottom flanges of the facings;
- Doubly curved elements: reinforcement diagonal as straight, but skew lines.

A detailed overview of all test parameters and results is given in [1].

Flexural tests on **flat sandwich sections** showed a satisfying reproducibility of the bond zone quality for specimens applying the formwork side of the facings in the bond zone. Additionally, the material properties of the PU core were reproducible independently from the size and shape of the specimens. In Fig. 10, the load-deflection response of tests with UHPFRC facings (CFRP shear grid, bars without pre-tensioning and strands with pre-tensioning) and textile reinforced concrete (TRC) facings are depicted. Both tests with UHPFRC facings showed roughly the same maximum load, but about 25% less deflection for the prestressed member. It can be clearly seen that the sandwich panel with TRC facing showed considerably less stiffness, early cracking and roughly half of the maximum load compared to the elements with UHPFRC facings. As expected from bond tests as well as tests on small sandwich sections, elements with UHPFRC facings showed a superior structural performance. Additionally, these specimens

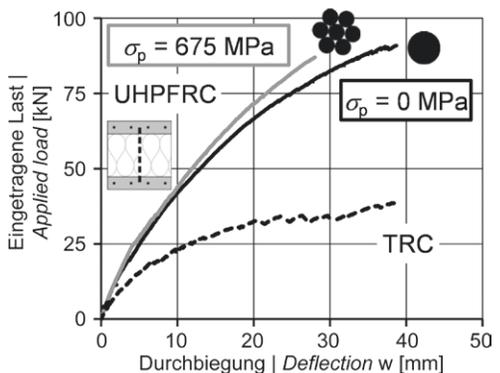


Bild 10: Last-Mittendurchbiegungs-Beziehung von ebenen Sandwechenelementen mit UHPFRC- bzw. TRC-Deckschichten mit Schubgittern | **Fig. 10:** Load- midspan deflection relation of planar sandwich beams with UHPFRC and TRC facings, resp., with shear grids

duzierbarkeit der Qualität der Verbundfuge für Versuchskörper, bei denen die glatte Schalungsseite der Deckschichten in der Verbundfuge angeordnet war. Darüber hinaus waren die Materialeigenschaften des PU-Kerns unabhängig von der Größe und Form der Versuchskörper reproduzierbar. In Bild 10 ist beispielhaft das Last-Durchbiegungs-Verhalten von Versuchskörpern mit UHPFRC-Deckschichten (CFK-Schubgitter, Stäbe ohne Vorspannung und Litzen mit Vorspannung) und Textilbeton (TRC) dargestellt. Beide Versuche mit UHPFRC-Deckschichten zeigten etwa die gleiche maximale Belastung, aber etwa 25 % weniger Durchbiegung für das vorgespannte Element. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Sandwichbalken mit TRC-Deckschichten im Vergleich zu den Elementen mit UHPFRC-Deckschichten deutlich weniger Steifigkeit aufweist, eine frühzeitige Rissbildung erfährt und eine deutliche geringere Bruchlast erreicht. Wie anhand der vorangegangenen kleinteiligen Versuche erwartet, zeigten Elemente mit UHPFRC-Deckschichten ein deutlich günstigeres Verhalten. Darüber hinaus können diese Versuchskörper relativ leicht vorgespannt werden und der Herstellungsprozess von Faltwerken und doppelt gekrümmten Deckschichten aus TRC ist im Vergleich zum Gießen von UHPFRC relativ aufwendig.

Das Versagen von Versuchskörpern mit UHPFRC-Deckschichten ohne Vorspannung wurde durch Mehrfachrisse mit kleinen Rissbreiten und Abständen angekündigt. Bei maximaler Belastung zeigten Probekörper mit Vorspannung deutlich weniger Risse. Beide Elemente versagten aufgrund von Schubrisen im PU-Kern in Kombination mit Rissen in den Deckschichten. Im Gegensatz dazu versagten Elemente mit TRC durch übermäßige Rissbildung der Deckschichten und einen Biegeriss des Kernmaterials jeweils in Feldmitte.

Zur Erforschung des Trag- und Verformungsverhaltens von **Faltwerkquerschnitten** wurden zunächst einzelne Faltwerkelemente getestet, um den Einfluss unterschiedlicher Vorspannkraft und Bewehrungsanordnungen zu untersuchen. Anschließend wurden verschiedene Anordnungen

can be prestressed relatively easily and the production process of folded plate and doubly curved facings made of TRC is rather complex compared to casting of UHPFRC.

Failure of tests with UHPFRC facings without prestressing was indicated by multiple cracking with small crack widths and spacings. At maximum load, tests with prestressing showed considerably less cracks. Both tests failed due to shear cracking of the PU core in combination with cracking of the UHPFRC facings. In contrast, slabs with TRC facing failed due to excessive cracking of the bottom facing and a flexural crack of the core material, both at midspan.

In the following section, the structural performance of **folded plate cross-sections** is shortly discussed. At first, single folded plate elements were tested to investigate the influence of different prestressing forces and reinforcement arrangements. Afterwards, different arrangements of reinforcement and prestressing forces were applied to folded plate sandwich beams. The test results of single folded plate elements were additionally used as reference to evaluate the sandwich action. Top in Fig. 11, the load-deflection responses of prestressed and non-prestressed single folded plate elements and folded plate sandwich elements are exemplarily compared. For sandwich elements with equal prestressing and arrangement of reinforcement, the maximum load was 2.5 to 3 times higher compared to single folded plate elements. The corresponding maximum deflection of sandwich elements was about the same as for single folded plate elements.

Crack widths remained less than 2.5 mm until 80% of maximum load for single folded plate beams and sandwich elements. In Fig. 11 (bottom), the crack patterns of prestressed elements – bottom views – are shown. For single elements and sandwich panels, flexural cracks first developed at mid span in the bottom flanges at roughly 30–40% of the maximum load. Increasing test loads resulted in further cracks in the bottom flanges. After the bottom flanges were cracked at several positions, the flexural

gen von Bewehrungs- und Vorspannkräften für die Anwendung in Sandwichträgern getestet. Die Ergebnisse der Einzelschalenelemente wurden zusätzlich als Referenz zur Beurteilung der Sandwichwirkung herangezogen. In Bild 11, oben, sind die Last-Durchbiegungs-Beziehungen von vorgespannten und nicht vorgespannten Einzel-Faltwerkelementen und Sandwichelementen exemplarisch dargestellt. Bei Sandwichelementen mit gleicher Vorspannung und Bewehrungsanordnung war die maximale Belastung im Vergleich zu Einzelschalen 2,5- bis 3-mal höher. Die maximale Durchbiegung der Sandwichelemente war etwa gleich hoch wie bei den einzelnen Elementen, aber bei einem deutlich höheren Lastniveau.

In Bild 11 (unten) sind die Rissbilder (Untersichten) von vorgespannten Elementen dargestellt. Die Rissbreiten blieben unter 2,5 mm bis 80 % der maximalen Belastung bei Einzelschalen und Sandwichelementen. Bei beiden Elementtypen entwickelten sich zunächst mittig in den unteren Flanschen Biegerisse bei etwa 30–40 % der maximalen Belastung. Steigende Belastungen führten zu weiteren Rissen in den unteren Flanschen. Nachdem die unteren Flansche an mehreren Stellen gerissen waren, verliefen die Biegerisse in einem Winkel von bis zu 45° in die Stege.

In Bild 12 ist das Last-Durchbiegungsverhalten von **doppelt gekrümmten Elementen** – sowohl Einzelelemente, d. h. nur eine UHPFRC-Schicht, als auch Sandwichelemente – mit unterschiedlichen Vorspannkräften (sechs Stäbe oder Litzen) unter 4-Punkt-Biegebelastung dargestellt. Wie bei den Faltwerkelementen festgestellt wurde, blieben die Rissbreiten bei Einzel- und Sandwichelementen kleiner als 2,5 mm. Bei einzelnen doppelt gekrümmten UHPFRC-Schalen wurde jedoch ein Druckversagen beobachtet (Bild 12, rechts). Das Versagen wurde in der Nähe der Lastaufbringung bei Durchbiegungsverhältnissen von L/60 bis L/40 (abhängig vom Vorspanngrad) verursacht. Die Ergebnisse der Biegeversuche an Sandwichelementen zeigten keine Erhöhung der Prüfkraft durch Vorspannung, aber eine geringere Durchbiegung. Im Gegen-

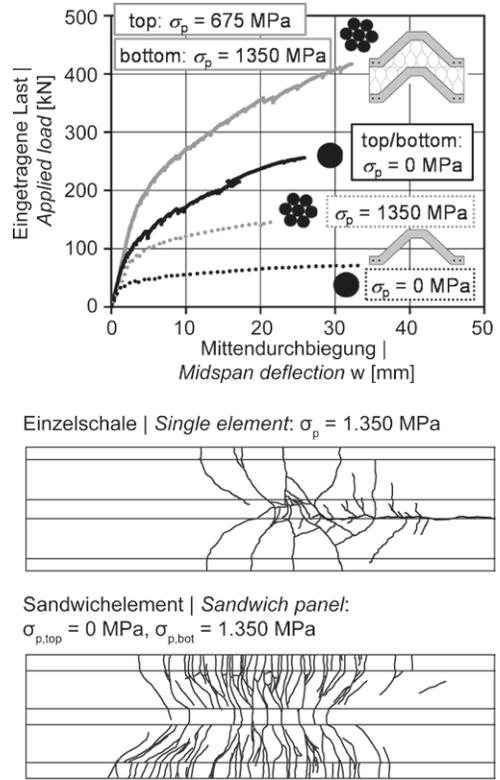


Bild 11: Gefaltete Einzel- und Sandwichschalen mit unterschiedlicher Vorspannung; Mittendurchbiegung in Abh. der Lasthöhe und Rissbilder (Untersicht) nach Versuchsende | **Fig. 11:** Folded single resp. sandwich elements with different prestressing; midspan deflections depending on the load height and crack patterns (bottom view) after testing

cracks proceeded into the webs at an angle up to 45°.

In Fig. 12 (left) the load-deflection behaviour of **doubly curved elements** – single elements (that means: one UHPFRC layer) as well as sandwich elements – with different prestressing forces (six bars or strands) under four-point flexural loading is depicted. As observed for folded plate elements, the crack widths for single and sandwich elements remained less than 2.5 mm. However, for single doubly curved UHPFRC elements a compression failure was observed (Fig. 12, right). The failure was induced in the vicinity of the load application at deflection ratios of L/60 to L/40, depending on the prestress-

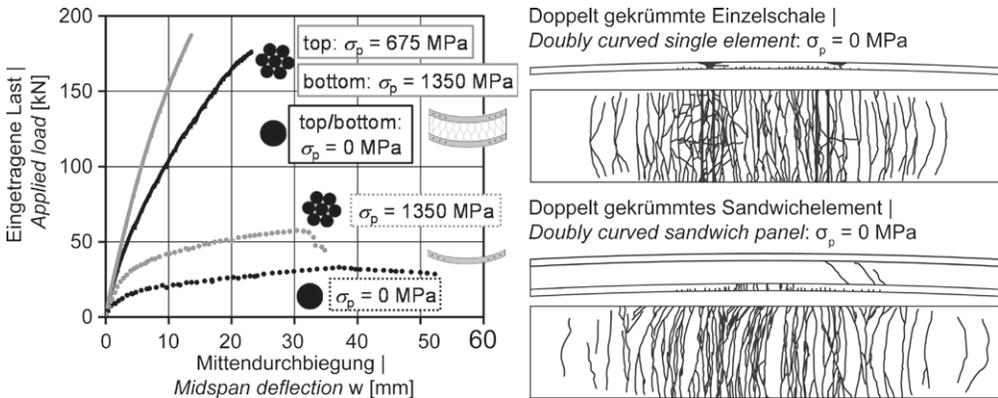


Bild 12: Doppelt gekrümmte Elemente – Einzel- und Sandwichschalen – mit verschiedenen Vorspannungen; Mittendurchbiegung in Abh. der Lasthöhe (links) und Rissbilder für Elemente ohne Vorspannung der Deckschichten nach Versuchsende (rechts, Ansichten von der Seite und von unten) | **Fig. 12:** Doubly curved elements – single and sandwich – with different prestressing forces; midspan deflections depending on the load height (left) and crack patterns after testing of elements without prestressing (right; side and bottom views)

satz zu Falterwerkelementen versagten doppelt gekrümmte Sandwichprofile bei deutlich geringerer Durchbiegung, aber bei der vier- bis fünffachen maximalen Belastung im Vergleich zu einzelnen doppelt gekrümmten Elementen. Das Versagen von Sandwichelementen wurde durch Schubrisse im Kernmaterial aufgrund der großen Relativverschiebungen der äußeren UHPFRC-Schichten verursacht. Druckversagen, wie es bei einzelnen doppelt gekrümmten Elementen beobachtet wurde, trat bei Versuchen an Sandwichelementen nicht auf. Verformungen in Querrichtung der Elemente wurden nicht beobachtet.

Ein Tastversuch unter Langzeitbelastung wurde an einem doppelt gekrümmten Sandwichträger ohne Vorspannung der Deckschichten durchgeführt. Eine Belastung von 22 kN entsprach 50 % der Risslast eines solchen Prüfkörpers. Nach 1.000 h war kein deutlicher Anstieg der Durchbiegungen und Verformungen sichtbar.

ing. The results of flexural tests on sandwich sections showed no increase in test load due to prestressing, but less deflection. In contrast to folded plate elements, doubly curved sandwich sections failed at considerably less deflection, but at four to five times the maximum load compared to single doubly curved elements. The failure of sandwich elements was induced by shear cracks in the core material due to relative slip of the outer UHPFRC layers. Compression failure, as observed for single doubly curved elements, did not occur in tests on sandwich elements. Deformations in transverse direction of the elements due to loading were not observed.

A tentative test under long-term loading was conducted on a doubly curved sandwich beam without prestressing of the facings. The dead load of 22 kN, represents 50% of the cracking load of this test specimen. After 1,000 h there was no considerable increase in deflections and deformations visible.

3 Finite-Elemente-Modellierung

3 Finite element modelling

3.1 Allgemeines

3.1 Preface

Bei der Entwicklung der Sandwichelemente wurden numerische, nichtlineare Finite-Elemente-Untersuchungen (FE-Untersuchungen) mit

Non-linear numerical investigations were conducted during the development of sandwich panels. The numerical investigations have been

ABAQUS [23] unter Verwendung nichtlinearer Materialmodelle durchgeführt. Für jeden Untersuchungsschritt wurden die Versuchskörper modelliert und die Resultate der Berechnungen mit den experimentellen Ergebnissen validiert, um die Anwendbarkeit der Materialgesetze zu bewerten. Die numerischen Untersuchungen wurden mit Hilfe von 3D-Modellen durchgeführt. In allen Fällen wurden 8-Knoten-Volumenelemente mit reduzierter Integration für Beton, Lastplatten und PU-Schaum eingesetzt. Die Bewehrung wurde als Fachwerkstäbe mit starrem Verbund zum umgebenden Beton abgebildet. Bei den Verbunduntersuchungen wurde die Bewehrung mit Volumenelementen diskret modelliert. Alle Modelle wurden mit dem impliziten Newton-Raphson-Lösungsverfahren simuliert. Die Größe der Elemente wurde in Abhängigkeit der Größe der untersuchten Elemente angepasst. Detaillierte Informationen zu den Simulationsverfahren sind in [1] zu finden.

3.2 Materialmodelle

Für Beton wurde das nichtlineare Verhalten unter Zug- und Druckbeanspruchung mit einem plastischen Schädigungsmodell [23]–[25] modelliert. Innerhalb des Modells wird ein verschmierter Rissbildungsansatz in Kombination mit skalaren Schädigungen verwendet. Dieses Modell ist in der nichtlinearen FE-Software ABAQUS [23] integriert. Detaillierte Informationen zu den verwendeten Parametern sind in [1] enthalten. Die theoretischen Ansätze und Eingangswerte für das einaxiale Zug- und Druckverhalten wurden unter Berücksichtigung von [26]–[28] ermittelt. Die Querdehnzahl wurde konstant mit 0,2 gewählt. Versuche an UHPFRC-Würfeln unter mehraxialer Druck- und Zugbelastung wurden von Speck [29] durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass das durchschnittliche Verhältnis von zwei-axialer zu einaxialer Druckfestigkeit σ_{b0}/σ_{c0} etwa 1,0 (grobkörnig) bis 1,08 (feinkörnig) beträgt. Im Gegensatz dazu wird für NSC in der Regel 1,16 berücksichtigt. In [30] wurde die Anwendbarkeit eines Plastizitätsmodells für UHPFRC- und NSC-Materialproben für verschiedene Spannungszustände, d. h. Zug-, zwei-axiale Druck- und Biegebeanspruchung, untersucht.

performed with the finite element environment ABAQUS [23] using non-linear models for materials. For each investigation step, the test specimens have been modelled and the results of the calculations were validated with experimental data to evaluate the applicability of the provided material laws for the materials. The numerical investigations were performed using 3D models. In all cases, 8-node volume elements with reduced integration were applied for concrete, loading plates and PU foam. The reinforcement was idealised as truss members with rigid bond to the surrounding concrete. Only in case of bond investigations, the reinforcement was modelled discretely using volume elements. All models were simulated using the implicit solution technique of Newton-Raphson procedure. The element's sizes were adapted in dependence on the size of investigated members. Detailed information on the simulation procedures can be found in [1].

3.2 Material models

For concrete the non-linear behaviour under tensile and compressive loading conditions was modelled using the damage plasticity model [23]–[25]. Within the model, a smeared cracking approach in combination with scalar damage is used. This model is incorporated in the non-linear finite element software ABAQUS [23]. Detailed information on the applied parameters are given in [1]. The input values for uniaxial tensile and compressive behaviour were determined by theoretical approaches considering the material properties [26]–[28]. Poisson's ratio was constantly chosen to 0.2. Tests on UHPFRC cubes under multiaxial compression and tension have been conducted by Speck [29]. It was shown that the average ratios of biaxial to uniaxial compressive strength σ_{b0}/σ_{c0} are about 1.0 (coarse-grained HSC) to 1.08 (fine-grained). In contrast, for NSC usually 1.16 is taken into account. In [30] the applicability of a damage plasticity model for UHPFRC and NSC material samples was shown for different stress states, i.e. tensile, biaxial compressive, and flexural loading.

Um die Komplexität numerischer Modelle zu minimieren, wurde das anisotrope Materialverhalten aller CFK-Komponenten vernachlässigt. Gemäß Horstmann [31] wurde ein isotropes linear-elastisches Materialverhalten bis zum Bruch bei maximaler Zugfestigkeit angenommen. Für CFK-Stäbe, -Litzen und das Schubgitter wurden die maximale Festigkeit und die Elastizitätsmoduln gemäß den Angaben in Abschnitt 2 implementiert. Die Querdehnzahl wurde konstant auf 0,2 [15], [31] gewählt.

Innerhalb von ABAQUS kann das anisotrope Materialverhalten von ausgehärteten Schäumen durch das Materialgesetz „*crushable foam*“ in Kombination mit einem isotropen, elastischen Materialverhalten vereinfacht werden. Die Querdehnzahl wurde auf 0,41 eingestellt, um das Verhältnis von E-Modul und Schubmodul zu berücksichtigen. Für den plastischen Zustand wurde das *Crushable-Foam*-Modell angewendet. Das plastische Verhalten wird durch einen von Mises-Kreis und eine Ellipse in Meridianrichtung dargestellt. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Fließspannung unter Druck wurde aus eigenen Materialtests abgeleitet.

Das Tragverhalten von Sandwichprofilen wird maßgeblich durch die Qualität der Verbundfuge zwischen Beton und Kernmaterial gesteuert, insbesondere wenn keine Verbundmittel eingesetzt werden. Kohäsionselemente wurden verwendet, um einen möglichen Ausfall der Verbundfuge durch Delamination zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck wurde eine Spannungs-Öffnungs-Beziehung verwendet [1].

3.3 Validierung der verwendeten Modelle

In [1] wurde die Anwendbarkeit der Materialmodelle für Kernschaum und Verbundfuge für Zug-, Schub- und Druckbelastung an kleinskaligen Prüfkörpern nachgewiesen. Zusätzlich wurde das Verbundverhalten von CFK-Spanngliedern im Beton durch numerische Modelle tiefergehend untersucht. In diesem Abschnitt werden nur die Ergebnisse zur Modellierung von Betonschalen- und Sandwichbalken exemplarisch dargestellt. Die numerischen Modelle wurden

To minimise the complexity of numerical models, the anisotropic material behaviour of all CFRP components was neglected. In accordance with Horstmann [31], an isotropic linear-elastic material behaviour with failure at maximum tensile strength was assumed. For the bar, strand and shear grid, the maximum strength and Young's moduli were applied in accordance with information given in section 2. Poisson's ratio was set constantly to 0.2 [15], [31].

Within ABAQUS, the anisotropic material behaviour of foam can be simplified by the material law crushable foam in combination with an isotropic and elastic material behaviour. Poisson's ratio was set to 0.41 to account for the relationship of Young's modulus and shear modulus. For the plastic state, the crushable foam material law was applied. The volumetric hardening approach presumes that the yield stress is mainly dependent on compressive stresses. The plastic behaviour is represented by a von Mises circle and an ellipse in meridian direction. The stress-strain relationship of yield stress under compression was derived from own material testing.

The quality of the interface between facing and core material mainly controls the bearing behaviour of sandwich sections, especially for cases without any additional shear connectors. A cohesive interface was applied to account for possible failure of the bond zone. For this purpose a traction-separation relationship was used [1].

3.3 Validation of applied models

In [1] the applicability of the material models for core foam and bond zone was shown for tensile shear and compressive loading on small-scale test specimens. Additionally, the bond behaviour of CFRP tendons in concrete was further investigated by numerical models. In this section, only the results for modelling of concrete shell beams and sandwich beams are exemplarily shown. The numerical models were assembled, loaded and supported in the same way as the experimental investigations.

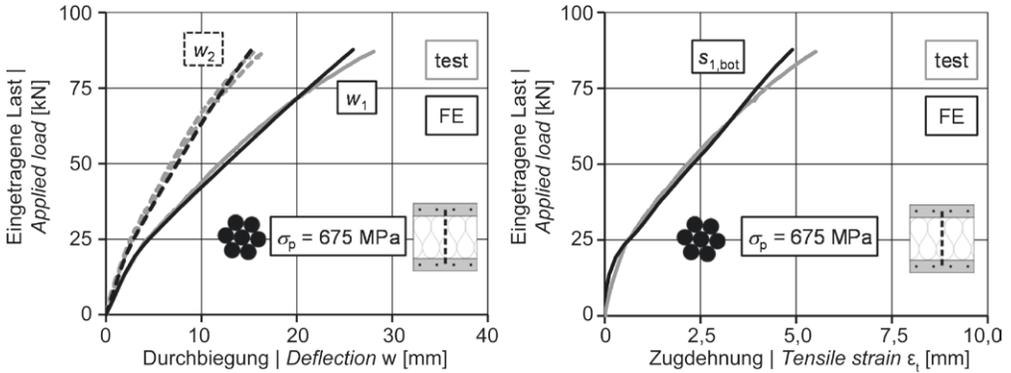


Bild 13: Numerische und experimentelle Ergebnisse von ebenen Sandwichquerschnitten mit vorgespannter CFK-Bewehrung und CFK-Schubgittern unter Biegebeanspruchung; links: Durchbiegung am Viertelspann (w_2) und in Balkenmitte w_1 , rechts: Zugdehnung ϵ_t | **Fig. 13:** Numerical and experimental results of planar sandwich beams with pre-tensioned strands and CFRP shear grid under bending; left: deflection at quarter point (w_2) and midspan (w_1), right: bottom strain ϵ_t

in gleicher Weise wie die experimentell getesteten Probekörper abgebildet, aufgelagert und belastet.

Zunächst wurden Sandwichbalken mit ebenen Deckschichten analysiert, um die abgeleiteten Materialparameter zu validieren. In Bild 13 sind die numerisch bestimmten Last-Verformungs-Beziehungen für einen vorgespannten Sandwichbalken mit UHPFRC-Deckschichten und CFK-Schubgittern exemplarisch dargestellt (w_2 : Durchbiegung im Viertelspann, w_1 : Balkenmitte). Die gute Übereinstimmung des Trag- und Verformungsverhaltens und der Lastabtragmechanismen wird durch die Vorhersage der Risslasten bestätigt. Wie in den Versuchen haben die CFK-Spannglieder in der Simulation nicht versagt, sondern wurden je nach Spannbettvorspannung bis maximal 2.500 MPa belastet. Abhängig von der Herstellungsqualität (vgl. [1]) wurden für

First of all, sandwich beams with flat facings were analysed to validate the derived material parameters. In Fig. 13 the numerically determined load-deflection responses at midspan w_1 and quarter points w_2 for a prestressed sandwich beam with UHPFRC facings and CFRP shear grid are exemplarily shown. The good agreement of the overall responses and load carrying mechanisms is confirmed by the prediction of the bottom strain. As in the tests, the CFRP tendons did not fail in the simulation, but were stressed up to 2,500 MPa at maximum, depending on the initial prestressing. Depending on the production quality (cp. [1]), for flat specimens, a very good prediction of results was achieved with consistently derived input parameters.

In Fig. 14, the numerical models of folded plate and doubly curved sandwich elements are shown. A mesh size of 25 mm in longitudinal

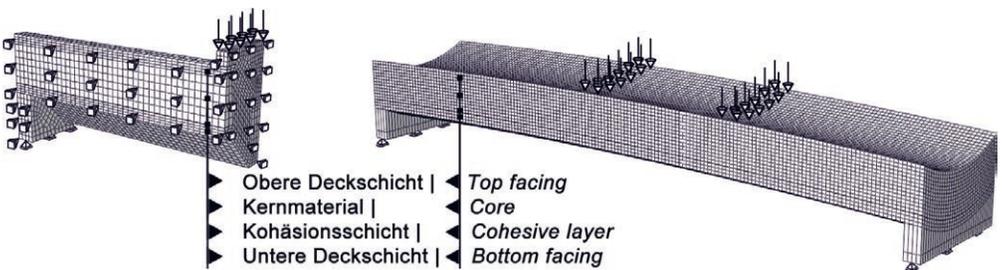


Bild 14: Numerische Modelle von gefalteten (links) und doppelt gekrümmten (rechts) Sandwichbauteilen (nicht maßstäblich) | **Fig. 14:** Numerical models of folded plate (left) and doubly curved (right) sandwich elements (not to scale)

ebene Elemente sehr gute Übereinstimmungen mit den Simulationen bei Verwendung von konsistenten Eingangsparametern erzielt.

In Bild 14 sind die numerischen Modelle von faltwerk- und doppelt gekrümmten Sandwich-elementen dargestellt. Es wurde eine Netzgröße von 25 mm in Längsrichtung verwendet. Das FE-Netz der faltwerkelemente wurde im Rahmen des FE-Programms erzeugt, während die Elemente der doppelt gekrümmten Elemente mit Hilfe einer programmierten Subroutine [1] erzeugt wurden, da sowohl Extrusions- als auch Revolutionsverfahren für die doppelt gekrümmte Form nicht angewendet werden können. Innerhalb dieses entwickelten Programm-codes wurden die Anzahl der Elemente und die Bewehrungsrichtung auf Basis von Länge, Breite, Höhe und Dicke des doppelt gekrümmten Elements ermittelt. Das ermittelte FE-Netz wurde in die FE-Software importiert.

In [1] wurde die Anwendbarkeit des plastischen Schädigungsmodells für die Bestimmung von Last-Durchbiegungs-Beziehungen sowie Dehnungen in faltwerken und doppelt gekrümmten Einzelschalen dargestellt. Zusätzlich wurden die Bereiche plastischer Dehnungen in guter Übereinstimmung mit den Rissbereichen der Versuchskörper festgestellt.

Im Gegensatz zu ebenen Sandwichbalken zeigten die experimentellen Untersuchungen an gefalteten Sandwichelementen einen signifikanten Einfluss der Vorspannung der Deckschichten auch bei einer relativ kurzen Spannweite von 2,4 m. Die numerisch ermittelten Last-Verformungs-Beziehungen stimmten gut mit den Versuchsergebnissen überein. Der Versagensmodus der Sandwichelemente war immer eine Kombination aus starker Rissbildung der Deckschichten und plastischer Verformung des Kernmaterials. Die Spannglieder wurden bis zu 2.600 MPa bei Vorspannungen von 1.350 MPa beansprucht, was beinahe der maximalen Zugfestigkeit von 2.650 MPa entspricht. Eine Vorspannung von 675 MPa führte zu Höchstspannungen von etwa 2.000 MPa beim Versagen der Elemente. Wie bei den realen Tests versagte die Verbundfuge zwischen Kern-

direction was applied for folded plate sections and for doubly curved sections. The mesh of folded plate elements was generated within the finite elements programme, whereas that of doubly curved elements were created with aid of a source code [1], since extrusion or revolution techniques could not be applied for the doubly curved shape. Within this developed programme code, the number of elements and direction of reinforcement were determined on the basis of length, width, height and thickness of the doubly curved cross-section. The determined mesh of each part was imported into the finite element software.

In [1] the applicability of the damage plasticity model for the determination of load-deflection responses as well as strains in folded plate and doubly curved single sections was shown. Additionally, the plastic strains were found in good agreement with the crack patterns.

In contrast to flat sandwich beams, the experimental investigations on folded plate sandwich elements showed a significant influence of prestressing of UHPFRC layers, even for the relatively short span of 2.4 m. The numerically determined load-deflection responses were found in good agreement with the test results. For the sandwich panels, always a mixed failure mode from excessive cracking of the facings and plastic deformation of the core material was observed. In the model, the prestressing tendons were stressed up to 2,600 MPa for prestressing of 1,350 MPa, which is close the maximum tensile strength of 2,650 MPa. Prestressing of 675 MPa resulted in maximum stresses of about 2,000 MPa at failure of the elements. As in the tests, the interface between core and facings did not fail. For all combinations of reinforcement and prestressing forces, the load-deflection response was almost congruent. Hence, validated material laws for PU and interface from small-scale testing led to an appropriate prediction of the load bearing behaviour of sandwich panels under flexural loading. As shown in Fig. 15, the load-deflection response of doubly curved sandwich panels was predictable in good agreement. Therefore, an artificially increased shear

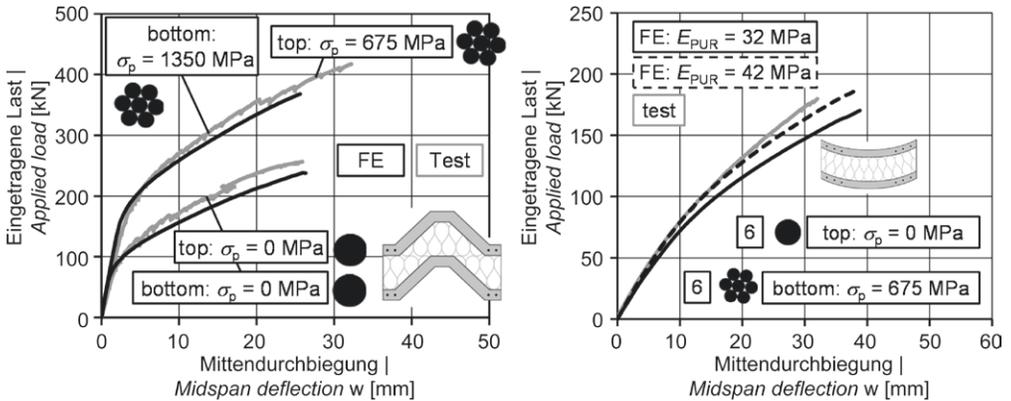


Bild 15: Numerische und experimentelle Ergebnisse von gefalteten (links) und doppelt gekrümmten Sandwichbauteilen (rechts) unter Biegebeanspruchung | **Fig. 15:** Numerical and experimental results of flexural tests on folded plate sandwich beams (left) and doubly curved sandwich beams (right)

material und Deckschichten in der Simulation nicht. Für alle Kombinationen von Bewehrung und Vorspannkraften war das Last-Verformungs-Verhalten nahezu deckungsgleich. Die anhand der kleinformigen Versuchskörper validierten Materialgesetze für PU-Schaum und Verbundfuge führten also zu einer adäquaten Vorhersage des Trag- und Verformungsverhaltens von Sandwichelementen unter Biegebeanspruchung. Wie in Bild 15 dargestellt, konnte das Last-Verformungs-Verhalten von doppelt gekrümmten Sandwichelementen ebenfalls in relativ guter Übereinstimmung prognostiziert werden. Allerdings führte die Verwendung eines modifizierten Schubmoduls durch Ansatz eines erhöhten E-Moduls zu einem verbesserten Last-Verformungs-Verhalten bei vorgespannten Elementen. Für weitere Erläuterungen und Untersuchungen wird auf [1] verwiesen.

Anschließend wurden weitere Vergleiche zwischen Numerik und Versuch vorgenommen. Die Gegenüberstellung von Rissmustern und Verteilungen der plastischen Dehnungen in den UHPFRC-Deckschichten zeigten gute Übereinstimmungen, auch wenn sich keine geeigneten plastischen Bereiche entwickelten (Bild 16). Dies war bereits bei den UHPFRC-Einzelschalen der Fall.

Obwohl Schubrisse durch das numerische Modell nicht über die ganze Höhe des Kernmate-

rials verwendet wurde, wurde ein erhöhter Young's Modulus [1]. Dies resultierte in einem global verbesserten Last-Verformungs-Verhalten für vorgespannte Elemente. Um die konsistenten Materialmodelle anzuwenden, wurden die etablierten Young's Modulus und Schubmodulus von 32 MPa und 11.5 MPa, beziehungsweise, für weitere Untersuchungen, die vollständig in [1] dargestellt sind.

Subsequently, further results were compared to test results. The comparison of crack pat-

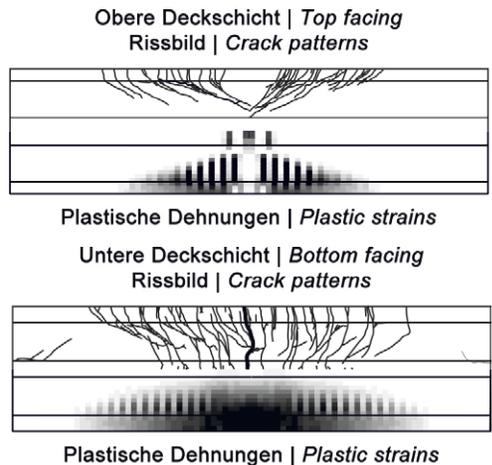


Bild 16: Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse von gefalteten Sandwichbauteilen unter Biegebeanspruchung (4 Litzen, $\sigma_p = 675$ MPa) | **Fig. 16:** Comparison of numerical and experimental results of flexural tests on folded plate sandwich panel (4 strands, $\sigma_p = 675$ MPa)

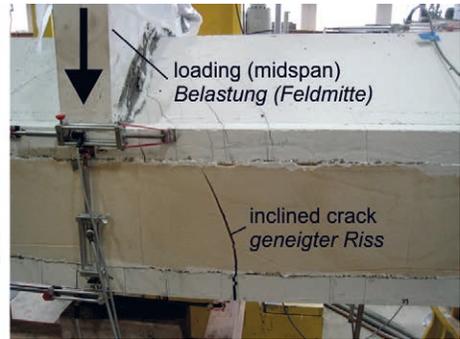
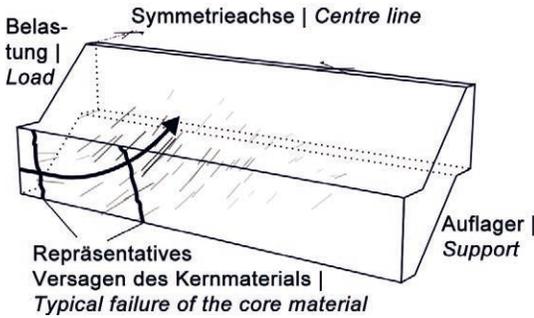


Bild 17: Numerisch ermittelte Hauptzugspannungsrichtungen im Kernmaterial von vorgespannten gefalteten Sandwichelementen (je Deckschicht 4 Litzen, $\sigma_p = 675$ MPa) bei Maximallast (links) und geneigter Riss im Kernmaterial bei Versagen im Versuch | **Fig. 17:** Numerically determined direction of maximum principal tensile stresses in core material of prestressed folded plate sandwich element (4 strands, $\sigma_p = 675$ MPa in top and bottom facing) at maximum load (left) and inclined crack in core material at failure in the test (right)

rials vorhergesagt wurden, entwickelten sich oben und unten in der Kernschicht Bereiche mit plastischen Dehnungen. Die Maximalwerte der Zugspannungen wurden in der Mitte zwischen Auflager und Lasteinleitung ermittelt. Die Richtungen der maximalen Hauptspannungen in der Kernschicht ergaben überwiegend einaxiale Zugspannungen in Feldmitte (Bild 17, links). Aufgrund der Form der Faltwerke waren die Spannungsrichtungen in der Mitte zwischen Lagerung und Lasteinleitung geneigt. Die experimentellen Untersuchungen zeigten ein Versagen im Kernmaterial entweder in Feldmitte oder mittig zwischen Auflager und Lasteinleitung, das hauptsächlich durch Rissbildung der UHPFRC-Deckschichten verursacht wurde (Bild 17, rechts). Die Richtung der maximalen Zugspannungen entsprach den beiden typischen Rissrichtungen.

Der Vergleich von Rissbildern und plastischen Dehnungen für doppelt gekrümmte Sandwichelemente zeigte eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Versuchen (vgl. exemplarisch Bild18).

4 Analytische Modelle

4.1 Allgemeines

Für das Verbundverhalten von CFK-Spanngliedern, das Zug- und Schubtragverhalten von

terns and distributions of plastic strains in the UHPFRC facings shows a good agreement, even though inclined plastic regions were not developed (Fig. 16). This was already the case for UHPFRC single layers.

Even though shear cracks over the height of the core material were not predicted by the numerical model, regions of plastic strains developed at the top and bottom of the core layer. Maximum values of tensile stresses were obtained in the middle between support and loading.

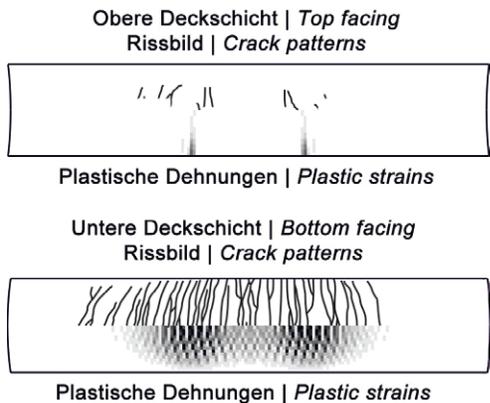


Bild 18: Vergleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen von doppelt gekrümmten Sandwichelementen unter Biegebeanspruchung (untere Deckschicht: 6 Litzen mit $\sigma_p = 675$ MPa, oben: keine Vorspannung) | **Fig. 18:** Comparison of numerical and experimental results of doubly curved sandwich panel under bending (bottom facing: 6 strands with $\sigma_p = 675$ MPa; no prestressing of top layer)

Sandwichquerschnitten und das Biegetragverhalten von vorgespannten Sandwichelementen mit Betondeckschichten im Zustand II wurden verschiedene analytische Modelle abgeleitet. Für die Herleitung und die vollständigen Modelle wird auf [1] verwiesen. Im Folgenden werden nur das Modell und die wichtigsten Ergebnisse für vorgespannte Sandwichelemente unter Biegebeanspruchung vorgestellt.

Bei Berechnungen von Sandwichelementen mit Stahlbetondeckschichten wird in der Regel der Verbund zwischen Deckschichten und Kernmaterial vernachlässigt und nur die aus Verbindungsmitteln resultierende Sandwichtragwirkung berücksichtigt. Da dieses Verfahren insbesondere bei hoher Verbundfestigkeit (vgl. Abschnitt 2) sehr konservativ und für die genaue Vorhersage von Rissbildung und maximalen Belastungen nicht ausreichend ist, wurde in [1] ein analytischer Ansatz abgeleitet. Das entwickelte Modell basiert auf der Sandwichtheorie von Stamm und Witte [32]. Dieser Ansatz geht von einem linearen Materialverhalten aus. Um die Rissbildung der Spannbetondeckschichten und die rissüberbrückende Wirkung von Fasern in UHPFRC zu berücksichtigen, wurde in [1] ein Modell zur Berechnung theoretischer Momenten-Krümmungs-Beziehungen dieser Werkstoffkombination entwickelt. Mit Hilfe dieser Beziehungen werden Resttragfähigkeit und -steifigkeit pro Belastungsschritt berechnet. Verbindungsmittel wurden durch lineare Federn idealisiert [1]. Die erhöhte Schubsteifigkeit des Kernmaterials von nicht ebenen Profilen wurde aus dem Schubfluss dieser Querschnitte abgeleitet [1], [32].

4.2 Validierung der abgeleiteten Ansätze

In Bild 19 werden die berechneten Last-Verformungs-Beziehungen an den Mittelpunkten (w_m) und den Viertelpunkten ($w_{1/4}$) von ebenen Sandwichbalken (mit CFK-Schubgitter) mit und ohne Vorspannung der CFK-Bewehrung mit den Versuchsergebnissen verglichen. Die prognostizierten Last-Durchbiegungs-Beziehungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen sowohl für vor-

The directions of maximum principal stresses in the core layer show predominant axial tensile stresses at midspan (Fig. 17, left). Due to the shape of folded plates, the stresses were found inclined in the middle between loading and support. The experimental results showed a failure in the core material either close to midspan or in between midspan and support for a core thickness of 200 mm, which was mainly induced due to cracking of the UHPFRC layers (Fig. 17, right). The direction of maximum tensile stresses were in agreement with both typical crack directions (Fig. 17).

The comparison of crack patterns and plastic strains for doubly curved sandwich panels shows a good prediction of cracked regions. In Fig. 18, the comparison is exemplarily shown for a specimen with prestressed bottom facing and reinforced top facing.

4 Analytical models

4.1 Preface

Analytical and engineering models for bond of CFRP prestressing tendons, tensile and shear behaviour of sandwich sections and the flexural behaviour of prestressed sandwich panels with cracked concrete facings were derived. For the derivation and full results of these models, it is referred to [1]. Subsequently, only the procedure and key results for prestressed sandwich panels under flexural loading are shortly presented.

For the design of sandwich panels with RC facings, usually the sandwich action induced by the core material is neglected and only the shear connectors are taken into account. Since this procedure is very conservative, especially for high strength of the bond zone (cp. section 2), and not adequate for the exact prediction of cracking and maximum loads, a calculative approach was derived in [1]. The developed model is based on the sandwich theory by Stamm and Witte [32]. This approach assumes a linear material behaviour. To account for crack-

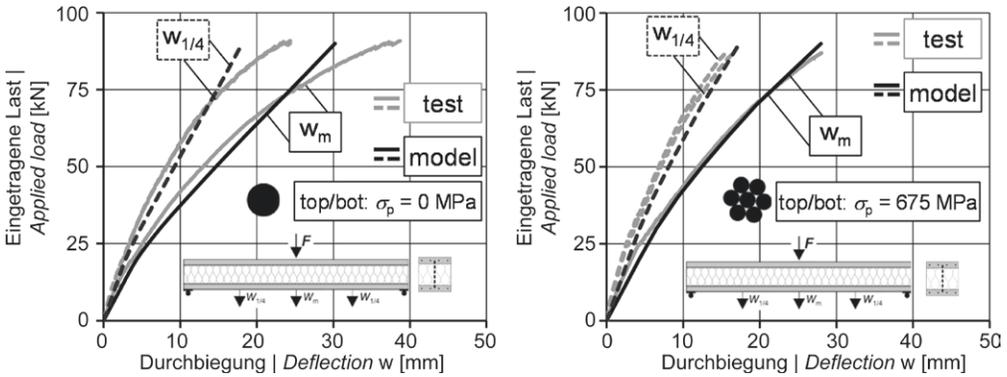


Bild 19: Durchbiegungen w bei ebenen Sandwichquerschnitten ohne (links) und mit (rechts) Vorspannung | Fig. 19: Deflection w of flat sandwich panels with CFRP shear grids without (left) and with (right) prestressed facings

gespannte als auch für nicht vorgespannte Deckschichten.

Die prognostizierten Versagensarten waren ein kombiniertes Versagen der Deckschichten und der Verbundfuge. Durch die hohe Verbundfestigkeit der Verbundfuge versagten die Probekörper bei Verwendung von Schubgittern durch Schubrissbildung des Kernmaterials, die durch die große Relativverschiebung der Deckschichten hervorgerufen wurde. Das Rechenmodell prognostizierte etwa die gleiche Relativverschiebung wie in den Versuchen bei Eintritt des Versagens und bei Erstrissbildung der Deckschichten. Im Bereich der Auflager wurde im Modell Delamination über eine Länge von ca. 250 mm bei maximaler Belastung bestimmt. Weitere Messstellen wurden in [1] validiert.

Zusätzlich wurde das abgeleitete Modell zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens von gefalteten Sandwichelementen unter Biegebeanspruchung angewendet. Zur Bestimmung der theoretischen Momenten-Krümmungs-Beziehungen (vgl. [1]) wurde der Faltwerkquerschnitt in einen Querschnitt mit abschnittsweise konstanter Breite, wie beispielsweise einen umgekehrten T-Träger, umgewandelt. In [1] wurde die Anwendbarkeit des vorgeschlagenen Modells gezeigt. Für verschiedene Vorspannkkräfte wurden die Last-Verformungs-Beziehungen in sehr guter Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen berechnet.

ing of prestressed concrete facings and the crack-bridging effect of fibres in UHPFRC, in [1], a model was developed to calculate theoretical moment-curvature relationships. With aid of this relationships, residual stiffness and rigidity are calculated. For connecting devices it was accounted by linear spring stiffness, which were derived in [1]. The increased shear stiffness of the core material of non-flat sections was derived from the shear flow distribution in the cross-sections [1], [32].

4.2 Validation of derived approaches

In Fig. 19, the calculated load-deflection responses at midspan (w_m) and at quarter points ($w_{1/4}$) of flat sandwich panels with and without pre-tensioning of the CFRP reinforcement are compared to the test results. For these elements, one CFRP shear grid was applied. The predicted load deflection responses are in good agreement with test results for prestressed and non-prestressed facings.

The predicted failure modes were a combined failure of the facings and the bond zone. In case of applied shear grids, test specimens failed due to shear cracks in the core material, which was induced by high relative displacement of the facings, but relatively good bond conditions. The model predicted about the same relative displacement at failure and cracking of the facings. In the vicinity of the supports, debonding

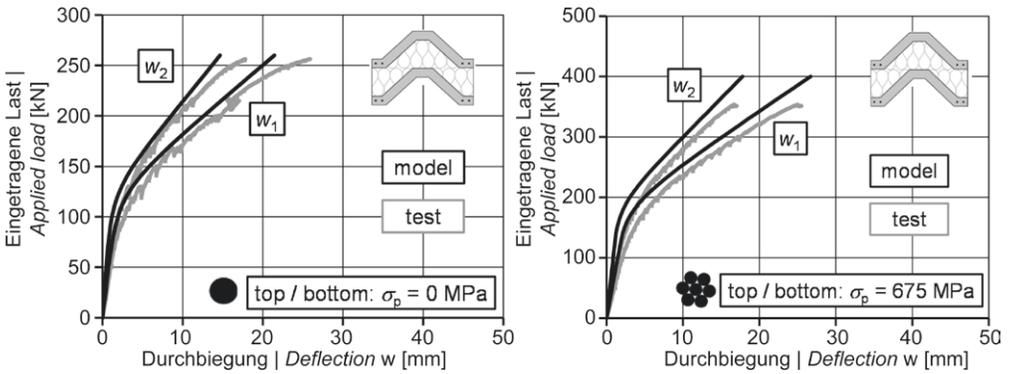


Bild 20: Last-Durchbiegungs-Beziehungen in Feldmitte (w_1) und in den Viertelpunkten (w_2) aus hergeleitetem Modell und Versuchen an gefalteten Sandwichbauteilen mit CFK-Stäben (links) und CFK-Litzen (rechts) | **Fig. 20:** Comparison of the load-deflection response at midspan (w_1) and at quarter points (w_2) of derived model and test data for folded plate sandwich panels with CFRP bars (left) and with CFRP strands (right)

Die Schersteifigkeit A des Kernmaterials wurde basierend auf [1] und [32] berechnet. In Bild 20 ist das ermittelte Last-Durchbiegungs-Verhalten für gefaltete Sandwichelemente ohne Vorspannung und mit Vorspannung der Deckschichten dargestellt. Die Risslasten sowie die Maximallasten wurden in guter Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen in Feldmitte (w_1) und in den Viertelpunkten (w_2) für die Elemente ohne Vorspannung ermittelt. Für das vorgespannte Sandwichelement wurde die Rissbelastung leicht überschätzt. Das Versagen der Elemente wurde durch Risse in den Deckschichten und kleinen Delaminationsbereichen an den Auflagern vorhergesagt. Die Spannungen in der CFK-Bewehrung wurden bis zu 2.600 MPa bestimmt, was in etwa der Bruchfestigkeit der CFK-Litzen entspricht. Für die untersuchten Spannweiten zeigte der Ansatz der Transformation des Faltwerkquerschnitts in einen umgekehrten T-Querschnitt zufriedenstellende Ergebnisse.

Der abgeleitete Berechnungsansatz zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens wurde auch für doppelt gekrümmte Sandwichelemente unter Biegebeanspruchung überprüft. Die Überhöhung in Längsrichtung des doppelt gekrümmten Elements führt zu mathematischen Gleichungen, die in geschlossener Form nicht direkt gelöst werden können. Zusätzlich führt die unterschiedliche Lage der Bewehrung über die Längsrichtung zu unter-

was determined over a length of about 250 mm at maximum load by the model. Further gauges were validated in [1].

Additionally, the proposed model was applied to determine the load bearing behaviour of folded plate sandwich panels under flexural loading. For the determination of theoretical moment-curvature relationships (cp. [1]), the folded plate cross-section was converted in a cross-section with area by area constant width, such as an inverted T-beam. In [1] the applicability of the proposed model was shown. For different pre-tensioning stresses, the load-deflection responses were found in very good agreement. The shear stiffness A of the core material was calculated based on [1] and [32]. In Fig. 20, the determined load-deflection response is shown for folded plate sandwich panels without prestressing and with prestressing of the facings. The cracking loads as well as maximum loads were determined in good agreement with the test results at midspan w_1 and at quarter points w_2 for the panel without prestressing. For the prestressed sandwich panel, the cracking load was slightly overestimated. The failure of the panels was predicted by cracking of the facings and small parts of debonding at the supports. The stresses in CFRP reinforcement were determined up to 2,600 MPa, which is close to the maximum capacity of CFRP strands. For short spans, the approach of transforming the folded plate

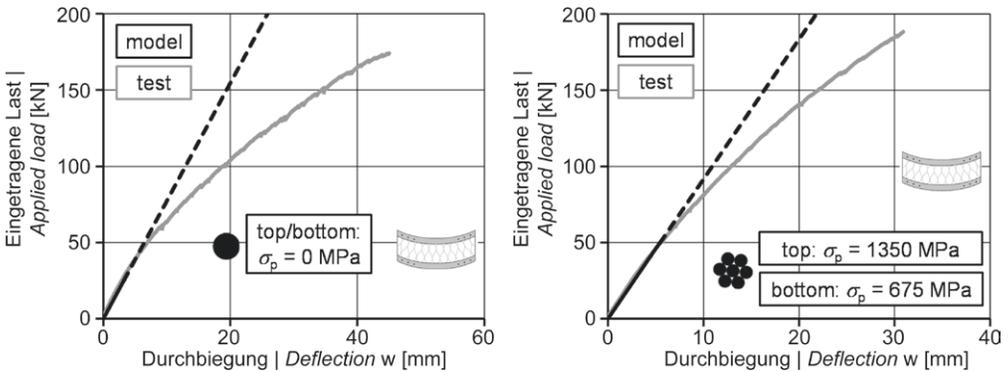


Bild 21: Abgeleitete linear-elastische Last-Durchbiegungs-Beziehungen gekrümmter Sandwichschalen und Versuchsergebnisse von doppelt gekrümmten Sandwichschalen ohne (links) und mit (rechts) Vorspannung | **Fig. 21:** Determined linear-elastic load-deflection response of curved sandwich panels and test results of doubly-curved sandwich panels without (left) and with (right) prestressing

schiedlichen Berechnungsquerschnitten mit z. B. unterschiedlichen Hebelarmen der inneren Kräfte. Da der Hebelarm über die gesamte Länge des Elements variiert, kann kein adäquater Ersatzquerschnitt für einen gemittelten Hebelarm ohne Überhöhung gefunden werden. Für die folgenden Anwendungen des analytischen Modelles wurde die Überhöhung deshalb vereinfachend vernachlässigt.

Wenn man die Sandwichtheorie anwendet, erhält man das linear-elastische Verhalten des Verbundquerschnitts. In Bild 21 ist der Vergleich der Versuchsergebnisse und des berechneten linear-elastischen Verhaltens für Sandwichträger ohne und mit Vorspannung der UHPFRC-Deckschichten dargestellt. Die Vorspannkraft wurde im Schwerpunkt der Deckschichten aufgebracht, was in etwa der resultierenden Position über die Gesamtlänge entspricht.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Berechnungsansatz eine gute Übereinstimmung für den linearen elastischen Bereich erzielt. Risse an den Deckschichten führen nach Erreichen der Zugfestigkeit zu einem nichtlinearen Verhalten. Ansätze zur Berücksichtigung der Rissbildung der UHPFRC-Deckschichten wurden nicht weiter berücksichtigt, da die Vernachlässigung der Überhöhung und die Idealisierung der gekrümmten Form auf einen Querschnitt mit flächenkonstanter Breite zu großen Abweichungen und Fehlern führen würde. Der Berechnungsaufwand

cross-section into an inversed T-beam showed satisfying results.

The proposed approaches to determine the load bearing behaviour of curved sandwich panels under flexural loading were verified. The camber in longitudinal direction of the doubly curved element leads to equations, which cannot be directly solved in closed form. Additionally, the varying position of reinforcement results in different cross-sections over the length, i.e. varying lever arm of inner forces, in case that the concrete tensile strength is taken into account. Since the lever arm varies over the full length of the element, no adequate approach of a mean lever arm for an element without camber can be found. For the following applications of analytical models, the camber in longitudinal direction was neglected.

Applying sandwich theory only, yields the linear elastic behaviour of the section. In Fig. 21, the comparison of test results and calculated linear elastic behaviour is shown for sandwich beams without and with prestressing of the UHPFRC facings. The prestressing force was applied at centroid of the facings, which is roughly the resultant position over the full length.

The results demonstrate, that the approach shows a good agreement for the linear elastic part. Cracking of the facings leads to a non-linear behaviour after reaching the maximum

für die Kombination der Sandwichtheorie mit Rissbildung von gekrümmten Deckschichten ist höher als bei der nichtlinearen Finite-Elemente-Modellierung. Daher wird vorgeschlagen, die abgeleiteten FE-Lösungen zu verwenden, um das Trag- und Verformungsverhalten von doppelt gekrümmten Sandwichelementen zu berechnen.

5 Zusammenfassung

In den beiden dreijährigen Forschungsprojekten HE 2637/16-1 und HE 2637/16-2 wurden vorgespannte Sandwichelemente mit gefalteter und doppelt gekrümmter Geometrie aus Hochleistungsmaterialien untersucht. Schritt für Schritt wurden verschiedene Materialien und die Kombination der Materialien und Komponenten analysiert. Zunächst wurden verschiedene Herstellmethoden erarbeitet. Insbesondere zu nennen sind das Vorspannen von CFK-Bewehrung, das Betonieren von räumlichen Querschnitten und das Fügen der ausgehärteten Deckschichten durch Aufschäumen mit Polyurethan. Verbundversuche an CFK-Bewehrung in HSC und UHPFRC sowie Kleinkörperversuche von Sandwichquerschnitten unter Zug- und Schubbelastung dienten als Grundlage für Untersuchungen an großformatigen Versuchskörpern mit ebenen, gefalteten und doppelt gekrümmten Querschnitten. Für jeden der Untersuchungsschritte wurden numerische und analytische Modelle abgeleitet, um die Lastübertragungsmechanismen weiter zu analysieren sowie Widerstände und zugehörige Verformungen der Sandwichelemente prognostizierbar zu machen.

Als Ergebnis wurde eine effiziente Methode zur Herstellung und Analyse von räumlichen Sandwichelementen vorgeschlagen. Die durch den Herstellprozess erzielte hohe Verbundqualität in Kombination mit erhöhten Tragfähigkeiten von räumlich geformten und vorgespannten Deckschichten ermöglicht weit spannende Dachkonstruktionen mit multifunktionalen Eigenschaften.

tensile strength. Approaches to account for cracking of UHPFRC facings during the analysis were not further considered, since neglecting of camber and idealisation of curved shape to a cross-section with area by area constant width would result in high error. The effort to combine sandwich theory with cracking of curved cross-sections is higher than using non-linear finite element modelling. Hence, it is proposed to use the derived finite element solutions to predict the overall structural performance of doubly curved sandwich panels.

5 Summary and conclusions

In the two three-year projects (HE 2637/16-1, HE 2637/16-2), prestressed sandwich panels with folded plate and doubly curved geometry made of high performance materials were investigated. Step-by-step, different materials and the interaction of materials and components were analysed. First of all, different production methods had to be developed. In particular, prestressing of CFRP, casting of spatially shaped cross-sections and joining the hardened facings to sandwich panels by foaming in pack with polyurethane. Bond tests of CFRP in HSC and UHPFRC as well as small-scale tests of sandwich sections under tensile and shear loading served as basis for investigations on large-scale specimens with flat, folded and doubly curved cross-sections. For each of the investigations steps, numerical and analytical models were developed to further analyse load transfer mechanisms and make loads and deformations of the sandwich panels predictable.

It can be concluded that an efficient method to establish and analyse load-bearing sandwich panels was proposed. The high bond quality achieved by the production process in combination with increased load capacities of spatially shaped and prestressed facings can lead to long-span roof structures that feature multifunctional properties.

In dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft für zwei Jahre geförderten Transferprojekt HE 2637/29-1 werden die Produktionsmethoden und verschiedenen konzeptionellen Ansätze in Zusammenarbeit mit Industriepartnern weiter untersucht, s. S. 714 ff. Es wird erwartet, dass mit diesem Projekt ein bau-praktischer Hintergrund für multifunktionale Sandwichelemente geschaffen wird.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198063016 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Stark, A.: Analysis of Prestressed Sandwich Panels with Ultra-High Performance Concrete Facings. Diss., RWTH Aachen University, 2017
- [2] Stark, A.; Kueres, D.; Hegger, J.: Sandwichelemente mit UHPC-Deckschichten und geschäumten PUR-Kernschichten. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), S. 816–827
- [3] Shams, A.; Stark, A.: Untersuchungen zum Verbundverhalten von Sandwichelementen mit Betondeckschichten und geschäumten Polyurethan-Kernschichten. Bauingenieur (2013) 10, S. 412–419
- [4] Shams, A.; Stark, A.; Hoogen, F.; Hegger, J.; Schneider, H.: Innovative sandwich structures made of high performance concrete and foamed polyurethane. Composite Structures 121 (2015), S. 271–279
- [5] DIN EN 206-1:2001-07: Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000.
- [6] DIN EN 196-1:2005-05: Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:2005.
- [7] DIN EN 12350-2:2009-08: Prüfung von Frischbeton – Teil 2: Setzmaß; Deutsche Fassung EN 12350-2:2009.
- [8] DIN EN 12350-8:2010-12: Prüfung von Frischbeton – Teil 8: Selbstverdichtender Beton – Setzfließversuch; Deutsche Fassung EN 12350-8:2010.
- [9] DIN EN 826:2013-05: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung; Deutsche Fassung EN 826:2013.

The production methods and different conceptual designs are further investigated in collaboration with industrial partners (precast plant, chemical company and CFRP producer) in the transfer project HE 2637/29-1 funded by the German Research Foundation for a duration of two years (compare p. 714 in this book). It is expected to provide a practical background for the multifunctional elements with this project.

Acknowledgement

The authors thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (no. 198063016) within the Priority Programme SPP 1542.

- [10] DIN EN 14509:2013-12: Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten – Werkmäßig hergestellte Produkte – Spezifikationen; Deutsche Fassung EN 14509:2013.
- [11] DIN EN 12090:2013-06: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des Verhaltens bei Scherbeanspruchung; Deutsche Fassung EN 12090:2013.
- [12] DIN EN 1607:2013-05: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene; Deutsche Fassung EN 1607:2013.
- [13] Stark, A.; Hegger, J.: Sandwichkonstruktionen mit dünnen Betondeckschichten. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 83–93
- [14] Stark, A.; Classen, M.; Knorrek, C.; Camps, B.; Hegger, J.: Sandwich panels with folded plate and doubly curved UHPFRC facings. Structural Concrete 19 (2018) 6, S. 1851–1961 – DOI: 10.1002/suco.201700288
- [15] American Concrete Institute (ACI, Hrsg.): ACI 440.4R-04: Prestressing concrete Structures with FRP Tendons. 2004 (2011)
- [16] Shams, A.: A Novel Approach for the Production and Design of Load-carrying Sandwich Panels with Reinforced Concrete Facings. Diss., RWTH Aachen University, 2015
- [17] Stark, A.; Hegger, J.: Verbundverhalten von CFK-Spannbewehrungen in UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 10, S. 701–710

- [18] Stark, A.; Perse, S.; Hegger, J.: Test on the Transfer Length of CFRP Tendons in UHPC. In: Fehling, E.; Middendorf, B.; Thiemicke, J. (Hrsg.): Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials – Proc. of HiPerMat 2016, 4th Int. Symp. on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Materials, 09.–11.03.2016 in Kassel, 2016, Book of Abstracts: S. 129–130, Langfassung auf CD-ROM
- [19] Int. Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM, Hrsg.): RC 6 TC9-RC: Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test. 1973, 2. Aufl. 1983
- [20] Bertram, G.: Zum Verbund- und Querkrafttragverhalten von Spannbetonträgern aus ultra-hochfestem Beton. Diss., RWTH Aachen University, 2012
- [21] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt, Hrsg.): Richtlinie für die Prüfung von Spannstählen auf ihre Eignung zur Verankerung durch sofortigen Verbund. 1980
- [22] Shams, A.; Horstmann, M.; Hegger, J.: Experimental investigations on textile-reinforced concrete (TRC) sandwich sections. *Composite Structures* 118 (2014), S. 643–653
- [23] Abaqus 6.14: Documentation. Dassault Systemes Simulia Corporation, 2014
- [24] Lubliner, J.; Oliver, J.; Oller, S.; Onate, E.: A plastic-damage model for concrete. *Int. Journal of solids and structures* 25 (1989) 3, S. 299–326
- [25] Lee, J.; Fenves, G.: Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of engineering mechanics* 124 (1998) 8, S. 892–900
- [26] Hillerborg, A.; Modéer, M.; Petersson, P.-E.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and concrete research* 6 (1976) 6, S. 773–781
- [27] Sargin, M.: Stress-strain relationships for concrete and the analysis of structural concrete sections. Buchreihe Solid Mechanics Division, University of Waterloo (Kanada), 1971
- [28] Fehling, E.; Schmidt, M.; Teichmann, T.; Bunje, K.; Bornemann, R.; Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung ultra-hochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht DFG FE 497/1-1, Universität Kassel, 2005
- [29] Speck, K.: Beton unter mehraxialer Beanspruchung – Ein Materialgesetz für Hochleistungsbetone unter Kurzzeitbelastung. Diss., TU Dresden, 2007
- [30] Kueres, D.; Stark, A.; Herbrand, M.; Classen, M.: Numerische Abbildung von Beton mit einem plastischen Schädigungsmodell – Grundlegende Untersuchungen zu Normalbeton und UHPC. *Bauingenieur* 90 (2015), S. 252–264
- [31] Horstmann, M.: Zum Tragverhalten von Sandwichkonstruktionen aus textilibewehrtem Beton. Diss., RWTH Aachen University, 2010
- [32] CEB-FIP fib Bulletin 40: FRP Reinforcement for RC Structures. Technical Report on the Design and Use of Fibre Reinforced Polymer Reinforcement (FRP) for Reinforced Concrete Structures. 2007
- [33] Stamm, K.; Witte, H.: Sandwichkonstruktionen – Berechnung, Fertigung, Ausführung. Wien · New York: Springer, 1974

Bildnachweise | Picture credits

Alle Bilder: Alexander Stark, Bilder 1–4, 6–21: [1], Bild 5: [3]; zumeist gegenüber der Originalquelle modifiziert. | All figures: Alexander Stark, pictures 1–4, 6–21: compare [1], picture 5: [3]; mostly modified compared to the original version.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Sandwichkonstruktionen aus dünnen gefalteten und gekrümmten Betondeckschichten

Sandwich constructions with thin folded and curved concrete layers

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger Professor und Institutsleiter Professor and head of institute
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	HE 2637/16-1/2 (Projektnummer Project number: 198063016)
Adresse Address:	RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
Kontakt Contact:	+49 241 80-25170 jhegger@imb.rwth-aachen.de www.imb.rwth-aachen.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Reporting/funding period: 07/2011–06/2017
Team Team:	Alexander Stark

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Stark, A.; Hegger, J.: Sandwich panels with thin folded and curved concrete layers. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 257–262
- Stark, A.; Hegger, J.: Bond behaviour of pre-tensioned CFRP tendons in UHPFRC. In: Barros J.; Sena-Cruz, J. (Hrsg.): 11th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures, 26.–28.06.2013 in Guimarães (Portugal), 2013, S. 125–126 (Kurzfassung), Langfassung auf CD-Rom: 8 S.
- Stark, A.; Hegger, J.: Development of CFRP pre-tensioned folded and curved shells made of UHPFRC. In: Obrebski, J.; Tarczewski, R. (Hrsg.): Beyond the limits of man – Proc. of IASS Symp. 2013, 23.–27.09.2013 in Breslau (Wrocław, Polen), 2013, S. 343 (Kurzfassung), Langfassung auf CD-Rom: 6 S.
- Stark, A.; Hegger, J.: CFRP Tendons in UHPFRC – Bond Behaviour and Application to Folded and Curved Shells. In: Toutlemonde, F.; Resplendino, J. (Hrsg.): Proc. of 2nd Int. Symp. on UHPFRC (UHPFRC'2013), 01.–03.10.2013 in Marseille (Frankreich), 2013, S. 335–342
- Stark, A.; Hegger, J.: Verbundverhalten von CFK-Spannbewehrungen in UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 10, S. 701–710
- Stark, A.; Shams, A.: Untersuchungen zum Verbundverhalten von Sandwichelementen mit Betondeckschichten und geschäumten Polyurethan-Kernschichten. Bauingenieur 88 (2013) 10, S. 412–419
- Stark, A.; Perse, S.: Innovative Sandwichkonstruktionen mit UHPC-Deckschichten. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DafStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07./08.11.2013 an der Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 71–76
- Hegger, J.; Chudoba, R.; Stark, A.; van der Woerd, J. D.: Leicht Bauen mit Beton – Origami-basierte Falwerke und vorgespannte Sandwich-Schalenträger | Concrete light – Origami-based folded structures and prestressed sandwich shell beams. BFT international 80 (2014) 2, S. 27–29 – Smart Concretes = Intelligente Betone – Proc. der 58. Ulmer Betontage, 18.–20.02.2014 in Neu-Ulm
- Stark, A.; Hegger, J.: Development of CFRP Pre-tensioned Sandwich Panels with Concrete Facings. In: El-Hacha, R. (Hrsg.): Proc. of CICE 2014 – 7th Int. Conf. on FRP in Civil Engineering, 20.–22.08.2014 in Vancouver (Kanada), 2014, S. 210 (Kurzfassung), Langfassung auf CD-Rom: 6 S.
- Stark, A.; Hegger, J.: Sandwichkonstruktionen mit dünnen Betondeckschichten. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 82–93
- Horstmann, M.; Shams, A.; Stark, A.: Sandwichkonstruktionen aus Textilbeton. In: Lehrstuhl und Institut für Massivbau der RWTH Aachen (Hrsg.): Massivbau im Wandel – Festschrift zum 60. Geburtstag von Josef Hegger, 2014, S. 603–614

- Chudoba, R.; Hegger, J.; Scholzen, A.; Sharei, E.; Stark, A.; Will, N.; van der Woerd, J.: Die Leichtigkeit des Betons – Dünnwandige Schalentragwerke aus hochleistungsfähigen zementartigen Verbundwerkstoffen. RWTH Themen – Bauingenieurwesen (2015) 2, S. 42–45
- Shams, A.; Stark, A.; Hoogen, F.; Hegger, J.; Schneider, H.: Innovative sandwich structures made of high performance concrete and foamed polyurethane. Composite Structures 121 (2015) 3, S. 271–279 – DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.11.026
- Kueres, D.; Stark, A.; Herbrand, M.; Classen, M.: Numerische Abbildung von Beton mit einem plastischen Schädigungsmodell – Grundlegende Untersuchungen zu Normalbeton und UHPC. Bauingenieur 90 (2015) 6, S. 252–264
- Hegger, J.; Herbrand, M.; Stark, A.; Classen, M.: Betonbau der Zukunft: leicht, filigran und nachhaltig. Bauingenieur 90 (2015) 7/8, S. 337–344
- Hegger, J.; Chudoba, R.; Will, N.; Classen, C.; Rempel, S.; Stark, A.; van der Woerd, J.: Bauen mit Betonfertigteilen. RWTH Themen – Production Engineering (2016) 1, S. 26–31
- Herbrand, M.; Kueres, D.; Stark, A.; Classen, M.: Numerische Simulation von balken- und plattenförmigen Bauteilen aus Stahlbeton und UHPC mit einem plastischen Schädigungsmodell. Bauingenieur 91 (2016) 2, S. 46–56
- Stark, A.; Classen, M.: Prestressed Sandwich Beams with UHPC Layers. In: Proc. of 1st Int. Interactive Symp. on UHPC, 18.–20.07.2016 in Des Moines (Iowa, USA), 2016, publ. auf USB-Stick: 10 S. – <http://dx.doi.org/10.21838/uhpc.2016.17>
- Stark, A.; Perse, S.; Hegger, J.: Test on the Transfer Length of CFRP Tendons in UHPC. In: Fehling, E.; Middendorf, B.; Thiemicke, J. (Hrsg.): Proc. of HiPerMat 2016, 4th Int. Symp. on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials, 09.–11.03.2016 in Kassel, Kassel: kassel university press, 2016, S. 129–130 (Kurzfassung), Langfassung auf USB-Stick: 8 S.
- Stark, A.; Kueres, D.; Hegger, J.: Sandwichelemente mit UHPC-Deckschichten und geschäumten PUR-Kernschichten. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 816–827
- Kueres, S.; Stark, A. P.; Will, N.; Hegger, J.: Development of a modular footbridge system with pre-tensioned CFRP reinforcement. In: Sriharan, S.; Graybeal, B.; Wille, K. (Hrsg.): Engineering the Future – Proc. of 39th IABSE Symp., 21.–23.09.2017 in Vancouver (Kanada), 2017
- Hegger, J.; Curbach, M.; Stark, A.; Wilhelm, S.; Farwig, K.: Innovative design concepts: Application of textile reinforced concrete to shell structures. Structural Concrete 19 (2018), S. 637–646 – DOI: 10.1002/suco.201700157
- Stark, A.; Classen, M.; Knorrek, C.; Camps, B.; Hegger, J.: Sandwich panels with folded plate and doubly curved UHPFRC facings. Structural Concrete 19 (2018) 6, S. 1851–1861 – <https://doi.org/10.1002/suco.201700288>
- Stark, A.; Classen, M.; Hegger, J.: Bond Behaviour of CFRP Tendons in UHPFRC. Engineering Structures 178 (2019) 1, S. 148–161 – DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.002

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Stark, A.: Analysis of Prestressed Sandwich Panels with Ultra-High Performance Concrete Facings. 2017

Bachelorarbeiten | Bachelor's Theses

- Richter, P.: Experimentelle Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von vorgespannten Sandwichträgern. 2014
- Berwing, J.: Untersuchungen zum Verbundverhalten von Sandwichkonstruktionen mit Betondeckschichten. 2015
- Jung, V.: Experimentelle Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von vorgespannten Sandwichschalenträgern. 2017

Matarbeiten | Master's Theses

- Perse, S.: Experimentelle und theoretische Verbunduntersuchungen an Sandwichkonstruktionen aus UHPC und PUR. 2013
- Dawo, P.: Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von mit CFK vorgespannten Sandwichträgern aus UHPC und PUR. 2015
- Petzold, S.: Untersuchungen zum Tragverhalten von Bauteilen aus Hochleistungsbeton mit CFK-Bewehrungen. 2015

- Knorrek, C.: Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Sandwich-Schalenträgern aus UHPC und PUR mit Vorspannung aus CFK. 2016
- Camps, B.: Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von vorgespannten Sandwichträgern mit UHPC-Deckschichten. 2017

Folgeprojekt | Follow-up project

- Gefaltete und gekrümmte Sandwichbauteile aus Hochleistungswerkstoffen für weitgespannte Dachelemente | Folded and curved sandwich panels made of high performance materials for long-span roof construction

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Erkenntnistransfer-Projekt Knowledge Transfer Project
Laufzeit Period:	11/2017–10/2019

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation und Ausrichtung des Treffens der SPP-Arbeitsgruppe „Modellierung“ in Aachen am 22.04.2015 | Organisation of the meeting of the SPP work group “Modelling” in Aachen, 22.04.2015
- Organisation und Ausrichtung des 6. Jahrestreffens des SPP 1542 in Aachen, 04.–06.10.2016 | Organisation of the annual meeting of SPP 1542, 04.–06.10.2016 in Aachen

Untersuchungen zu Trageigenschaften von plattenförmigen Betonleichtbauelementen in Kreuz-Kanal-Technologie | Investigations into the load-bearing properties of slab-shaped lightweight concrete elements in CC technology

► Wolfram Jäger

► Fakultät Architektur, Lehrstuhl Tragwerksplanung, TU Dresden

1 Motivation und Ziel

Die Herstellung von Stahlbeton erfordert einen hohen Energie- und Ressourceneinsatz, vor allem im Bereich der Zement- und Stahlproduktion. Stahlbetonbauteile sind gekennzeichnet durch hohe Traglasten, aber auch durch hohe Eigengewichte. Bei Beanspruchung auf Biegung wird Beton eigentlich nur im Bereich der Druckzone und zum Schutz der Bewehrung in der Zugzone benötigt. Dem können sich bisher platten- oder scheibenförmige Bauteile nicht anpassen. Der Beton wird über den gesamten Querschnitt eingesetzt. Natürlich wird er dabei auch zur Übertragung der Schubkräfte zwischen Druck- und Zugzone benötigt. Setzt man ihn über den vollen Querschnitt ein, bringt er einen hohen Anteil an Eigenlast in das Tragmodell ein und damit wird ein Teil der Tragfähigkeit durch die Eigenlast aufgebraucht.

Ziel des Projektes war die Reduzierung des Eigengewichts tragfähiger Betonbauteile durch den Einbau von Hohlräumen in orthogonaler Anordnung (*Cross-Channel-Verfahren* [1], [2]). Durch die kreuzweise Anordnung der Hohlräume entsteht eine neuartige, erleichterte Tragstruktur bestehend aus zwei Schalen, die am Kreuzungspunkt der Hohlräume miteinander verbunden sind. Die entstehende Tragstruktur folgt der Bauteilbeanspruchung.

1 Motivation and goal

The production of reinforced concrete requires a high input of energy and resources, especially in the area of cement and steel production. Reinforced concrete components are characterised by high load-bearing capacities but also by high dead weights. When stressed in bending, concrete is actually only needed in the compression zone and to protect the reinforcement in the tension zone. Until now, slab or wall-shaped components have not been able to adapt to this. The concrete is used over the entire cross-section. Of course, it is also needed to transmit the shear forces between the compression and tension zones. If it is used over the full cross-section, it introduces a high proportion of dead load into the load-bearing model and thus part of the load-bearing capacity is used up by the dead load.

The goal of the project was to reduce the dead weight of load-bearing concrete components by installing cavities in an orthogonal arrangement (*cross-channel method* [1], [2]). The crosswise arrangement of the cavities creates a novel, lightened load-bearing structure consisting of two shells connected at the intersection of the cavities. The resulting load-bearing structure follows the component stress.

Die Vorteile der Gewichtsreduzierung von Deckenplatten durch den Einbau von Hohlräumen wurden schon vor langer Zeit erkannt. Das Prinzip der Hohldeckenplatten realisiert die Gewichtsminderung durch in Spannrichtung verlaufende Hohlräume [3]. Als zweiachsig gespanntes Hohlraumssystem existiert seit längerem eine einzige Deckenart, und zwar die der Fa. Cobiax [4]. Hier werden die Hohlräume in Kugelform realisiert.

Um die Effizienz der zweiachsigen Lastabtragung im Bereich der Hohlraumdecken in größerem Maßstab nutzen zu können, war die Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens, eine neue Form der Hohlraumdecke mit Lastabtrag in beiden Richtungen – die sogenannte „Kreuzkanaldecke“ – zu entwickeln. Diese Deckenart ist geprägt von linienförmigen, in beiden Achsrichtungen orthogonal zueinander verlaufenden Hohlräumen bzw. Kanälen. Die Decke besteht somit nur noch aus einer oberen und einer unteren Schale, die zwischen den Röhren miteinander verbunden sind. Die Schalen können jeweils in den Außenflächen bewehrt werden. Die Schubkraftübertragung erfolgt über die sich dazwischen bildenden Stempel/Höcker. Zu forschen war dazu aus betontechnischer, statischer und technologischer Sicht.

Da es sich bei dem Projekt um eine bisher nicht verfolgte Entwicklung handelt, sind keine eigentlichen Forschungsarbeiten dazu bekannt. Es wird lediglich auf den Stand der Technik in den genannten Schwerpunkten zurückgegriffen, um die Aufgabe zu lösen.

2 Entwicklungsschritte

2.1 Ansätze zu den Einflussparametern

2.1.1 Material Beton

Die Beanspruchbarkeit von Beton lässt sich zutreffend in der klassischen Versagenshypothese von Rankine, Lamé, Navier mit dem Kriterium der maximalen Hauptspannung beschreiben, d. h. das Bauteil versagt aufgrund der größten

The advantages of reducing the weight of ceiling plates by installing cavities were recognised a long time ago. The principle of the hollow core slabs realises the weight reduction through cavities running in the span direction [3]. As a biaxial spanned cavity system, one single type of ceiling has existed for some time, namely that of the Cobiax company [4]. Here, the cavities are realised in a spherical shape.

In order to be able to use the efficiency of biaxial load transfer in the area of hollow floor slabs on a larger scale, the task of the research project was to develop a new form of hollow slabs with load transfer in both directions – the so-called “cross-channel floor plate”. This type of ceiling is characterised by linear hollow spaces or channels running orthogonally to each other in both axial directions. The ceiling thus consists only of an upper and a lower shell, which are connected to each other between the tubes. The shells can each be reinforced in the outer surfaces. The thrust force is transmitted via the punches/humps that form in between them. The research had to be carried out from a concrete engineering, static and technological point of view.

Due to the fact the project is a development that has not been pursued before, no actual research work on it is known. Only the state of the art in the aforementioned focal points is used to solve the task.

2 Development steps

2.1 Approaches to the influencing parameters

2.1.1 Concrete material

The stressability of concrete can be correctly described in the classical failure hypothesis of Rankine, Lamé, Navier with the criterion of the maximum principal stress, i.e. the component fails due to the largest principal (tensile) stress σ_1 . However, the principal stress hypothesis does not take into account the influence of the other two principal stresses σ_2 and σ_3 ; stress and stressability are only considered unidimen-

Haupt(zug)spannung σ_1 . Die Hauptspannungshypothese berücksichtigt allerdings nicht den Einfluss der anderen beiden Hauptspannungen σ_2 und σ_3 ; Beanspruchung und Beanspruchbarkeit werden hier nur eindimensional betrachtet, man vergleicht die größte Hauptzugspannung mit einem festen zulässigen Grenzwert. Für die Abschätzung des Einflusses der Betoneigenschaften reichte dieser Ansatz aus.

2.1.2 Statisches System

In der Praxis werden aufgrund der Effizienz in der Regel Durchlaufsysteme realisiert, die Spannweiten für reine Flachdecken liegen im Anwendungsbereich Wohnen/Büro bei maximal ca. 6,0 m. Im Bereich der Linienlagerung ist immer eine mehr oder weniger große Einspannung der Deckenplatte (vertikale Lasten bzw. Durchlaufwirkung) anzusetzen. Eine annähernd gelenkige Lagerung kommt nur beim Flachdach (Einfeldplatte bzw. Außenfeld) vor. Somit fiel die Wahl des anzusetzenden statischen Systems – aufgrund der Häufigkeit in der praktischen Umsetzung – auf eine vierseitig eingespannte Deckenplatte.

2.1.3 Querschnitt

Das Gesamtträgheitsmoment 2. Grades der Kreuzkanalplatte setzt sich aus den Eigenträgheitsmomenten der Schnitte durch die Längs- (I_{y2}) und Querröhre (I_{y1}), multipliziert mit dem jeweiligen Längen- oder Flächen- oder Volumenanteil, zusammen und lässt sich leicht ermitteln (siehe auch Bild 1).

2.1.4 Schubspannungen

Der Nettoflächenanteil bzw. der Lochflächenanteil stehen in direktem Zusammenhang mit der maximalen Schubspannung im Bereich der Fuge der Plattenhälften. Der Nettovolumenanteil bzw. der Lochvolumenanteil stehen weiter in direktem Zusammenhang mit dem Eigengewicht der Deckenkonstruktion. Somit geben Nettoanteil und Lochanteil Auskunft über Beanspruchung bzw. die Beanspruchbarkeit der Deckenkonstruktion.

sionally here, the largest principal tensile stress is compared with a fixed permissible limit value. This approach was sufficient to estimate the influence of the concrete properties.

2.1.2 Static system

In practice, due to their efficiency, continuous systems are usually realised; the spans for pure flat floor plates are a maximum of approximately 6.0 m in the residential/office application area. In the area of line bearing, a more or less large fixing of the ceiling slab (vertical loads or continuous action) must always be applied. An almost articulated bearing only occurs in the case of the flat roof (single span slab or outer span). Thus, the choice of the structural system to be applied – due to the frequency in practical implementation – was made in favour of a ceiling slab that is clamped on all four sides.

2.1.3 Cross-section

The total moment of inertia of 2nd degree of the cross channel plate is composed of the moments of inertia of the sections through the longitudinal (I_{y2}) and transverse tube (I_{y1}), multiplied by the respective length or area or volume share and can be easily determined (see also Fig. 1).

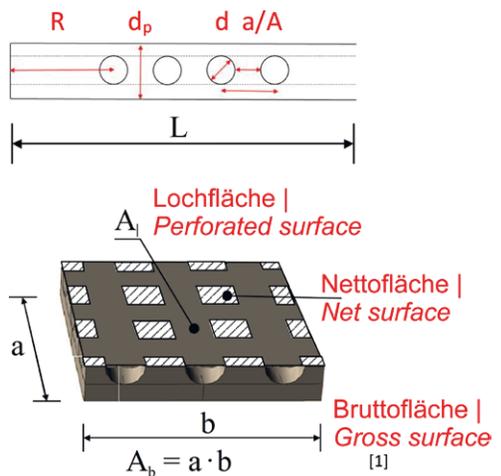


Bild 1: Bezeichnungen an der Kreuzkanalplatte; Querschnitt und Isometrie | Fig. 1: Designations on the cross channel plate; cross section and isometry

2.1.5 Biegespannungen

Bei Betrachtung der Biegespannung ist der vertikale Schnitt durch die Längsröhre maßgebend, hier sind die wirksamen Flächen für die Biegebeanspruchung am kleinsten. Das Verhältnis Plattendicke zu Zylinderdurchmesser (vertikaler Nettoflächenanteil bzw. vertikaler Lochflächenanteil) steht in direktem Zusammenhang mit der Biegespannung. Das Eigengewicht der Deckenkonstruktion wird wiederum durch Nettovolumenanteil bzw. Lochvolumenanteil determiniert. Auch in Bezug auf die Biegebeanspruchung geben Nettoanteil und Lochanteil Auskunft über die äußere und die innere Beanspruchung der Deckenkonstruktion.

2.1.6 Abschätzung der Beanspruchung und Optimierung

Zur Abschätzung der Größenordnung der Beanspruchung wurde exemplarisch eine quadratische, vierseitig eingespannte Platte mit einer Spannweite von 6,12 m untersucht. Variiert wurden die Deckenstärke von 15 bis 30 cm sowie der lichte Röhrenabstand von 5 bis 30 cm, zusätzlich wurde für jede Deckenstärke die jeweilige Massivdecke gerechnet.

Die Berechnungen wurden mit der FEM-Software ANSYS in der Version 14.0 unter Ansatz eines linearen Materialgesetzes durchgeführt.

Die Spannungsspitzen traten bei den Berechnungen an drei Orten auf: Auflagernähe Deckenoberseite, Feldmitte Deckenunterseite, äußerste Röhre. Die Peaks im Bereich der Deckenoberseite bzw. -unterseite sind unkritisch, weil dort eine Bewehrung aus Betonstahlmatten eingelegt wird. Die Spannungsspitzen im Bereich der äußersten Röhre erweisen sich wegen der Randausbildung als problematisch.

Im Bereich der Auflager der vierseitig eingespannten Platte treten hohe Schnittkräfte aus Moment und Querkraft auf, im Feldbereich dagegen nur niedrige Schnittkräfte aus Moment und Querkraft. Die hohen Schnittkräfte in Auflagernähe äußern sich in den hohen Spannun-

2.1.4 Shear stresses

The net surface share or the perforated surface share are directly related to the maximum shear stress in the area of the joint of the panel halves. The net volume share or the perforated volume share are also directly related to the dead weight of the ceiling construction. Thus, the net share and the perforated share provide information about the load and the load-bearing capacity of the ceiling construction.

2.1.5 Bending stresses

When considering the bending stress, the vertical section through the longitudinal tube is decisive; the effective surfaces for the bending stress are smallest here. The ratio of slab thickness to the cylinder diameter (vertical net surface proportion or vertical perforated area proportion) is directly related to the bending stress. The dead weight of the ceiling construction is in turn determined by the net volume share or perforated volume share. Also with regard to the bending stress, the net share and perforation share provide information on the external and internal stress on the ceiling construction.

2.1.6 Estimation of the stress and optimisation

In order to estimate the magnitude of the stress, a square, four-sided clamped slab with a span of 6.12 m was examined as an example. The slab thickness was varied from 15 cm to 30 cm and the clear tube spacing from 5 cm to 30 cm; in addition, the respective solid slab was calculated for each slab thickness.

The calculations were performed with the FEM software ANSYS in version 14.0 using a linear material law.

The stress peaks occurred at three locations during the calculations: support near top of slab, centre of field bottom of slab, outermost tube. The peaks in the area of the top or bottom of the slab are not critical because a reinforcement made of reinforcing steel mesh is inserted

gen. Zur Reduzierung dieser Spannungen bleibt nur die Möglichkeit, den bestehenden Schnittkräften größere Schnittflächen zur Verfügung zu stellen. Dies wird durch das Weglassen einzelner Röhren im Auflagerbereich erreicht.

Des Weiteren war die Form der Hohlräume für das gesteckte Ziel der Gewichtsminimierung zu bestimmen. Dazu wurden vereinfachend die beiden Lastfälle „reiner Schub“ (momentenfrei) und „reine Biegung“ (querkraftfrei) mit dem Ziel betrachtet, das Hohlraumvolumen zu maximieren und damit das Eigengewicht zu reduzieren.

Zur Zielerreichung muss in beiden Lastfällen eine Minimierung des Eigengewichts und eine Minimierung der Beanspruchung angestrebt werden. Das Eigengewicht wird durch das Hohlraumvolumen bestimmt, womit das Hohlraumvolumen zu maximieren ist.

Die innere Beanspruchung, d. h. die Spannung, wird durch die Schnittkräfte und die zugehörigen Schnittflächen bestimmt. Die Schnittkräfte resultieren aus den äußeren Lasten und sind somit unveränderlich, die Schnittflächen hingegen können durch die Hohlraumform verändert werden.

Weil die Lastfälle *Schub* und *Biegung* parallel auftreten und in Bezug auf die praktische Umsetzbarkeit hat sich die Kreisform als am besten geeignet herausgestellt.

2.1.7 Materialspezifikation zum Beton

Im Vorfeld ließen sich folgende Anforderungen an den Beton definieren:

- Aus wirtschaftlichen Gründen sollte auf Standardbeton C30/37, C35/45 oder evtl. C40/50 zurückgegriffen werden.
- Die Feingliedrigkeit der Geometrie erfordert für den Einbau und die Verdichtung einen selbstverdichtenden oder zumindest einen leicht verdichtbaren Beton mit einem Größtkorn von max. 8 bzw. 16 mm (1/3 von 5 cm).
- Um einen Beitrag zur Ressourcenschonung zu leisten, benötigt man einen Beton mit geringem Anteil an PZ-Klinker, z. B. einen mit

there. The stress peaks in the area of the outermost tubes prove to be problematic because of the edge formation.

In the area of the support of the four-sided clamped slab, high cutting forces from the moment and shear force occur, whereas in the field area only low cutting forces from the moment and shear force occur. The high cutting forces near the supports are reflected in the high stresses. In order to reduce these stresses, the only option is to provide larger cutting surfaces for the existing cutting forces. This is achieved by omitting individual tubes in the support area.

Furthermore, the shape of the cavities had to be determined for the set goal of minimising the weight. For this purpose, the two load cases “pure shear” (moment-free) and “pure bending” (shear force-free) were considered with the goal of maximising the cavity volume and thus reducing the dead weight.

In order to achieve the goal, a minimisation of the dead weight and a minimisation of the stress must be aimed for in both load cases. The dead weight is determined by the cavity volume, which means that the cavity volume is to be maximised.

The internal stress, i.e. the strain is determined by the cutting forces and the associated cutting surfaces. The cutting forces result from the external loads and are therefore unchangeable, the cutting surfaces, on the other hand, can be changed by the shape of the cavity.

The circular shape has turned out to be the most suitable due to the fact the load cases *shear* and *bending* occur in parallel and in terms of the practical feasibility.

2.1.7 Material specification for concrete

It was possible to define the following requirements for the concrete in advance:

- Standard concrete C30/37, C35/45, or possibly C40/50 should be used for economic reasons.

CEM-IIIa mit Hüttensand als Zementersatzstoff hergestellt.

- Die inneren Beanspruchungen durch Zugspannungen erfordern im Bereich der Stempel/Höcker (Verbindung zwischen Oberschale und Unterschale) der äußeren Röhren einen Beton mit höherer Zugfestigkeit. Dies lässt sich z. B. durch den Einsatz von Stahlfasern realisieren.

2.2 Parameterstudie

Das Ziel der durchgeführten Parameterstudie war die Minimierung des Eigengewichts bei gleichzeitiger Minimierung der inneren Beanspruchungen. Sie wurde mit ANSYS Version 14.0 durchgeführt (Bild 2). Die Berechnungen erfolgten unter Annahme eines linearen Verlaufs der Spannungs-Dehnungs-Linie sowohl im Druck- als auch im Zugbereich. Die Vernetzung der Geometrie erfolgte mit einheitlicher Elementgröße. Es waren insgesamt ca. 550 Rechnungsdurchläufe am Hochleistungsrechenzentrum der TU Dresden erforderlich.

Die zu variierenden Parameter bestimmen einerseits die Geometrie der Deckenplatte und andererseits das Materialverhalten (E-Moduln). Die äußere Last in Form der Verkehrslast wurde für die Gebäudekategorien *Büro*, *Wohnen* gewählt und nicht variiert, auch der E-Modul des Deckenbetons wurde einheitlich mit 30.000 MPa festgelegt. Über den E-Modul Wand sollten unterschiedliche Auflagersituationen (Einspanngrade), Wandmaterialien und Wandlängen modelliert werden. Der Randabstand

- The fineness of the geometry requires self-compacting or at least easily compactable concrete with a maximum grain size of 8 or 16 mm (1/3 of 5 cm) for placing and compaction.
- In order to make a contribution towards the conservation of resources, a concrete with a low proportion of Portland cement clinker is required, e.g. produced with a granulated blastfurnace slag as cement replacement material.
- The internal stresses due to tensile stresses require concrete with higher tensile strength in the area of the punches/humps (connection between upper and lower shell) of the outer tubes. This can be achieved, for instance, through the use of steel fibres.

2.2 Parameter study

The goal of the parameter study conducted was to minimise the dead weight while simultaneously minimising the internal stresses. It was conducted using ANSYS version 14.0 (Fig. 2). The calculations were performed assuming a linear progression of the stress-strain line, both in terms of the compression range and also in the tension range. The meshing of the geometry was performed using a uniform element size, a total of approximately 550 calculation runs were required at the high-performance computing centre of the TU Dresden.

The parameters to be varied determine the geometry of the ceiling slab and the material behaviour (elastic moduli). The external load in the form of the imposed load was chosen for the building categories *office*, *residential* and was not varied; the modulus of elasticity of the floor concrete was also set uniformly at 30,000 MPa. The elastic modulus for the wall should be used to model different support situations (degrees of restraint), wall materials and wall lengths. The edge distance of the longitudinal tubes was set in relation to the span and increased in 5% steps up to the solid slab design. Table 1 provides an overview of the parameters.

The minimum possible clear tube spacing was set at 5 cm for concreting reasons. The cover-

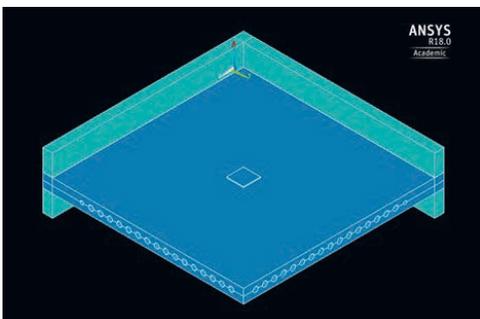


Bild 2: FEM-Modell – ¼-Ausschnitt der Platte | Fig. 2: FEM model – ¼ section of the slab

Variierende Spannweite Varying span [m]	Weitere Geometriewerte Further geometry values	Einspanngrad am Linienlager (E-Modul Wand) Restraint intensity at the line bearing (elastic modulus wall) [MPa]
3,12	<ul style="list-style-type: none"> ■ Deckenstärke Ceiling thickness [cm]: 16, 18, 20 ■ Ø Röhren Tubes [cm]: 6, 8, 10 ■ Lichter Röhrenabstand Clear tube spacing [cm]: 5, 8, 10 ■ Randabstand Längsröhren Edge distance longitudinal tubes [% Spannweite Span]: 5...50 	5.000
4,12		5.000
5,12		5.000
6,12		1.000, 5.000, 30.000
7,12		5.000

Tabelle 1: Parametervariation bei konstanter Verkehrslast von 3,0 kN/m² | **Table 1:** Parameter variation with a constant imposed load of 3.0 kN/m²

der Längsröhren wurde in Relation zur Spannweite gesetzt und in 5-%-Schritten bis zur Ausführung „Massivdecke“ erhöht. Eine Übersicht über die Parameter bietet Tabelle 1.

Der minimale lichte Röhrenabstand wurde aus Gründen der Betonierbarkeit mit 5 cm festgelegt. Die Überdeckung der Röhren betrug ebenfalls 5 cm, um konventionelle Betonstahlbewehrung einsetzen zu können. Somit besteht zwischen Röhrendurchmesser und Deckenstärke durchgängig eine Differenz von 10 cm. Es zeigte sich, dass Einsparpotential an Nettovolumen/Eigengewicht bei gleichbleibender innerer Beanspruchung durch die Wahl des optimalen Randabstandes der äußeren Röhren beeinflusst wird. Je größer die Deckenstärke, desto größer das relative Einsparpotential.

In Bild 3 ist die „Auswertung Spannweiten“ für die Deckenstärken 16, 18 und 20 cm dargestellt, ergänzt um die Flächen mit den größten Gewichtsreduktionen für die jeweilige Deckenstärke und den jeweiligen lichten Röhrenabstand. Dabei lässt sich für die jeweilige Kombination aus äußerer (V_{netto}) und innerer ($\sigma_1 = S1$) Beanspruchung die ideale Geometrievariante ablesen.

Im Rahmen der Parameterstudie wurde weiterhin der Einfluss des Randabstandes der äußeren Röhren untersucht. Das Optimum lag dabei bei 10 % der Spannweite. Die Werte lagen bei einer Randstreifenbreite zwischen 7,5 % und 17,5 % der Spannweite; somit besteht ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen dem Randabstand der äußeren Röhren und der Optimierung

ing of the tubes was set at 5 cm to allow the use of conventional reinforcing steel. Thus, there is a difference of 10 cm between the tube diameter and the ceiling thickness throughout. It was shown that potential savings in net volume/dead weight with no change in internal stress are influenced by the choice of the optimum edge distance of the outer tubes. The greater the ceiling thickness, the greater the relative savings potential.

In Fig. 3, the evaluation of spans for the ceiling thicknesses 16, 18 and 20 cm supplemented by the areas with the largest weight reductions for the respective slab thickness and the respective clear tube spacing can be seen. The ideal geometry variant can be read off for the respective combination of external (V_{netto}) and internal ($\sigma_1 = S1$) stress.

Within the framework of the parameter study, the influence of the edge distance of the outer tubes was also investigated. The optimum level here was 10% of the span. The values were between 7.5% and 17.5% of the span for an edge strip width; thus, there is a fundamental relationship between the edge distance of the outer tubes and the optimisation of the ratio of action from the dead weight (V_{netto}) and internal (σ_1) stress. By arranging the outer longitudinal tube at the optimum distance, a large reduction in the stresses can be achieved with a small increase in dead weight (V_{netto}). In the transition from the solid slab to the optimised cross channel slab, a large reduction in dead weight (V_{netto}) is offset by only a small increase in the stresses.

des Verhältnisses aus Einwirkung aus Eigengewicht (V_{netto}) und innerer (σ_1) Beanspruchung. Durch die Anordnung der äußeren Längsröhre im optimalen Abstand kann bei kleiner Zunahme des Eigengewichtes (V_{netto}) eine große Reduktion der Spannungen erreicht werden. Beim Übergang von der Massivplatte zur optimierten Kreuzkanalplatte steht einer großen Reduzierung des Eigengewichtes (V_{netto}) eine nur geringe Steigerung der Spannungen gegenüber.

Aus dem Datenpool von ca. 550 Berechnungen wurde für drei verschiedene Betonsorten die jeweils leichteste Variante für jede Spannweite

From the data pool of approximately 550 calculations, the lightest variant for each span was filtered out for three different types of concrete, taking into account the respective tensile strength of concrete according to Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-1:2001-01; Table 3.1: 5% quantile values $f_{\text{ctk};0,05}$; see Table 2). The main tensile stresses σ_1 are local stress peaks, these are only critical if they occur in the area of the punches/humps of the outer tubes (unreinforced concrete).

The partial safety factor remains unconsidered – as in the entire considerations. The verifica-

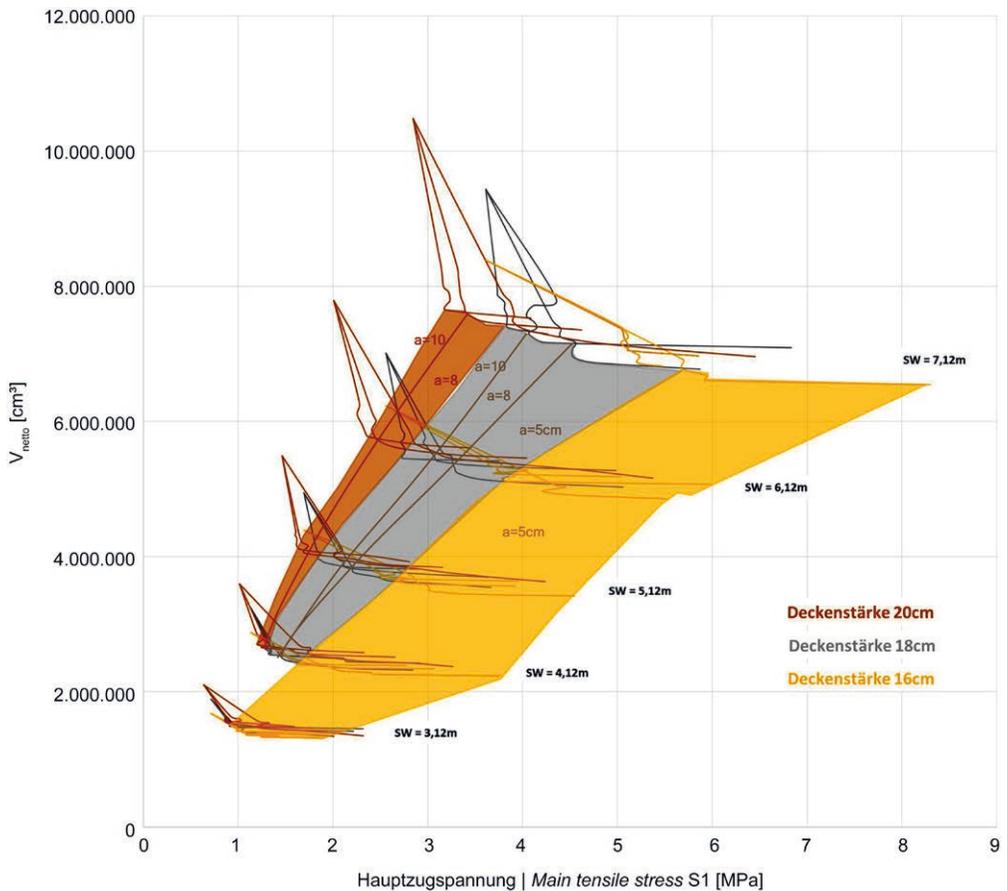


Bild 3: Vorbemessung – maximale Gewichtsreduktion in Abhängigkeit von der Spannweite (E-Modul Wand: 5.000 MPa, E-Modul Decke: 30.000 MPa, Röhren-Ø: 10 cm, weitere Parameter entsprechend Tabelle 1) | **Fig. 3:** Pre-dimensioning – maximum weight reduction depending on the span (elastic modulus wall: 5,000 MPa, elastic modulus ceiling: 30,000 MPa, Ø tube: 10 cm, further parameters according to Table 1)

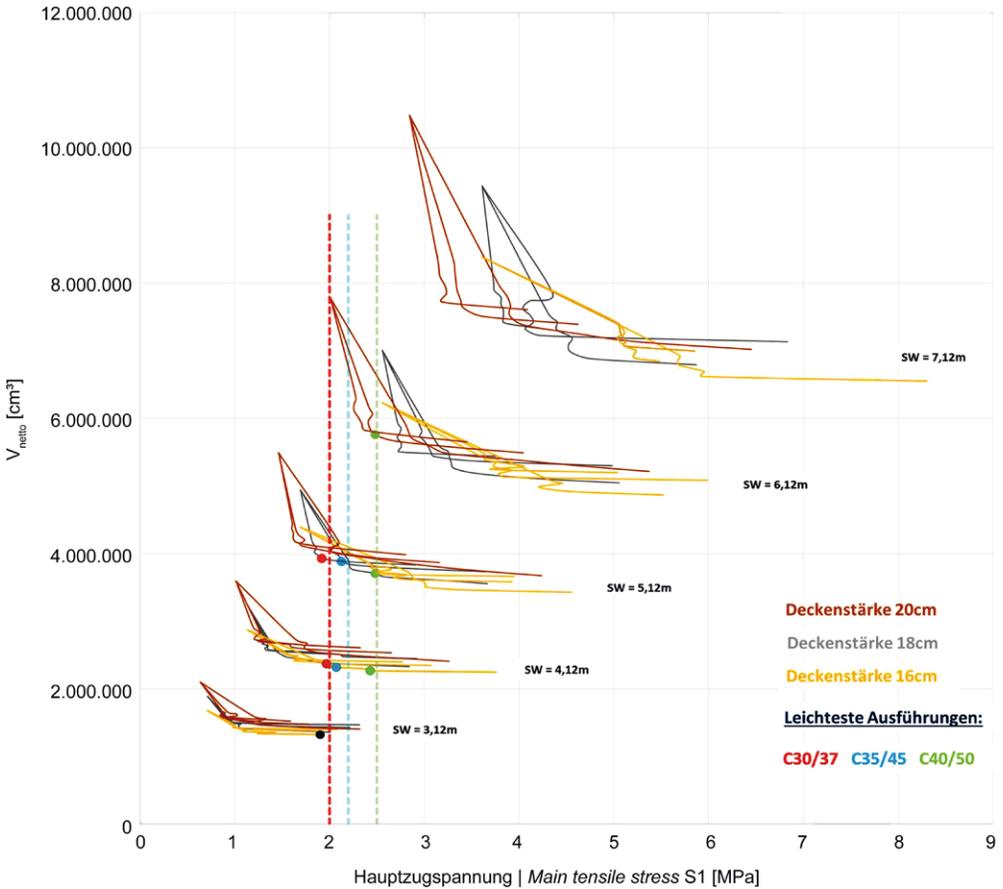


Bild 4: Vorbemessung – Auswertung unter Berücksichtigung der charakteristischen Zugfestigkeit des Betons (E-Modul Wand: 5.000 MPa, E-Modul Decke: 30.000 MPa, Röhren-Ø: 10 cm, weitere Parameter entsprechend Tabelle 1) | **Fig. 4:** Pre-dimensioning – evaluation considering the characteristic tensile strength of the concrete (elastic modulus wall: 5,000 MPa, elastic modulus ceiling: 30,000 MPa, Ø tube: 10 cm, further parameters according to Table 1)

te unter Berücksichtigung der jeweiligen Zugfestigkeit von Beton nach Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-1:2001-01; Tabelle 3.1: 5-%-Quantilwerte $f_{ctk;0,05}$) ausgefiltert (Tabelle 2). Bei den Hauptzugspannungen σ_1 handelt es sich um lokale Spannungspikes, diese sind nur bei einem Auftreten im Bereich der Stempel/Höcker der äußeren Röhren kritisch (unbewehrter Beton).

Der Teilsicherheitsbeiwert bleibt – wie in den gesamten Betrachtungen – unberücksichtigt. Die Nachweisführung in der Anwendung hat nach DIN EN 1992-1-1 [5], [8] und DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [6] zu erfolgen.

tion in the application must be applied in accordance with with DIN EN 1992-1-1 [5], [8] and the guideline „Stahlfaserbeton“ (steel fibre concrete) of the DAfStb (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – German Committee for Reinforced Concrete) [6].

In Fig. 4, the previously filtered lightest variants (points) were entered with the respective tensile strengths of the concrete types (vertical dashed lines). The points are each just to the left of the tensile strengths on the lowest (“lightest”) line of the respective span. Up to a span of 5 m, a slab concrete of quality C30/37 is sufficient to

Spannweite Span [m]	V _{netto} [cm ³]	Randabstand Edge distance [% Spannweite Span]	Deckenstärke Ceiling thickness [cm]	Ø Röhren Ø tubes [cm]	Lichter Röhrenabstand Clear tube spacing [cm]	S1 [MPa]
Beton Concrete C30/37						
3,12	1.318.114	7,5	16	6	5	1,901
4,12	2.367.962	17,5	16	6	5	1,963
5,12	3.910.237	10,0	18	8	10	1,917
Beton Concrete C35/45						
3,12	1.318.114	7,5	16	6	5	1,901
4,12	2.310.085	12,5	16	6	5	2,069
5,12	3.845.126	12,5	18	8	8	2,124
6,12	7.787.520	50,0	20	-	-	2,008
Beton Concrete C40/50						
3,12	1.318.114	7,5	16	6	5	1,901
4,12	2.257.635	7,5	16	6	5	2,425
5,12	3.696.416	12,5	18	8	5	2,478
6,12	5.714.649	12,5	20	10	8	2,479

Tabelle 2: Ergebnisse der Parameterstudie hinsichtlich der in den Stempeln/Höckern auftretenden Hauptzugspannungen σ_1 | **Table 2:** Results of the parameter study with regard to the main tensile stresses σ_1 occurring in the punches/humps

In Bild 4 wurden die zuvor ausgefilterten leichtesten Varianten (Punkte) mit den jeweiligen Zugfestigkeiten der Betonsorten (senkrechte gestrichelte Linien) eingetragen. Die Punkte liegen jeweils knapp links der Zugfestigkeiten auf der untersten („leichtesten“) Linie der jeweiligen Spannweite. Bis zur Spannweite von 5 m reicht ein Deckenbeton der Qualität C30/37 zur Aufnahme der Zugspannungen im Bereich der unbewehrten Stempel aus. Darüber hinaus muss der Faserbeton angesetzt werden.

2.3 Entwicklung der Verdrängungskörper

Die Verdrängungskörper (Bild 5) wurden aus zwei Halbschalen gefügt, weil diese sehr gut stapelbar sind und somit ein geringes Transport- und Lagervolumen ergeben. Die Herstellung erfolgte analog der üblichen Produktion von Faserformteilen wie z. B. Eierkartons. Die Stahlform besitzt ein Sieb in der Negativform der späteren Formteile aus Karton. Die Entwässerung der Faserrohmasse (Pulpe) erfolgt mittels Hitze und Unterdruck. Die aus zwei Halbschalen zusammengefügt Verdrängungskörper müssen während der Betonage stabil und dicht

absorbieren die Zugspannungen im Bereich der ungerüsteten Stempel. Zusätzlich muss der bewehrte Beton angesetzt werden.

2.3 Development of the displacement bodies

The displacement bodies (Fig. 5) were joined from two half shells because these can be stacked very well and thus result in a low transport and storage volume. The production was analogous to the usual production of moulded fibre parts such as egg cartons. The steel mould has a screen in the negative mould of the later moulded parts made of cardboard. The dewatering of the raw fibre mass (pulp) is performed using heat and a vacuum. The displacement bodies, assembled from two half shells, must remain stable and tight during the concreting process. In order to keep the amount of cost and effort within limits, only one type of half-shells was constructed, which were butted together. Therefore, two half-shells always had to be joined to form a displacement body at the trial stage using cable ties. Concreting tests were then successfully conducted using these displacement bodies to test their suitability for practical use.

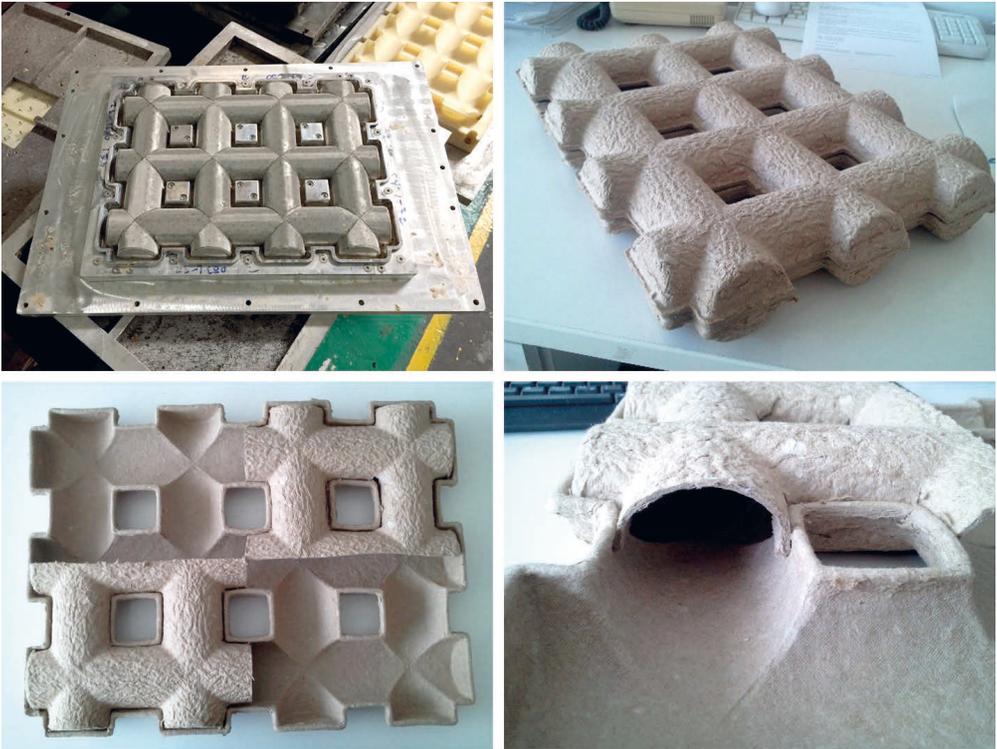


Bild 5: Verdrängungskörper; von links oben nach rechts unten: Negativform für die Produktion der Faserformhalbschale, stumpf gefügter Verdrängungskörper, zwei Halbschalen über eine Steckverbindung gefügt in der Draufsicht und der Perspektive | **Fig. 5:** Displacement bodies; from top left to bottom right: negative mould for the production of the moulded fibre half-shell, butt-jointed displacement body, two half shells joined via a plug-in connection in top view and perspective

bleiben. Um den Aufwand in Grenzen zu halten, wurde nur eine Sorte von Halbschalen gefertigt, die stumpf aufeinandergesetzt wurden. Deshalb mussten immer zwei Halbschalen im Versuchsstadium mittels Kabelbindern zu einem Verdrängungskörper gefügt werden. Mit diesen Verdrängungskörpern wurden dann erfolgreich Betoneversuche durchgeführt, um die Praxistauglichkeit zu prüfen.

Für die spätere Serienfertigung der Verdrängungskörper ist ein Übergreifungsstoß vorgesehen. Hierfür muss eine zweite, etwas kleinere Halbschale produziert werden. Diese wird dann jeweils in die größere Halbschale eingesteckt.

Das Kartonmaterial der Halbschalen wurde mikrobiologisch mittels Schimmelpilzmix (fünf Prüfpilze) vier Wochen lang am Lehrstuhl für

An overlap joint is planned for the later series production of the displacement bodies. A second, somewhat smaller half shell must be produced to this end. This is then inserted into the larger half shell.

The cardboard material of the half-shells was microbiologically tested using a mould mix (five test fungi) for four weeks at the Chair of Wood and Fibre Materials Technology at the TU Dresden. There is no risk of fungal growth due to the almost complete exclusion of air and the alkalinity of the concrete.

Holz- und Faserwerkstofftechnik der TU Dresden getestet. Es besteht aufgrund des fast vollständigen Luftabschlusses und der Alkalität des Betons keine Gefahr einer Pilzbildung.

3 Versuche

3.1 Kleinkörperversuche

3.1.1 Variation des Faseranteils

Wie aus den vorhergehenden Betrachtungen ersichtlich wird, ist der Einsatz von Stahlfasern zur Bewehrung insbesondere der Höcker notwendig. Die vorbereitenden Berechnungen erfolgten nach dem linear-elastischen Ansatz, d. h. zwischen Spannungen und Dehnungen besteht ein linearer Zusammenhang in Form der Materialkonstanten Elastizitätsmodul E ; weiterhin stellt die Querdehnzahl μ den Faktor zwischen Längs- und Querdehnung dar. Beide Materialkonstanten waren für die linearen Berechnungen innerhalb der Parameterstudie geschätzt worden.

Die Kleinkörperversuche bieten die Möglichkeit, weitere Werkstoffkennwerte, die bei nichtlinearen Simulationsrechnungen benötigt werden, zu ermitteln.

Um die Wirkung von verschiedenen Fasergehalten und -kombinationen zu testen, wurden insgesamt 24 weggeregelte 4-Punkt-Biegeversuche entsprechend der DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [6] durchgeführt. Es wurde eine Mischung aus Stahlfasern und Kunststofffasern (PP = Polypropylen) als sogenannter Fasercocktail verwendet (Bild 6). Die PP-Fasern bringen ein gutmütiges Verhalten im Brandfall mit sich, reduzieren das Schwindmaß des jungen Betons und erhöhen dadurch die Zugfestigkeit. Die Abmessungen der Stahlfasern ergaben sich durch die geplanten minimalen Bauteilabmessungen von 5 cm – es wurde die kürzeste Faser mit Endhaken der Fa. Krampe-Harex [7] mit einer Länge von 25 mm und einem Durchmesser von 0,5 mm gewählt. Die Kunststofffasern hatten einen Durchmesser von 18 μm ,

3 Tests

3.1 Tests on small specimens

3.1.1 Variation of the fibre content

As can be seen from the previous considerations, the use of steel fibres is necessary for reinforcement, especially of the bumps. The preparatory calculations were performed in accordance with the linear-elastic approach, i.e. there is a linear relationship between stresses and strains in the form of the material constant modulus of elasticity E ; furthermore, the Poisson's ratio μ represents the factor between longitudinal strain and the transverse strain. Both material constants had been estimated for the linear calculations within the parameter study.

The small specimen tests offer the option of determining further material parameters that are required for non-linear simulation calculations.

In order to test the effect of different fibre contents and combinations, a total of 24 displacement-controlled 4-point bending tests were conducted in accordance with the DAfStb guideline on steel fibre concrete 0. A mixture of steel fibres and plastic fibres (PP polypropylene) was used as a so-called "fibre cocktail" (Fig. 6). The PP fibres behave well in the event of fires, reduce the shrinkage of the young concrete and increase the tensile strength. The dimensions of the steel fibres resulted from the planned minimum component dimensions of 5 cm – the shortest fibre with end hooks from Krampe-Harex [7] – with a length of 25 mm and a diameter of 0.5 mm was chosen. The plastic fibres had a diameter of 18 μm , whereby the fibre surface area is specified by the manufacturer as being 225 m^2/kg . The PP fibres should lead to a premature and uniform formation of microcracks so that the steel fibres act as a force-fit as early as possible and assume the tensile stresses from the concrete in the case of cracks that are not yet visible. The overall goal of the material finding was the max. performance gain (crack energy, ductility, fire protection, shrinkage/tensile strength) with minimised material input/fibre content.



Bild 6: Verwendete Kurzfasern; von links nach rechts: Stahlfasern DE25/0, PP-Fasern PM 12/18, Fasercocktail | **Fig. 6:** Used short fibres; from left to right: steel fibres DE25/0, PP fibres PM 12/18, fibre cocktail

wobei die Faseroberfläche vom Hersteller mit $225 \text{ m}^2/\text{kg}$ angegeben wird. Die PP-Fasern sollen zu einer vorzeitigen und gleichmäßigen Bildung von Mikrorissen führen, damit die Stahlfasern möglichst frühzeitig kraftschlüssig wirken und die Zugspannungen aus dem Beton bei noch nicht sichtbaren Rissen übernehmen. Gesamtziel der Materialfindung war der maximale Performancegewinn (Rissenergie, Duktilität, Brandschutz, Schwinden/Zugfestigkeit) bei minimiertem Materialeinsatz/Fasergehalt.

Beim Anmischen des Faserbetons zeigte sich die Wirkung der Fasern auf die Frischbetoneigenschaften. Vor allem die große Oberfläche der PP-Fasern entzieht der Mischung das notwendige Zugabewasser. Die angestrebte Viskosität (F6) und somit die Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit des Frischbetons konnte nur über eine Erhöhung der Fließmittelmenge wieder hergestellt werden. Das angestrebte Ausbreitmaß von 60 cm wurde aufgrund der filigranen inneren Geometrie der Kreuzkanalplatte gewählt. Bild 7 zeigt einen Ausschnitt der Schalung.

3.1.2 Wegeregelte 4-Punkt-Biegeversuche

Im Rahmen der Materialfindung wurden jeweils drei Versuchsbalken $15 \times 15 \times 70 \text{ cm}^3$ pro Variante hergestellt. Versuchsaufbau und -durchführung erfolgte gemäß DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton ([6], Anhang O; siehe Bild 8).

In Feldmitte übernahm ein induktiver Wegaufnehmer gleichzeitig die Messung der Durchbie-

When mixing the fibre concrete, the effect of the fibres on the fresh concrete properties became apparent. The large surface area of the PP fibres in particular deprives the mixture of the necessary mixing water. The intended viscosity (F6) and thus the workability and compactability of the fresh concrete could only be restored by increasing the quantity of superplasticiser. The target flow spread of 60 cm was chosen due to the filigree inner geometry of the cross channel plate. Fig. 7 shows a detail of the formwork.

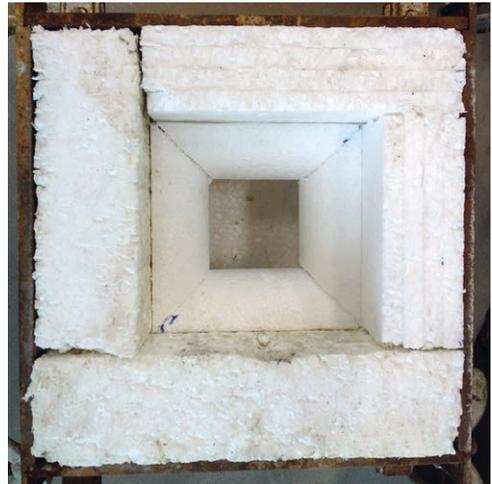


Bild 7: Schalungsausschnitt $11 \times 11 \times 16 \text{ cm}$ der Deckengeometrie realisiert in einer Würfelschalung $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}$ aus Stahl, Halbzylinder $d = 6 \text{ cm}$, Bauteilabmessung minimal = $5 \times 5 \text{ cm}$ (Stempel/Höcker) | **Fig. 7:** Formwork section $11 \times 11 \times 16 \text{ cm}$ of the slab geometry realised in a steel mould $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}$, half cylinder $d = 6 \text{ cm}$, component dimension minimum = $5 \times 5 \text{ cm}$ (punch/hump)

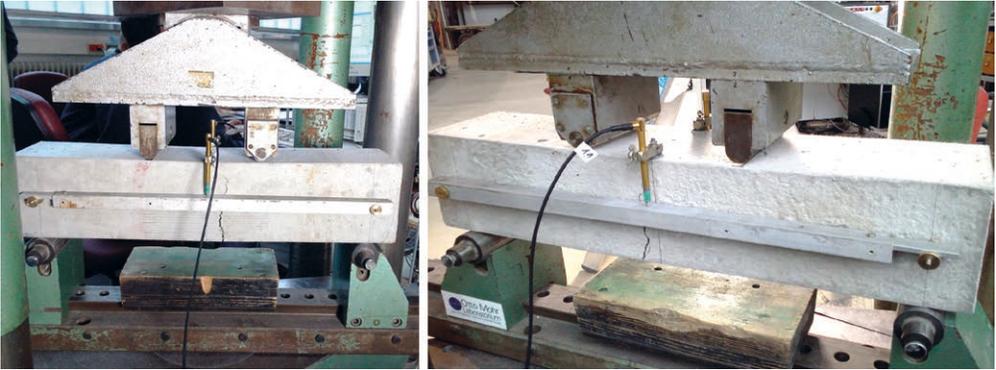


Bild 8: Versuchsstand für 4-Punkt-Biegeversuche nach [6] | Fig. 8: Test stand for 4-point bending tests according to [6]

gung und die Regelung einer konstanten Weggeschwindigkeit. Bild 9 zeigt die Ergebnisse der Vorversuche.

Mit steigendem Faseranteil bzw. Zementgehalt steigt auch die freigesetzte Rissenergie.

Aufgrund der filigranen inneren Struktur der Kreuzkanalplatte stellt die Verarbeitbarkeit des Frischbetons ein weiteres wichtiges Kriterium dar. Hier erwiesen sich die Kunststofffasern als nachteilig. Aufgrund ihrer großen Oberfläche verringert sich das Ausbreitmaß. Bei zunehmendem Fasergehalt war die Verarbeitbarkeit des Frischbetons bei der vorhandenen filigranen Geometrie sehr schnell nicht mehr möglich, dies stellt somit ein Ausschlusskriterium dar.

Der geringe Anteil an Kunststofffasern bringt augenscheinlich keine zusätzliche Nachrisslast, jedoch wirken sich die PP-Fasern in Bezug auf Brandverhalten und Schwindmaß positiv aus. Die Entscheidung fiel deshalb auf die Variante C30/37 mit 0,5 kg/m³ PP-Fasern und 25 kg/m³ Stahlfasern (gelbe Linie in Bild 9).

3.2 Technologische Plattenversuche

3.2.1 Monolithische Kreuzkanalplatte

Für den abschließenden Belastungsversuch wurden vier Fertigteileplatten hergestellt und der Fertigungsprozess getestet.

3.1.2 Displacement controlled 4-point bending tests

As part of the material identification process, three test beams 15 × 15 × 70 cm³ were produced for each variant. The test set-up and execution was conducted in accordance with the DAfStb guideline on steel fibre concrete ([6], Annex O; see Fig. 8).

In the centre of the field, an inductive displacement transducer simultaneously measured the deflection (Fig. 9) and controlled a constant displacement speed.

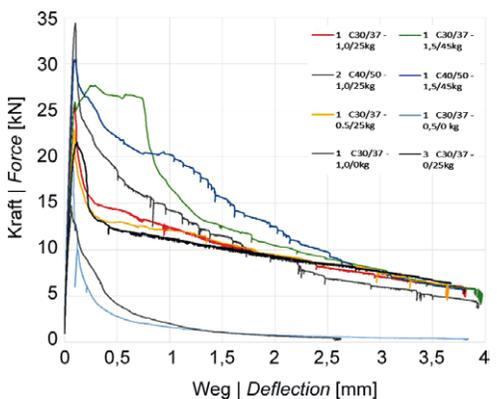


Bild 9: Kraft-Weg-Diagramm der Vorversuche zu Fasergehalt und Betongüte; dabei wurde die maßgebende Kurve ausgefiltert und nur diese hier dargestellt (Stahlfasern/Kunststofffasern) | Fig. 9: Force-path diagram of the preliminary tests on fibre content and concrete quality; the decisive curve was filtered out and only this is shown here (steel fibres/plastic fibres)



Bild 10: Platte mit Verdrängungskörper, Betonstahl, Abspannhülsen, Auftriebsicherung | **Fig. 10:** Slab with displacement body, reinforcing steel, bracing sleeves, uplift protection



Bild 11: Größenverhältnis Frischbeton – Geometrie Verdrängungskörper | **Fig. 11:** Size ratio fresh concrete – geometry displacement body

Die Betonage (Bilder 10 und 11) fand auf dem Rütteltisch statt. Trotzdem musste für eine vollständige Entlüftung der filigranen Geometrie der Flaschenrüttler in jede Öffnung der Verdrängungskörper eingetaucht werden. Durch die Verwendung eines Vorverdichters kann der Verdichtungsaufwand erheblich reduziert werden und eine wirtschaftliche Herstellung der Fertigteile ist dadurch möglich.

3.2.2 Unter Verwendung von Halbfertigteilen

In Deutschland hat sich bereits seit langer Zeit aus Gründen der Wirtschaftlichkeit die Herstellung von Deckenplatten mittels Halbfertigteilen am Markt etabliert. Die manuelle Verdichtung mit Rüttelflasche war aufgrund der filigranen Geometrie nur oberhalb der oberen Bewehrungslage möglich. Im Bereich der Gitterträger erfolgte ein vollständiges Eintauchen der Rüttelflasche $d = 60$ mm. Aus der Erfahrung bei der Betonage der monolithischen Fertigteile kam bei der Probebetonage der Halbfertigteile ein Vorverdichter zum Einsatz. Bild 12 vermittelt einen Eindruck von der Herstellung.

Die Qualität der Betonage wurde zwei Wochen später durch das Zerschneiden der Platte kon-

With an increasing fibre content or cement content, the released crack energy also increases.

The workability of the fresh concrete is another important criterion due to the filigree internal structure of the cross channel slab. Here the plastic fibres proved to be disadvantageous. Due to their large surface area, the flow spread is reduced. With increasing fibre content, the workability of the fresh concrete was very quickly no longer possible with the existing filigree geometry, this therefore represents an exclusion criterion.

The low proportion of plastic fibres does not seem to bring any additional cracking load, but the PP fibres have a positive effect in terms of fire behaviour and shrinkage. **The decision was therefore made in favour of the C30/37 variant with 0.5 kg/m^3 PP fibres and 25 kg/m^3 steel fibres** (yellow line in Fig. 9).

3.2 Technological slab tests

3.2.1 Monolithic cross channel slab

For the final load test, four precast slabs were manufactured and the manufacturing process tested.



Bild 12: Betoneinbau | Fig. 12: Concrete placing

trilliert (Bild 13). Das Betonierergebnis war sehr positiv, der Beton sedimentierte nicht und entlüftete trotz der filigranen Geometrie nahezu perfekt, was hauptsächlich dem Einsatz des Vorverdichters zu verdanken war.

The concreting (see Figs. 10 and 11) took place on the vibrating table. Nevertheless, to ensure a complete venting of the filigree geometry of the bottle vibrators, it was necessary to dip into each opening of the displacement bodies. By using a pre-compactor, the compaction effort can be considerably reduced and an economical production of the precast parts is thus possible.

3.2.2 Using semi-prefabricated parts

In Germany, the production of floor panels by means of semi-prefabricated parts has been established on the market for a long time for reasons of economy. Manual compaction with a vibrating bottle was only possible above the upper reinforcement layer due to the filigree geometry. In the area of the lattice girders a complete immersion of the vibrating bottle $d = 60$ mm was performed. Based on the experience gained in concreting the monolithic precast elements, a pre-compactor was used for the trial concreting of the semi-precast elements. Fig. 12 gives an impression of the production.

The quality of the concreting was checked two weeks later by cutting up the slab (Fig. 13). The concreting result was very positive, the concrete did not sediment and de-aerated almost

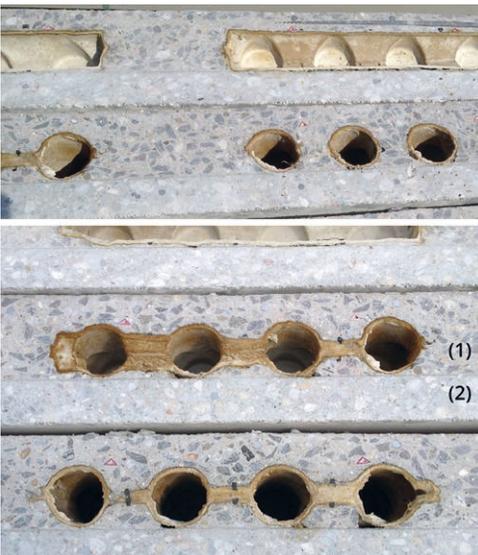


Bild 13: Schnitt durch Quer- (oben) und Längsröhre (unten); Ortbeton (1) und Halbfertigteil (2) sind deutlich erkennbar | Fig. 13: Section through transverse (top) and longitudinal tube (bottom); in-situ concrete (1) and semi-precast part (2) are clearly visible

3.3 Traglastversuch mit Plattenstreifen

Das Prüfstück $4,80 \times 4,80$ m besteht aus vier Fertigteilen $1,20 \times 4,80$ m (zwei Randplatten, zwei Mittenplatten), welche vor Ort per Fugenverguss und Fugenlängsbewehrung praxisgerecht miteinander verbunden wurden. Damit konnte eine Querkraftübertragung gewährleistet werden. Die Spannweite betrug 4,50 m. Zwischen den Fertigteilen entsteht längs der Fuge ein Massivstreifen von ca. 30 cm Breite; auch entlang der Linienlagerung gibt es einen massiven Randstreifen mit einer Breite von ca. 60 cm. Die Verdrängungskörper haben jeweils einen Abstand von ca. 45 cm von der theoretischen Auflagerlinie (10 % der Spannweite, siehe Parameterstudie). Die Lasteinleitung erfolgte weggeregelt in den Viertelpunkten (Bild 14) über hydraulische Pressen gegen die Schwerkraft von unten nach oben.

Die Aufzeichnung der Verformungen erfolgte sowohl über induktive Wegaufnehmer und Dehnungsmessstreifen (Bild 15) als auch per Bildmesssystem (Plattenoberseite) aus einer Höhenlage von ca. 7 m. Der Bewehrungsgrad in Spannrichtung wurde mit $d = 8$ mm/15 cm absichtlich niedrig gewählt.

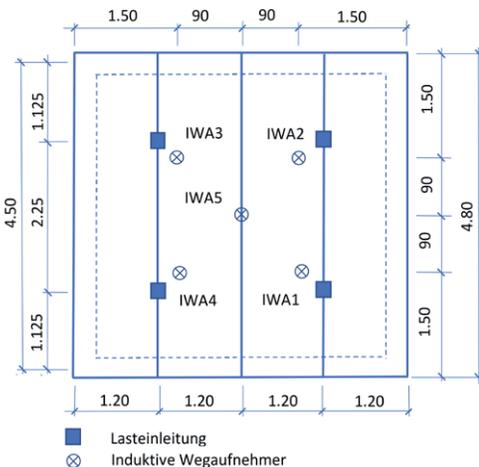


Bild 14: Deckenuntersicht mit Darstellung der Anordnung der Lasteinleitungen in den Viertelpunkten und der Position der vertikalen Wegaufnehmer | **Fig. 14:** Ceiling soffit view showing the arrangement of the load inputs in the quarter points and the position of the vertical displacement transducers

perfectly despite the filigree geometry, which was mainly due to the use of the pre-compactor.

3.3 Load bearing test with slab strips

The test specimen measuring 4.80×4.80 m consists of four prefabricated parts 1.20×4.80 m (two edge slabs, two centre slabs), which were joined together on site by joint grouting and longitudinal joint reinforcement in a practical manner. This ensured a transverse transmission of force. The span was 4.50 m. A solid strip of approx. 30 cm width is created between the pre-cast elements along the joint; there is also a solid edge strip along the line bearing with a width of approximately 60 cm, the displacement bodies are each at a distance of approx. 45 cm from the theoretical support line (10% of the span, see parameter study). The load transfer was controlled in terms of the path at the quarter points via hydraulic presses against the force of gravity from the bottom to the top (Fig. 14).

The deformations were recorded via inductive displacement transducers and strain gauges (Fig. 15) as well as via the image measurement system (top of the slab) from a height of approximately 7 m. The degree of reinforcement in the tensioning direction was intentionally set at a low level with $d = 8$ mm/15 cm.

The test slab was supported on calcium silicate units measuring $50 \times 50 \times 24$ cm³ (Fig. 16). The distribution of the individual forces of the bracing into a line load is performed using double U-beams (see Fig. 17). The spacing of the bracing



Bild 15: Belastungs- und Messtechnik je Hälfte | **Fig. 15:** Load and measurement technology per half



Bild 16: Versuchsstand | Fig. 16: Test stand

Die Auflagerung für die Versuchsplatte erfolgte auf Kalksandsteinen $50 \times 50 \times 24 \text{ cm}^3$ (Bild 16). Die Verteilung der Einzelkräfte der Abspannung in eine Linienlast erfolgte über Doppel-U-Träger (siehe Bild 17). Der Abstand der Abspannungen wurde nach dem Raster des Abspannfeldes mit 1,50 m gewählt. Die Lagerbindung mittels der doppelten U-Träger verhindert das Schüsseln der Decke an den Auflagern.

Die Maximallast betrug $P_m = 109,03 \text{ kN}$; das sind umgerechnet $p = 21,55 \text{ kN/m}^2$ Flächenlast, wobei das Eigengewicht abgezogen wurde. Die

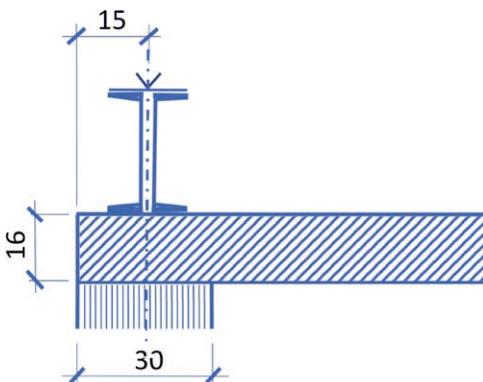


Bild 17: Detail der umlaufenden Abspannung | Fig. 17: Detail of the circumferential bracing

ing was chosen according to the grid of the bracing field with 1.50 m. The bearing connection by means of the double U-beams prevents the slab from cupping on the supports.

The maximum load was $P_m = 109.03 \text{ kN}$; this is converted to $p = 21.55 \text{ kN/m}^2$ distributed load, whereby the dead weight was deducted. The maximum deflection was found to be 57.6 mm. The ultimate limit state was characterised by strong cracks on the upper side of the plate (Fig. 18) and by fractures in the punches/humps. Longitudinal joint had opened, but until then there was a transverse force transmission. A diagonal crack in the edge plate indicated that a biaxial load transfer was occurring.



Bild 18: Deutliche Rissbildung im Bruchzustand | Fig. 18: Clear cracking in the ultimate limit state

maximale Durchbiegung wurde mit 57,6 mm festgestellt. Der Bruchzustand war gekennzeichnet durch starke Rissbildungen an der Plattenoberseite (Bild 18) und durch Brüche in den Stempeln/Höckern. Die Längsfuge hatte sich geöffnet, jedoch erfolgte bis dahin eine Querkraftübertragung. Ein diagonaler Riss in der Randplatte zeigte an, dass sich ein zweiachsiger Lastabtragung einstellt.

Die aufgezeichneten Last-Durchbiegungs-Beziehungen sind für die IWA in Bild 19 dargestellt. Sie zeigen deutlich den Übergang von Zustand I zu Zustand II.

Im zurückgerechneten Gebrauchszustand wurden die Werte gemäß Tabelle 3 gemessen. Bei diesen Werten wurde das Eigengewicht berücksichtigt. Die äquivalenten Flächenlasten entsprechen denen in den üblichen Nutzlastkategorien A–D sowie T1 und T2 nach DIN EN 1991-1-1/NA. Die gängigen Durchbiegungsbeschränkungen können eingehalten werden.

Das Bildmesssystem liefert hier im Bruchzustand wegen des Aufklappens der Einzelplatten keine Ergebnisse mehr. Der Schnappschuss in Bild 20 dokumentiert eine Laststufe von etwa 90 % der Bruchlast. Die bis dahin mit den IWA an der Unterseite gemessenen Werte stimmen mit dem Bildmesssystem gut überein.

4 Ergebnisse und Ausblick

4.1 Ergebnisse

Mit dem Forschungsvorhaben konnte die im Antrag aufgestellte Hypothese, mit der CC-Techno-

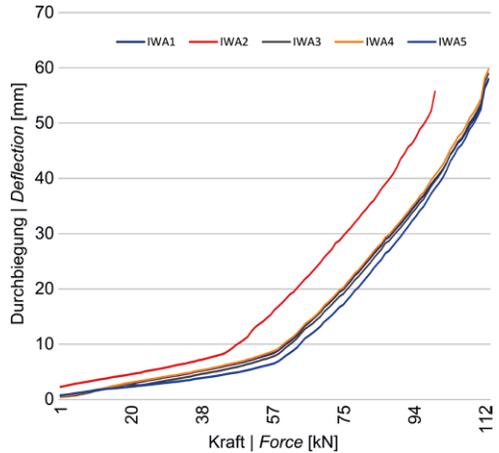


Bild 19: Last-Durchbiegungs-Kurven an den fünf induktiven Wegaufnehmern | Fig. 19: Load-deflection curves on the five inductive displacement transducers

The recorded load-deflection relationships are shown for the IWA in Fig. 19. The transition from state I to state II can be clearly seen.

In the recalculated state of use, the values were measured according to Table 3. The values there take the dead weight into account. The equivalent area loads correspond to those in the usual imposed load categories A–D as well as T1 and T2 according to DIN EN 1991-1-1/NA. The common deflection limitations can be complied with.

The image measuring system no longer provides results here in the ultimate limit state because of the unfolding of the individual slabs. The snapshot in Fig. 20 documents a load level of about 90% of the ultimate load. The values measured up to then with the IWA on the underside tally well with the image measurement system.

Einzellast Single load [kN]	Äquivalente Flächenlast Equivalent area load [kN/m ²] ¹	Durchbiegung Deflection δ [mm]		δ /l experimentell experimental
		gemessen mit IWA _m measured using IWA _m	rechnerisch (elastisch) calculationaly (elastic)	
35,40	3 + 4 = 7	3,97	1,7	1/1133
45,54	5 + 4 = 9	5,12	3,8	1/879

¹ Verkehrslast + Eigengewicht | Imposed load + dead weight

Tabelle 3: Durchbiegungswerte im Gebrauchszustand | Table 3: Deflection values in the service condition

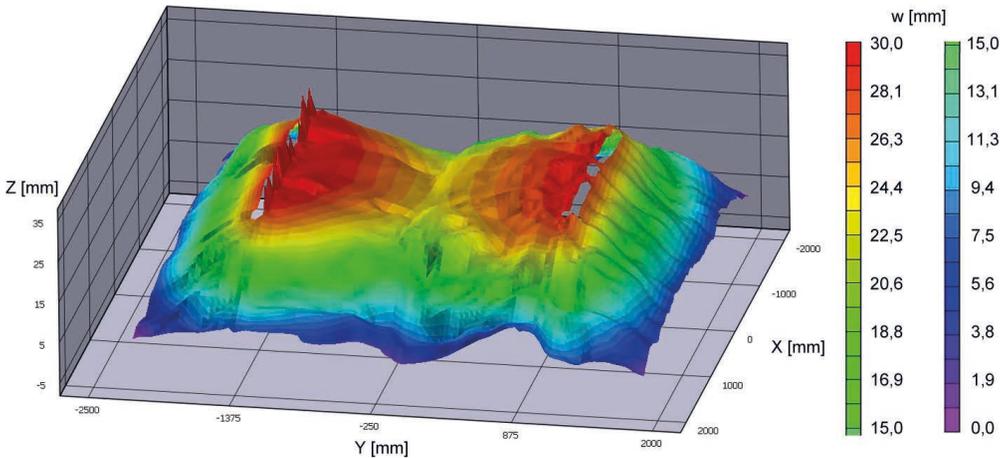


Bild 20: Auswertung der Bildmessung – 3D-Darstellung der Verformungen | **Fig. 20:** Evaluation of the image measurement – 3D representation of the deformations

logie eine Einsparung an Material zu erreichen, bestätigt werden. Es können ca. 19 % an Beton eingespart werden, was ein beachtliches Ergebnis in Hinblick auf die Ressourcen- und Energieeinsparung bedeutet. Diese Einsparung zieht den Einsatz von Faserbewehrung nach sich, die sich jedoch mit einer Reduzierung an Stab- bzw. Mattenbewehrung aufheben lässt.

Die Betonverdrängung wurde durch Einlage von Faserformkörpern aus Recyclingmaterial oder nachwachsendem Rohstoff erreicht. Die Unbedenklichkeit des Verbleibs organischen Materials in der Decke konnte nachgewiesen werden. Die praktische Anwendbarkeit wurde getestet und bestätigt.

Mit dem Vorhaben wurden die Grundlagen zur Anwendung der CC-Technologie für platten- und scheibenförmige Bauteile gelegt.

4.2 Ausblick

Für die Überführung der Ergebnisse in die Praxis sind weiterführende Arbeiten notwendig.

Dazu gehört die weitere Verfeinerung der Ausbildung der Verdrängungskörper. Das stumpfe Stoßen der beiden Halbschalen zog manuellen Mehraufwand nach sich. Dieser lässt sich je-

4 Results and outlook

4.1 Results

The research project was able to demonstrate that the hypothesis put forward in the application that the CC technology could achieve a saving in material could be confirmed. Approximately 19% of concrete can thus be saved, which is a remarkable result in terms of the savings in resources and energys. This saving entails the use of fibre reinforcement, but this can be offset by a reduction in bar or mesh reinforcement.

The concrete displacement was achieved by inserting moulded bodies made of recycled material or renewable raw material. It was possible to prove the harmlessness of the organic material remaining in the ceiling. The practical applicability was tested and confirmed.

The research project laid the foundations for the application of CC technology for slab and wall-shaped structural components.

4.2 Outlook

Further work is necessary to transfer the results into practice.

doch vermeiden, wenn die beiden Halbschalen ineinandergesteckt werden können. Dazu sind dann zwei Formen zur Herstellung der Halbschalen erforderlich, die sich jedoch bei entsprechender Stückzahl schnell amortisieren.

Für die praktische Anwendung ist ein Bemessungsvorschlag auszuarbeiten, der auf einer Kombination von Stab-/Mattenbewehrung mit Faserbewehrung beruht. Weiter ist zu empfehlen, ergänzende Versuche mit größeren Spannweiten durchzuführen und die Ergebnisse mit den ermittelten Grundlagen über numerische Simulationen weiter zu ergänzen und zu verdichten.

Danksagung

Der Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 257052528 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Für die gewährte Unterstützung bei der Durchführung des Forschungsvorhaben wird insbesondere dem Otto-Mohr-Laboratorium der Fakultät Bauingenieurwesen der TU Dresden sowie dem Institut für Holz- und Werkstofftechnik der TU Dresden gedankt. Ein Dank gilt auch dem Betonwerk Flöha, den Firmen Berger-Beton, KrampeHarex, HBM sowie der Fa. Decapulp in Barcelona für die gewährte Unterstützung. Manfred Hoffmann (mCon) aus Freudenberg begeisterte uns mit seiner Idee von der CC-Technologie.

This includes further refining the formation of the displacement bodies. The blunt butting of the two half-shells entailed additional manual work. However, this can be avoided if the two half shells are inserted into each other. This then requires two moulds for the production of the half-shells, which, however, quickly pay for themselves where the appropriate quantities are in place.

Where the practical application is concerned, a design proposal shall be elaborated based on a combination of bar/mesh reinforcement with fibre reinforcement. Furthermore, it is recommend performing supplementary tests with larger spans and to further supplement and consolidate the results with the determined fundamentals by means of numerical simulations.

Acknowledgement

The author thanks the German Research Foundation (DFG) for funding project no. 257052528 within the Priority Programme SPP 1542.

Special thanks are due to the Otto Mohr Laboratory of TU Dresden and the Institute of Wood and Materials Engineering of the TU Dresden for the support provided in carrying out the research project. Thanks are also due to the concrete plant in Flöha, the companies Berger-Beton, KrampeHarex, HBM and Decapulp in Barcelona for their support. Manfred Hoffmann (mCon) from Freudenberg inspired us with his idea of CC technology.

Literatur | References

- [1] Rohmann, M.: CC-Technologie. Wissenschaftliche Arbeit am Lehrstuhl Tragwerksplanung, Fakultät Architektur, TU Dresden, 2013
- [2] Hoffmann, M.: mCon. Modular construction GmbH. <https://www.mconag.com/unternehmen.html> (16.11.2021)
- [3] BRESPA Decken. <https://www.dw-systembau.de/brespa-hohldecken.html> (16.11.2021)
- [4] Cobiax Decke <https://www.cobiax.com/de/de/technologie/> (16.11.2021)
- [5] DIN EN 1992-1-1: 2011-01/2015-03: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010/A1:2014. Berlin: NABau im DIN 2011/2015
- [6] DAFStb-Richtlinie Stahlfaserbeton Ausgabe 2010-03. Berlin: DAFStb 2010. Ersetzt durch Ausgabe 2021-06
- [7] Stahlfasern für Faserbeton. <https://www.krampeharex.com/> (12.11.2021)

[8] DIN EN 1992-1-1/NA/A1: 2013-04/2015-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Berlin: NABau im DIN 2013/2015

Bildnachweise | Picture credits

Alle Abbildungen | All images: Lehrstuhl Tragwerksplanung, TU Dresden

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Untersuchungen zu Trageigenschaften von plattenförmigen Betonleichtbauelementen in CC-Technologie

Research into the load bearing behaviour of light construction concrete slabs made by using cross-channel technology

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger Inhaber der Professur Chair holder
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	JA 1042/8-1 (Projektnummer Project number: 257052528)
Adresse Address:	TU Dresden, Fakultät Architektur, Professur für Tragwerksplanung, Zellescher Weg 17, 01069 Dresden
Kontakt Contact:	+49 351 463 35010 lehrstuhl.tragwerksplanung@tu-dresden.de https://tu-dresden.de/bu/architektur/twp
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.10.2014–30.09.2017 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 30.09.2018
Team Team:	Jürgen Ries Sebastian Ortlepp (10/2014–03/2015)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Sigmund, B.: Röhrenspanplatten als Vorlage für Betonleichtbauelemente. Kurzbericht über das DFG-Projekt, erschienen online am 27.09.2017 unter <https://www.detail.de/artikel/roehrsplanplatten-als-vorlage-fuer-betonleichtbauelemente-30886/>
- Ries, J.: Herstellung filigraner Hohlraumdeckenplatten mit Verdrängungskörpern aus Recyclingpapier. beton 69 (2019) 12, S. 468–471

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Studienarbeiten | Student's research projects

- Mehta, A.: Numerische Optimierung von bewehrten Betonleichtbau-Wandscheiben in CC-Technologie | Numerical optimization of light-weight reinforced concrete walls made by using the cross-channel technology. Masterarbeit, 2017
- Prakhar, V.: Numerische Optimierung von bewehrten Betonleichtbau-Deckenplatten in CC-Technologie | Numerical optimization of light-weight reinforced concrete slabs made by using the cross-channel technology. Masterarbeit, 2017

Konstruktion und Optimierung von Klebeverbindungen für Platten- und Scheibenbauteile aus hochfestem Beton | Construction and optimization of adhesive joints for plate and shell construction elements composed of high performance concrete

- ▶ **Matti Schneider¹, Heiko Andrä¹, Christian Kohlmeyer², Sebastian Oster²**
- ▶ ¹Abteilung für Strömungs- und Materialsimulation, Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern
- ▶ ²Fachgebiet für Massivbau und Baukonstruktion, Technische Universität Kaiserslautern

1 Kurzzusammenfassung

Zum kraft- und formschlüssigen Fügen von dünnwandigen, filigranen Betonfertigteilen eignen sich besonders kontinuierliche, flächige Verbindungen, die durch Verkleben erzielt werden können. Im Rahmen dieses Vorhabens sollten möglichst einfach zu handhabende Klebeverbindungen für Platten- und Scheibenbauteile konstruiert und optimiert werden. Die Verbindungen sollten so ausgelegt werden, dass sie sowohl Beanspruchungen aus einzelnen Schnittgrößen als auch aus Schnittgrößenkombinationen übertragen können. Die einzelnen Parameter, die dabei untersucht werden sollten, sind im Wesentlichen die Klebefugegeometrie sowie die Oberflächenbeschaffenheit und Bewehrung der zu verklebenden Bauteile. Als Klebstoff sollte in erster Linie ein zementgebundener Hochleistungsmörtel, eingesetzt werden. Das Optimieren der Klebefugegeometrie und der Bewehrung in der Nähe der Fuge erfolgte mit Hilfe eines mathematisch fundierten Shape- und Topologie-Optimierungsverfahrens, wobei die Fugegeometrie sowie das Interface zwischen Beton und Bewehrung mit Level-Set-Funktionen beschrieben wurden. Dieses Verfahren nutzt den topologischen Gradienten als Maß für die Sensitivität der Zielfunktion bzgl.

1 Summary

Continuous two-dimensional connections, which are achieved by gluing are particularly suitable for the force-locking and form-fit joining of thin-walled, filigree precast concrete elements. Within the framework of this project, easy-to-handle adhesive joints for plate and plane components can be designed and optimized. The connections should be designed in such a way that they can withstand both stresses from individual internal forces as well as from combinations of internal forces. In essence, the individual parameters that should be investigated are the geometry of the bonding joint as well as the surface condition and reinforcement of the components to be bonded. A cementitious high-performance mortar should primarily be used as adhesive. The optimization of the adhesive joint geometry and the reinforcement close to the joint was carried out by means of a mathematically founded shape and topology optimization method, whereby the joint geometry as well as the interface between concrete and reinforcement were described with level set functions. This method uses the topological gradient as a measure of the sensitivity of the objective function to the size of a pore or crack at a given point in the structural member [1].

der Größe einer Pore oder eines Risses in einem gegebenen Punkt im Bauteil [1].

Auf der Grundlage von Kleinteilversuchen wurden Bruchkriterien entwickelt, die die Festigkeit der Klebefuge sowohl für eine kombinierte Schub-Druck- als auch für eine Schub-Zugbeanspruchung beschreiben. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden weiterhin Entscheidungshilfen zur Fugengestaltung sowie ein ingenieurmäßiger Bemessungsansatz erarbeitet.

2 Experimentelle Untersuchungen und Bemessungskonzept (Team Kohlmeier)

2.1 Verwendete Werkstoffe

2.1.1 Hochleistungsbeton (HPC)

Für die Versuchskörper wurden gefügedichte selbstverdichtende Feinkornbetone verwendet (vgl. [2]). Das Größtkorn betrug 0,5 mm. Bei den Untersuchungen kamen drei unterschiedliche Betonrezepturen HPC-1–3 zum Einsatz. Die Mischungszusammensetzungen sind in [3] enthalten. Bei dem HPC-3 handelte es sich um Stahl-faserbeton mit einem Gehalt von 2,0 Vol.-% an Mikrostahlfasern. Diese hatten einen Durchmesser von 0,175 mm und eine Länge von 6 mm. Die Werkstoffkennwerte der verwendeten Betone sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

2.1.2 Klebstoffe

Als Klebstoff wurden zwei Hochleistungsmörtel eingesetzt, die an eine von Mühlbauer und Zilch an der TU München entwickelte Rezeptur angelehnt sind ([4], [5]). Die Mischungszusammen-

On the basis of small part tests, fracture criteria were developed which describe the strength of the adhesive joint both for a combined shear-compressive and a shear-tensile load. Based on the knowledge gained, decision supports for joint design and an engineering design approach were also developed.

2 Experimental studies and design concept (team Kohlmeier)

2.1 Used materials

2.2.1 High performance concrete (HPC)

For the experimental investigations, three different self-compacting high-performance fine grain concretes HPC-1–3 with a maximum grain size of 0.5 mm were used (see [2]). The mixture compositions are given in [3]. HPC-3 was a steel fibre concrete with a content of micro-steel fibres of 2.0% by volume. Their diameter was 0.175 mm and the length 6 mm. The material properties of the concretes are summarized in Table 1.

2.1.2 Adhesives

Two high-performance mortars based on a formulation developed by Mühlbauer and Zilch at the TU Munich were used as adhesives ([4], [5]). The compound compositions are listed in [3]. These adhesives are also referred to as high-performance mortars (HPM for short).

Hereafter, it arose that the HPM reacts very sensitively to even the slightest changes in the compound components, which has had a strong effect on the rheological properties and strength of the adhesive. A high-performance mortar from Pagel was therefore also used as a practi-

Kennwert Material characteristic	HPC-1	HPC-2	HPC-3
Mittlere Druckfestigkeit Mean compressive strength $f_{cm,cube,150}$ in [N/mm ²]	136	138,9	142,8
Mittlere Biegezugfestigkeit Mean flexural strength $f_{cm,fl}$ in [N/mm ²]	13,4	16,3	15,2
Mittlerer Elastizitätsmodul Mean elastic modulus E_{cm} in [N/mm ²]	37.912	39.090	–

Tabelle 1: Werkstoffkennwerte der verwendeten Betone [2], [3] | **Table 1:** Material properties of the used concrete [2], [3]

Kennwert Material characteristic	HPC-1	HPM-2	HFL
Mittlere Druckfestigkeit Mean compressive strength $f_{am,fi}$ in [N/mm ²]	120,1	128,4	126,6
Mittlere Biegezugfestigkeit Mean flexural strength $f_{atm,fi}$ in [N/mm ²]	14,5	15,5	19,8
Mittlerer Elastizitätsmodul Mean elastic modulus $E_{am,fi}$ in [N/mm ²]	-	42.232	41.203

Tabelle 2: Werkstoffkennwerte der verwendeten Klebstoffe [2], [3] | **Table 2:** Material properties of the used adhesives [2], [3]

setzungen sind in [3] aufgeführt. Im Weiteren werden diese Klebstoffe als *high-performance mortar* (kurz HPM) bezeichnet.

Wie sich gezeigt hat, reagiert der HPM jedoch sehr empfindlich auf selbst geringste Veränderungen in den Mischungsbestandteilen, was sich stark auf die rheologischen Eigenschaften und die Festigkeit des Klebstoffes auswirkte. Als praxistaugliche Alternative wurde daher auch ein Hochleistungsmörtel der Fa. Pagel eingesetzt. Bei dem sogenannten Hochfestleim (HFL) handelt es sich um einen rein zementgebundenen hochfesten Werk trockenmörtel mit einem Größtkorn von 0,25 mm. Die Werkstoffkennwerte der verwendeten Klebstoffe sind in Tabelle 2 aufgeführt.

2.1.3 Bewehrung

Als Bewehrung wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens in erster Linie Mikrobewehrung nach [6] und Stabstahl mit einem Durchmesser von 4 mm in Form von geripptem Betonstahl eingesetzt. Mikrostaahlfasern wurden bei einigen Schub-Druckversuchen verwendet, um die Tragfähigkeit der Füge-teile zu steigern, sowie bei einer Versuchsserie im Zusammenhang mit den Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen. Bei der sog. Mikrobewehrung handelt es sich hier um Stahldrahtmatten mit einer Maschenweite von 12,6 mm und einem Drahtdurchmesser von 1,0 mm. Die Zugfestigkeit des Drahts beträgt rund 400 N/mm² und der Elastizitätsmodul ca. 210.000 N/mm².

2.2 Tastversuche an Klebverbindungsvarianten

In [7] und [8] werden die Tastversuche an Klebverbindungsvarianten detailliert vorgestellt.

The so-called high-strength glue (HFL) is a purely cement-bonded, high-strength dry mortar with a maximum particle size of 0.25 mm. The material properties of the adhesives used are listed in Table 2.

2.1.3 Reinforcement

Microreinforcement and steel reinforcement bars acc. to [6] with a diameter of 4 mm in the form of ribbed reinforcing steel were primarily used as reinforcement within the framework of the research project. Micro-steel fibres were used in some shear compression tests to increase the load-bearing capacity of the parts to be joined and in a series of tests in connection with the investigations on finger joints. The so-called microreinforcement is a steel wire mesh with a mesh size of 12.6 mm and a wire diameter of 1.0 mm. The tensile strength of the wire is approx. 400 N/mm² and the modulus of elasticity approx. 210,000 N/mm².

2.2 Preliminary tests on glued joint variants

In [6] and [7] the preliminary tests on adhesive joint variants are presented in detail. The test program primarily included tensile tests, but also four-point and three-point bending tests. In addition to microreinforcement, the steel reinforcement mentioned above was also tested during the tensile tests. In addition, reference tests without joints were carried out on three microreinforced specimens. The test program provided for three different joint geometries: a rectangular tooth geometry, a triangular tooth geometry or also called finger joint geometry as well as an undercut geometry. Apart from the tests with steel reinforcement bars, the joint geometry was cut into the 30 mm thick plates of HPC-1 with ten layers of microrein-

Das Versuchsprogramm sah in erster Linie Zugversuche, aber auch Vierpunkt- und Dreipunktbiegeversuche vor. Bei den Zugversuchen wurde neben Mikrobewehrung auch der oben beschriebene stabförmige Bewehrungsstahl getestet. Außerdem wurden Referenzversuche ohne Fuge an jeweils drei Probekörpern mit Mikrobewehrung durchgeführt. Das Versuchsprogramm sah drei unterschiedliche Fugengeometrien vor: eine rechteckige Zahngeometrie, eine dreieckige Zahngeometrie oder auch Keilzinkengeometrie sowie eine Hinterschnittgeometrie. Außer bei den Versuchen mit Stabstahlbewehrung wurde die Fugengeometrie jeweils mittels Hochdruckwasserstrahlschneidtechnik in die 30 mm dicken und mit zehn Lagen Mikrobewehrung versehenen Platten aus HPC-1 geschnitten.

Eine wichtige Erkenntnis der Tastversuche an verschiedenen Klebeverbindungsvarianten war, dass durch die geschickte Wahl der Fugengeometrie ein Versagen in der Klebefuge ausgeschlossen werden kann. Bei den Versuchen mit Mikrobewehrung war stets ein Bewehrungsversagen zu beobachten. Das Tragverhalten kann als weitgehend duktil charakterisiert werden. Das Versagen findet im Bauteilquerschnitt mit dem höchsten Fugenanteil in einem Riss rechtwinklig zum einwirkenden Hauptspannungszustand statt. Dabei hängt die Tragfähigkeit in erster Linie vom Bewehrungsquerschnitt im Riss ab.

Im Vergleich zur Rechteckgeometrie und zur Hinterschnittgeometrie ist bei der Keilgeometrie die Querschnittsschwächung der Bewehrung in diesem Versagensriss am geringsten. Dementsprechend war die Tragfähigkeit am höchsten. Ein weiterer Vorteil der Keilgeometrie ist, dass sich diese relativ einfach und kostengünstig mit einer herkömmlichen Steinsäge herstellen lässt.

Bei den Versuchen mit Stabstahlbewehrung wurde die höchste Tragfähigkeit erzielt, bevor es zu einem schlagartigen Versagen der Klebefuge kam (Bild 1).

forcement using high-pressure water jet cutting technology.

An important finding of the preliminary tests on various adhesive joint variants was that a failure in the adhesive joint can be ruled out by the skilful selection of the joint geometry. During the tests with microreinforcement, a failure of the reinforcement was always observed. The load-bearing behaviour can be characterized as largely ductile. The failure takes place in the component cross-section with the highest proportion of joints in a crack at right angles to the acting main stress state. The bearing capacity depends primarily on the reinforcement cross-section in the crack.

In comparison to the rectangular geometry and the undercut geometry, the weakening of the cross-section of the reinforcement in this failure crack is lowest in the finger joint geometry. Accordingly, the load carrying capacity was highest. A further advantage of the finger joint geometry is that it can be produced relatively easily and inexpensively with a conventional stone saw.

In the tests with steel reinforcement bars, the highest load-bearing capacity was achieved before an abrupt failure of the adhesive joint occurred (Fig. 1).

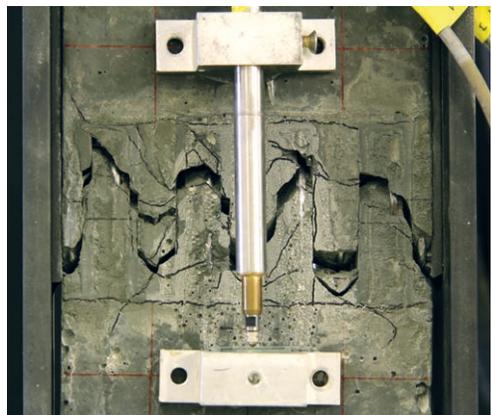


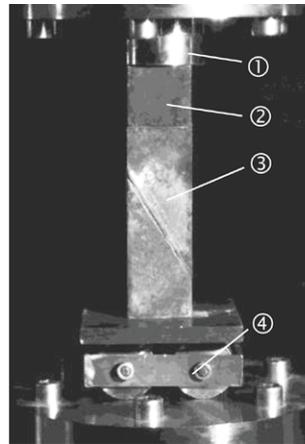
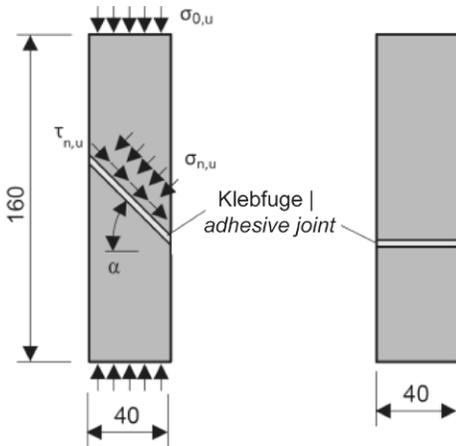
Bild 1: Bruchbild einer mit Stabstahl bewehrten Klebefuge | Fig. 1: Crack pattern of a thin steel bars reinforced adhesive joint

2.3 Untersuchungen zur Formulierung eines Bruchkriteriums für Klebefugen

Während für eine Schub-Druckbeanspruchung von Zilch und Mühlbauer [4], [5] ein Bruchkriterium hergeleitet wurde, stand für derartige Schub-zugbeanspruchte Klebefugen bislang kein Bruchkriterium zur Verfügung. In einer umfangreichen Versuchsserie wurden daher Untersuchungen an kleinformatischen Schub-Druck-, Schub-Zug- und Zugprobekörpern durchgeführt (Bilder 2 und 3) mit dem Ziel, ein zweiaxiales Bruchkriterium für die Klebefuge zu entwickeln. Dabei wur-

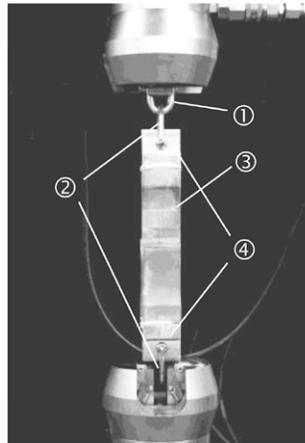
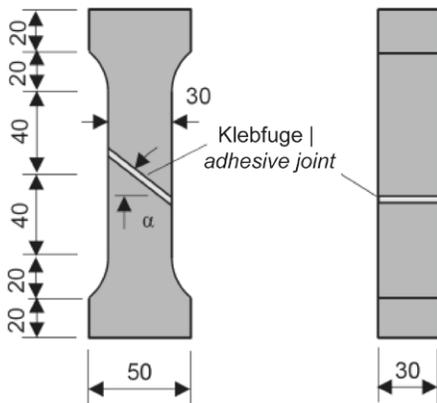
2.3 Investigations into the formulation of a fracture criterion for adhesive joints

While a fracture criterion was derived for a shear compressive stress of Zilch and Mühlbauer [4], [5], no fracture criterion was available for such adhesive joints subjected to shear-tensile stress. In an extensive series of tests, small shear-pressure, shear-tension and tensile test specimens were examined (Figs. 2 and 3) with the aim of developing a biaxial fracture criterion for the adhesive joint. Both the HFL and the HPM were used and different types of adhesive surface prepara-



- ① Kalotte | calotte
- ② Zentrierblock | centring block
- ③ Probekörper | shear-compr. specimen
- ④ Rollenwagen | roller bed

Bild 2: Probekörpergeometrie und Versuchsaufbau bei den Schub-Druckversuchen | Fig. 2: Specimen and test set-up at the shear-compression tests



- ① Kettenglied | chain link
- ② Schekel | shakel
- ③ Probekörper | tension specimen
- ④ Stahlstempel | steel prism

Bild 3: Probekörpergeometrie und Versuchsaufbau und bei den Schub-Zug- sowie bei den Zugversuchen | Fig. 3: Specimen and test set-up at the shear-tension tests as well as the tensile tests

den sowohl der HFL als auch der HPM verwendet sowie unterschiedliche Arten der Klebflächen-vorbereitung untersucht. Erste Ergebnisse wurden bereits in [9] und [10] vorgestellt.

Im Rahmen der einzelnen Versuchsreihen wurde die Fugenfestigkeit für unterschiedliche Schubspannungs-Normalspannungskombinationen ermittelt. Zur Formulierung eines integrierten Klebefugen-Bruchkriteriums wurden die durchgeführten Zug-, Schub-Zug- und Schub-Druckversuche in [3] gemeinsam im Schubspannungs-Normalspannungsdiagramm (Bild 4) ausgewertet. Das Bruchkriterium stellt letztendlich eine Ausgleichsfunktion oder Regressionsfunktion der Versuchswerte dar. Wie sich gezeigt hat, kann die in den Versuchen erzielte Fugenfestigkeit unter kombinierter Schub-Normalspannungsbeanspruchung am besten mit Hilfe eines quadratischen Ansatzes, also einem Polynom zweiten Grades, angenähert werden. Geschrieben in allgemeiner Form lautet die Gleichung:

$$\tau(\sigma_n) = a \cdot \sigma_n^2 + b \cdot \sigma_n + c \tag{1}$$

tion were investigated. First results have already been presented in [9] and [10].

Within the framework of the individual test series, the joint strength was determined for different shear stress-normal stress combinations. In order to formulate an integrated adhesive joint fracture criterion, the tensile, shear-tensile and compression-shear tests performed in [3] were jointly evaluated in the shear stress-normal stress diagram (Fig. 4). The fracture criterion ultimately represents a compensation function or regression function of the test values. It has been shown that the joint strength achieved in the tests can best be approximated using a quadratic approach, i.e. a second degree polynomial, under combined shear-normal stress loading. Written in general form, the equation is:

$$\tau(\sigma_n) = a \cdot \sigma_n^2 + b \cdot \sigma_n + c \tag{1}$$

Fig. 4 shows the results of all tests with HFL as average values per series with the same joint inclination angle as well as the corresponding

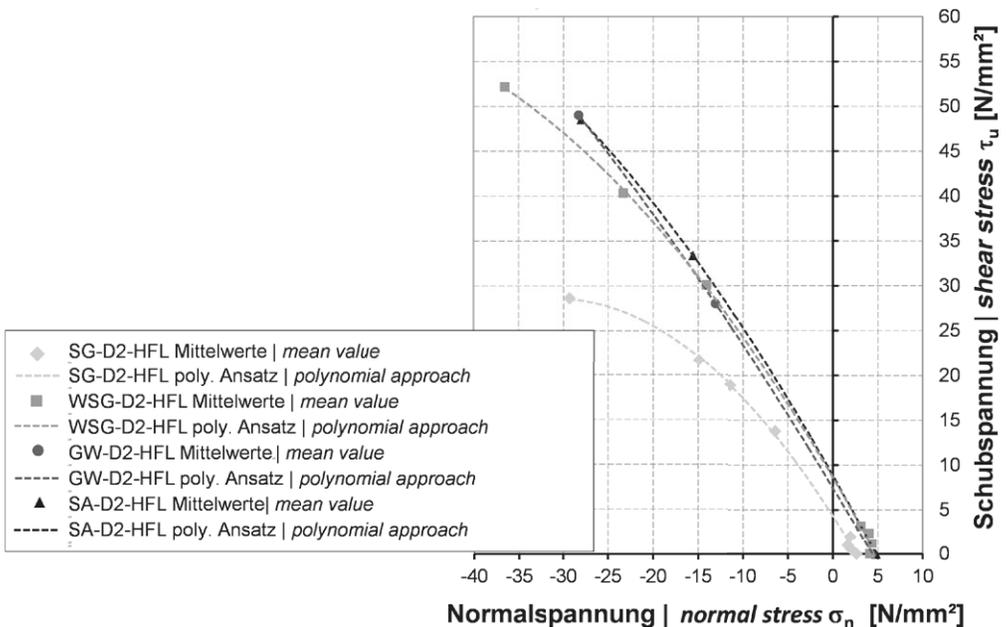


Bild 4: Beschreibung der Fugenfestigkeit für die Klebverbindung mit HFL mit Hilfe von Regressionspolynomen | Fig. 4: Description of the adhesive joint strength with HFL by using regression polynomials

Kennwert Material characteristic	Parameter Gl. (1)		
	a [-]	b [-]	c [N/mm ²]
SG (schalglatt smooth concrete)	-0,0253	-1,569	4,31
WSG (wasserstrahlgeschnitten cut by water jet)	-0,0142	-1,706	8,64
GW (gewaschen washed) ¹	-0,0069	-1,663	7,47
SA (feststoffgestrahlt sandblasted)	-0,0128	-1,774	8,87

¹ ca. 12 h nach der Betonage mit einer Drahtbürste und Wasser bearbeitet | treated with a steel brush approximately 12 h after concreting

Tabelle 3: Parameter der Regressionspolynome zur Beschreibung der Fugenfestigkeit für die Klebverbindung mit HFL und unterschiedlich vorbehandelten Klebeflächen [3] | **Table 3:** Parameters of the regression polynomials for describing the adhesive joint strength with HFL and differently pre-treated surfaces [3]

In Bild 4 sind die Ergebnisse aller Versuche mit HFL als Mittelwerte pro Serie mit gleichem Fugeneigungswinkel sowie die entsprechenden Regressionspolynome in einem Schubspannungs-Normalspannungsdiagramm dargestellt. Auch für die Versuche mit gewaschener sowie feststoffgestrahlter Klebefläche wurden die Parameter a, b und c mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (s. Tabelle 3). Hier standen jeweils nur drei Stützstellen zur Verfügung. Das Bestimmtheitsmaß beträgt jeweils eins.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass mit Ausnahme der schalglatten Klebefläche die Fugenfestigkeiten ungefähr in derselben Größenordnung liegen.

2.4 Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen

Wie sich in den Vorversuchen gezeigt hat, lässt sich durch die richtige Wahl der Fugengeometrie ein Fugenversagen verhindern und es kommt zu einem Versagen der Bewehrung. Bei welcher Beanspruchung es zu einem Fugenversagen kommt, lässt sich theoretisch mit Hilfe des Bruchkriteriums ermitteln. Dieses wurde jedoch an kleinformatigen Probekörpern ermittelt. Ob die Übertragbarkeit gegeben ist und sich damit die Fugentragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen ermitteln lässt, sollte in einer entsprechenden Versuchsserie untersucht werden.

Wie sich ebenfalls in den Tastversuchen gezeigt hat, hängt die Tragfähigkeit der Verbindung in erster Linie vom im Versagensschnitt – also in

regression polynomials in a shear stress-normal stress diagram. The parameters a, b and c were also determined using the least squares method for the tests with washed and solid-blasted adhesive surfaces (see Table 3). Only three support points were available here. The coefficient of determination is one in each case.

Overall, it can be stated that with the exception of the smooth formwork adhesive surface, the joint strengths are of approximately the same order of magnitude.

2.4 Examinations on finger joints

As has been shown in the preliminary tests, the correct choice of joint geometry can prevent joint failure and the reinforcement will fail. Theoretically, the failure criterion can be used to determine the stress at which a joint failure will occur. However, this criterion was determined on small-format specimens. Therefore, it should be investigated in a corresponding test series whether the transferability is given and the joint carrying capacity of finger joints can be determined with the developed failure criterion.

As has also been shown in the preliminary tests, the load carrying capacity of the joint depends primarily on the reinforcement cross section present in the failure section, i.e. in the teeth. However, the load-bearing capacity resulting from the reinforcement cross-section and the strength of the microreinforcement was not achieved. In addition to the geometric part of the joint that reduces the reinforcement

Versuchsserie Test series to investigate	Versuchsart Type of test	Versuchsparameter Experimental parameters
Tragfähigkeit Fuge Joint's bearing capacity	<ul style="list-style-type: none"> ■ Zugversuche Tensile tests ■ 4-Punkt-Biegeversuche Four-point bending tests ■ 3-Pkt.-Biegeversuche Three-point bending tests 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Flankenneigungswinkel Angle of inclination ■ Klebeflächenvorbehandlung Joint surface treatment
Tragfähigkeit Bewehrung Reinforcement's bearing capacity	<ul style="list-style-type: none"> ■ Zugversuche Tensile tests 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Flankenneigungswinkel Angle of inclination ■ Zahnlänge Tooth length ■ Bewehrungsgehalt Reinforcement content

Table 4: Übersicht der Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen [3] | Table 4: Overview of tests on finger joints [3]

den Zähnen – vorhandenen Bewehrungsquerschnitt ab. Die sich aus dem Bewehrungsquerschnitt und der Festigkeit der Mikrobewehrung ergebende Tragfähigkeit wurde jedoch nicht erreicht. Zusätzlich zu dem geometrischen, den Bewehrungsquerschnitt mindernden Anteil der Fuge gibt es einen weiteren, die Tragfähigkeit mindernden Einfluss, den es im Hinblick auf ein Bemessungskonzept zu berücksichtigen gilt. In einer weiteren Versuchsserie wurden daher, die Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit bei Keilzinkenverbindungen im gerissenen Zustand, also für den Fall, dass nur die Bewehrung trägt (Zustand II), untersucht.

Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 4 aufgeführt (s. a. Bild 5). Neben der Art der Beanspruchung wurden der Flankenneigungswinkel, die Zahnlänge, die Art der Klebeflächenvorbehandlung sowie der Bewehrungsgehalt variiert. Bei den Vierpunktbiegeversuchen wurden außer-

cross-section, there is a further influence that reduces the load-bearing capacity, which must be taken into account with regard to a design concept. In a further test series, the influencing factors on the load-bearing capacity of finger joints in the cracked state, i.e. in the case that only the reinforcement carries (state II), were therefore investigated.

The test program is listed in Table 4 (see also Fig. 5). In addition to the type of loading, the flank inclination angle, tooth length, type of bonding surface pre-treatment and reinforcement content were varied. In the four-point bending tests, three reference tests without joint were also carried out.

In the general investigations on the load-bearing capacity of finger joints, the joint geometry (see Fig. 6) was produced with a corresponding formwork in the case of tests with a smooth

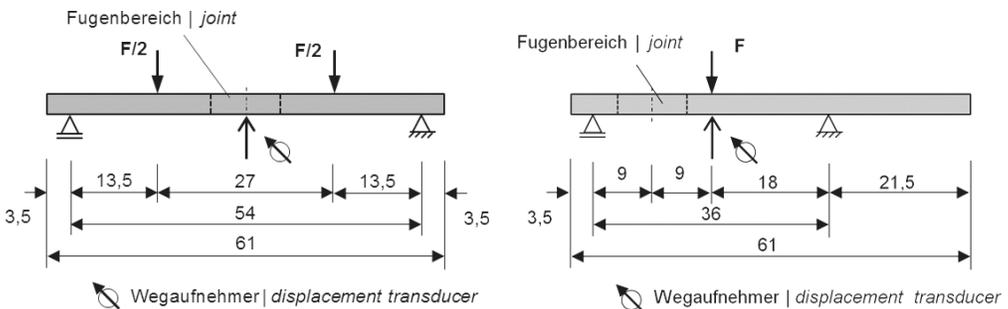


Bild 5: Versuchsaufbau und Systemabmessungen der Vierpunktbiegeversuche (links) und der Dreipunktbiegeversuchen (rechts) | Fig. 5: Test set-up at the four point bending tests (left) and at the three point bending tests (right)

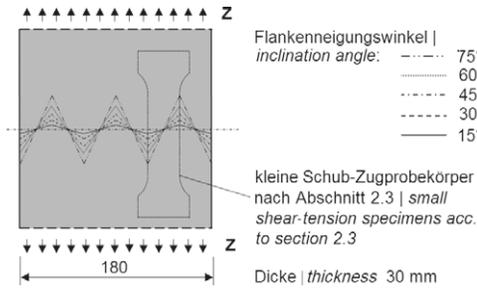


Bild 6: Fugengeometrien der für die Fugentragfähigkeitstests eingesetzten Probekörper | **Fig. 6:** Test specimens used for the investigations on the joint bearing capacity

dem drei Referenzversuche ohne Fuge durchgeführt.

Bei den allgemeinen Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen wurde im Falle der Versuche mit schalglatter und mit feststoffgestrahlter Klebefläche die Fugengeometrie (s. Bild 6) mit einer entsprechenden Schalung hergestellt. Als Beton kam hier der HPC-3 mit 2,0 Vol.-% Mikrostahtfasern zum Einsatz. Für die anderen Versuche wurde die Fugengeometrie mittels Hochdruckwasserstrahlschneidtechnik in die 30 mm dicken und mit 18 Lagen Mikrobewehrung (effektiver Bewehrungsgehalt in den Fugen $V_{eff} = 3,7\%$) versehenen Platten aus HPC-2 geschnitten.

Das Versuchsprogramm zur Untersuchung der Tragfähigkeit von Keilzinkenverbindungen im gerissenen Zustand sah Zugversuche an Keil-

and solid-blasted adhesive surface. The concrete used here was HPC-3 with 2.0% by volume micro steel fibres. For the other tests, the joint geometry was cut using high-pressure water jet cutting technology into the plates of HPC-2 with a thickness of 30 mm and 18 layers of micro-reinforcement (effective reinforcement content in the joints $V_{eff} = 3.7\%$).

The test program for investigating the load carrying capacity of finger joints in cracked condition included tensile tests on finger joints with flank inclination angles of 65°, 75° and 85° and tooth lengths of 60 mm and 90 mm. The specimens were provided with ten layers of micro-reinforcement ($V_{eff} = 2.1\%$). Here, too, the joint geometry was cut into 30 mm thick plates of HPC-2 using high-pressure water jet cutting technology. In these tests, the adhesive layer thickness was generally 2 mm. The adhesive used here was HFL. A more detailed description of the tests can be found in [3].

The tests have shown that the load-bearing behaviour depends primarily on the size of the flank inclination angle, the tooth length, the type of adhesive surface preparation and the degree of reinforcement of the components. The adhesive used also has an influence. However, this was not investigated during the tests. There are no significant differences in the load-bearing behaviour due to the type of loading (see Fig. 7).

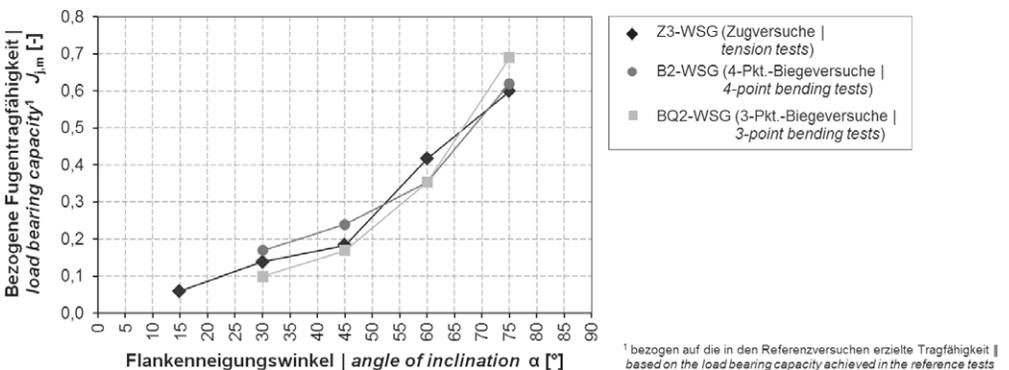


Bild 7: Bezogene Fugentragfähigkeit bei reiner Zugbeanspruchung, reiner Biegebeanspruchung und kombinierter Biege-Querkraftbeanspruchung in Abhängigkeit des Flankenneigungswinkels | **Fig. 7:** Load bearing capacity based on the load bearing capacity in the reference tests under tensile stress, bending stress and combined bending-shear stress depending on the angle of inclination

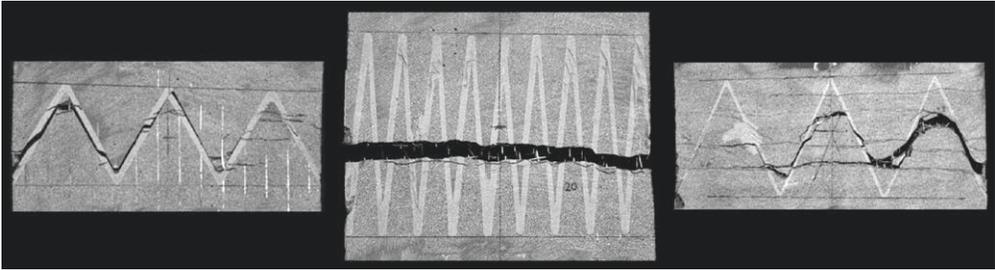


Bild 8: Fugenversagen (links), Bewehrungsversagen (Mitte) und kombiniertes Versagen (rechts) | **Fig. 8:** Failure of the joint (left), the reinforcement (middle) and combined failure (right)

zinkenverbindungen mit Flankenneigungswinkeln von 65° , 75° und 85° und Zahnlängen von 60 mm und 90 mm vor. Die Probekörper waren mit zehn Lagen Mikrobewehrung ($V_{\text{eff}} = 2,1\%$) versehen. Auch hier wurde die Fugengeometrie mittels Hochdruckwasserstrahlsschneidtechnik in 30 mm dicke Platten aus HPC-2 geschnitten. Bei diesen Tests betrug die Klebschichtdicke generell 2 mm. Als Klebstoff wurde hier der HFL eingesetzt. Eine ausführlichere Beschreibung der Versuche findet sich in [3].

In den Versuchen hat sich gezeigt, dass das Tragverhalten in erster Linie von der Größe des Flankenneigungswinkels, der Zahnlänge, der Art der Klebeflächenvorbereitung sowie vom Bewehrungsgrad der Bauteile abhängt. Einen Einfluss hat außerdem auch der verwendete Klebstoff. Dies wurde jedoch im Rahmen der Versuche nicht untersucht. Aus der Art der Beanspruchung ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede in Bezug auf das Tragverhalten (s. Bild 7).

Das Versagen lässt sich vereinfachend in Fugen- und Bewehrungsversagen sowie eine Kombination beider Versagensarten unterteilen (Bild 8). Bei letzterem handelt es sich um eine Sonderform des Bewehrungsversagens mit einem ähnlichen Tragverhalten. Unter der Voraussetzung, dass die Bauteile ausreichend bewehrt sind, lässt sich sowohl für den Fall eines reinen Bewehrungsversagens als auch für ein kombiniertes Versagen das Tragverhalten als duktil einstufen. Das Fugenversagen ist durch einen schlagartigen Lastabfall sowie eine große Streu-

Failure can easily be divided into joint and reinforcement failure and a combination of both failure types (Fig. 8). The latter is a special form of reinforcement failure with a similar load-bearing behaviour. Provided that the components are sufficiently reinforced and that a minimum reinforcement is maintained, the load-bearing behaviour can be classified as ductile both in the case of a pure reinforcement failure and of a combined failure. Joint failure is characterised by an abrupt drop in the load and a wide variation in the load-bearing capacity. Under tensile stress as well as under pure bending and combined bending-shear stress, joint failure occurred in the tests with a flank inclination angle of up to 60° , whereas combined failure was generally observed at angles of 75° and above.

As it can be seen in Fig. 9, in the event of a joint failure, the load carrying capacity of the finger joints was significantly lower than the load calculated using equation (1). This is probably due to scale effects. Apparently, the dimensions of the adhesive joint and the thickness of the adhesive layer have an influence on the joint strength. The fracture criterion determined on small-format shear-tensile test specimens is not easily transferable to finger joints for large components.

The load-bearing behaviour of finger joints in state II depends decisively on the degree of reinforcement and the joint geometry. The effective reinforcement cross-section V_{eff} in the failure crack is primarily decisive for the load-bearing capacity.

ung der Tragfähigkeit gekennzeichnet. Sowohl unter Zugbeanspruchung als auch unter reiner Biege- und kombinierter Biege-Querkraftbeanspruchung kam es in den Versuchen mit einem Flankenneigungswinkel bis einschließlich 60° zu einem Fugenversagen, während bei Winkeln ab 75° allgemein ein kombiniertes Versagen zu verzeichnen war.

Wie in Bild 9 zu erkennen ist, war die Tragfähigkeiten der Keilzinkenverbindungen im Falle eines Fugenversagens deutlich geringer als die mit Gl. (1) berechnete Traglast. Verantwortlich hierfür sind vermutlich Maßstabeffekte. Offenbar haben die Abmessungen der Klebfuge sowie die Klebschichtdicke Einfluss auf die Fugenfestigkeit. Das an kleinformatischen Schub-Zugproben ermittelte Bruchkriterium ist nicht ohne Weiteres auf Keilzinkenverbindungen bei Großbauteilen übertragbar.

Das Tragverhalten von Keilzinkenverbindungen im Zustand II hängt ganz entscheidend vom Bewehrungsgrad sowie der Fugengeometrie ab. Für die Tragfähigkeit ist in erster Linie der im Versagensriss liegende effektive Bewehrungsquerschnitt V_{eff} maßgebend.

Weiterhin gibt es andere Faktoren, die zu einer Verminderung der Tragfähigkeit im Vergleich zum ungestörten Bauteilquerschnitt beitragen. Eine entscheidende Rolle spielt hier der (rein geometrische) Anteil der Fugenfläche am Bauteilquerschnitt. Dieser hängt von der Fugendicke, dem Flankenneigungswinkel sowie der Zahnlänge ab. Bei kurzen Zähnen und steilen Flankenneigungswinkeln ist der Flächenanteil der Fugenfläche am Bauteilquerschnitt entsprechend hoch.

Zu einer Verminderung der Tragfähigkeit trägt außerdem bei, dass im Randbereich zur Fuge hin die Bewehrungsdrähte nicht ausreichend im Beton verankert sind (s. Bild 10). Im Versagensriss kann aus diesem Grund nicht der volle, theoretisch vorhandene Bewehrungsquerschnitt aktiviert werden.

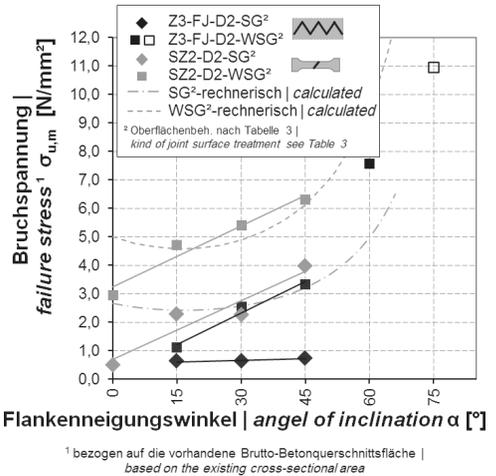


Bild 9: Vergleich der Zugversuche an Keilzinkenverbindungen mit den Schub-Zugversuchen | Fig. 9: Comparison of the tensile tests on finger joints with the shear-tensile tests

Furthermore, there are other factors which contribute to a reduction of the load carrying capacity in comparison to the undisturbed component cross-section. The (purely geometric) share of the joint surface in the component cross-section plays a decisive role here. This depends on the joint thickness, the flank inclination angle and the tooth length. In the case of short teeth and steep flank angles, the area proportion of the joint surface at the component cross-section is correspondingly high.

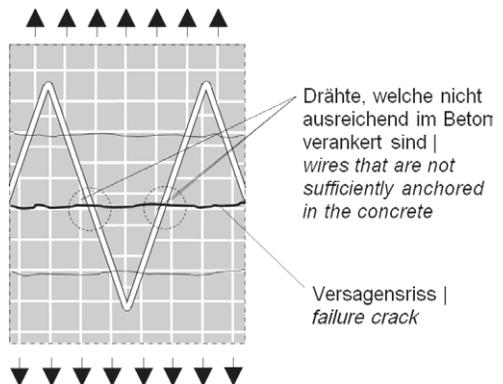


Bild 10: Verminderung der wirksamen Querschnittsfläche der Längsbewehrung infolge von nicht ausreichend im Beton verankerten Längsdrähten | Fig. 10: Reduction of the effective cross-sectional area of the longitudinal reinforcement due to insufficiently anchored longitudinal wires in the concrete

2.5 Bemessungsansatz für die untersuchten Keilzinkenverbindungen

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde in einem letzten Schritt ein Bemessungskonzept für zugbeanspruchte, biegebeanspruchte sowie biege-querkraftbeanspruchte Keilzinkenverbindungen entwickelt und in [2] und [3] bereits veröffentlicht. Hierbei wird zwischen zwei Versagenszuständen unterschieden: einem Fugenversagen und einem Bewehrungsversagen.

Mit Hilfe von entsprechenden Bemessungsgleichungen lässt sich die Fugentragfähigkeit in Abhängigkeit des Flankenneigungswinkels und der Zahnlänge ermitteln. Der Klebstoff oder auch die Art der Klebflächenvorbereitung werden hier über einen Nachweis der Haftzugfestigkeit berücksichtigt. Für den konkreten Anwendungsfall gilt es, am Bauteil eine charakteristische Haftzugfestigkeit $f_{\text{ctk,surf}}$ von 2,3 N/mm einzuhalten.

Was den Bemessungszustand „Bewehrungsversagen“ angeht, wurden Formeln entwickelt, mit denen sich der bei Keilzinkenverbindungen im Fugenbereich wirksame effektive Bewehrungsgehalte $V_{\text{eff,j}}$ in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussgrößen bestimmen lassen. Daraus kann die Tragfähigkeit der Verbindung mit vorhandenen Bemessungsmodellen für mikrobewehrten Hochleistungsbeton ermittelt werden.

Detaillierte Informationen sind in [3] zu finden.

3 Simulationsgestützte Optimierung der Klebefugengeometrie (Team Andrä)

3.1 Einführung

Das grundsätzliche Problem beim Verkleben mit einem hochfesten mineralischen Mörtel ist die Übertragung von Zugspannungen, da das Material eine relativ kleine Zugfestigkeit besitzt. Während die Zugfestigkeit von Platten durch unterschiedliche Varianten von Beweh-

The fact that the reinforcement wires are not sufficiently anchored in the concrete in the edge area towards the joint also contributes to a reduction in the load-bearing capacity (see Fig. 10). For this reason, the full, theoretically existing reinforcement cross-section cannot be activated in the failure crack.

2.5 Design approach for the finger joints investigated

Based on the knowledge gained, a design concept for finger joint connections subjected to tensile, flexural and combined flexural and shear stresses was developed in a final step and already published in [2] and [3]. A distinction is made between two failure states: a joint failure and a reinforcement failure.

With the help of corresponding design equations, the joint bearing capacity can be determined as a function of the flank inclination angle and the tooth length. The adhesive or the type of adhesive surface pretreatment are taken into account here by verifying the adhesive tensile strength. For the specific application, a characteristic adhesive tensile strength $f_{\text{ctk,surf}}$ of 2.3 N/mm must be maintained on the component.

For the design condition „reinforcement failure“, formulas have been developed with which the effective reinforcement content $V_{\text{eff,j}}$ in the joint area of finger joints can be determined as a function of the various influencing variables. From this, the bearing capacity of the joint can be determined using existing design models for microreinforced high-performance concrete.

Detailed information can be found in [3].

3 Simulation-supported optimization of the adhesive joint geometry (team Andrä)

3.1 Introduction

The basic problem concerning glueing with a high-strength mineral mortar is the transmis-

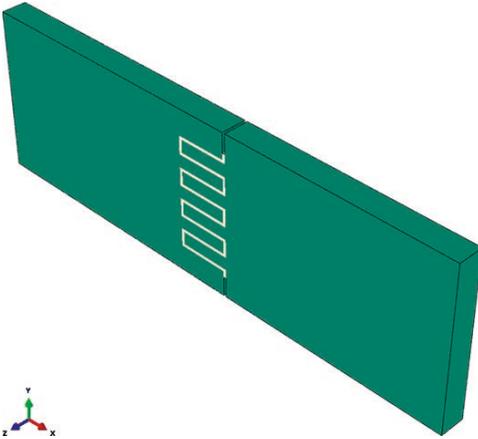


Bild 11: Skizze einer Fuge mit rechteckigen Zähnen | **Fig. 11:** Schematic of a joint with rectangular interface

rungen erhöht werden kann, werden hier keine Verstärkungen einbezogen, die die Klebefuge überbrücken. Es werden Fugen mit Zähnen betrachtet, um die aufgetragenen Zugspannungen als Schubspannungen zu übertragen (Bild 11). Sowohl experimentelle als auch numerische Simulationsergebnisse sind in [11] zu finden. Der in den Simulationen betrachtete RPC-Klebstoff besitzt einen leicht geringeren E-Modul von 36 GPa als die Platte mit einem effektiven E-Modul von 39 GPa.

Zur Bewertung und Optimierung von Klebverbindungen von HPC-Platten sind genaue Spannungsanalyseverfahren notwendig. Durch die unterschiedliche Steifigkeit der HPC-Platte und des RPC-Klebers entstehen unetwige Verzerrungsfelder an der Grenzfläche zwischen Fuge und Platte. Da die Grenzfläche fast immer die geringste Festigkeit besitzt (s. Bild 15), müssen zur Vorhersage der Tragfestigkeit die Verzerrungen bzw. Spannungen an der Grenzfläche genau berechnet werden.

Um die unetwigen Verzerrungs- und Spannungsfelder mit standardmäßiger Finite-Elemente-Methode (FEM) genau zu erfassen, ist es notwendig, randangepasste Netze zu generieren (d. h. Netze, bei denen die Materialgrenzen mit Elementseitenflächen zusammenfallen). Dies stellt für eine größere Menge von Fugen-

sion of tensile stresses, as the material has a relatively low tensile strength. While the tensile strength of plates can be increased by different types of reinforcement, here no reinforcements are included that bridge the adhesive joint. Joints with teeth are considered in order to transfer the applied tensile stresses as shear stresses (Fig. 11). Both experimental and numerical simulation results can be found in [11]. The RPC adhesive considered in the simulations has a slightly lower modulus of elasticity of 36 GPa than the plate with an effective modulus of elasticity of 39 GPa.

For the evaluation and optimization of bonded joints of HPC plates, precise stress analysis methods are necessary. Due to the different stiffness of the HPC plate and the RPC adhesive, discontinuous distortion fields occur at the interface between the joint and the plate. Since the boundary surface almost always has the lowest strength (see Fig. 15 in section 3.4), the distortions or stresses at the boundary surface must be precisely calculated in order to predict the bearing strength.

To accurately capture the discontinuous distortion and stress fields using the standard Finite Element Method (FEM), it is necessary to generate boundary aligned meshes (i.e. meshes where the material boundaries coincide with element side faces). This represents a considerable effort for a large number of joint shapes that need to be analysed during iterative optimization. Furthermore, finite elements with very small acute or large obtuse angles occur in boundary aligned meshes, which lead to a poor approximation of the solution. These two disadvantages are avoided with the extended finite element method (XFEM) [12]–[14]: discontinuities within a finite element are detected by means of additional “test and trial” functions.

A combination of topology and shape optimization can be used to optimize the structure of bonded joints for reinforced and non-reinforced plates. This starts with topology optimization in order to roughly calculate the optimum joint shape. With the help of the so-called

verlaufen, die bei einer iterativen Optimierung analysiert werden müssen, einen erheblichen Aufwand dar. Weiterhin treten bei randangepassten Netzen finite Elemente mit sehr kleinen spitzen oder großen stumpfen Winkeln auf, die zu einer schlechten Approximation der Lösung führen. Diese beiden Nachteile werden bei der erweiterten Finite-Elemente-Methode (*extended finite element method*, XFEM) [12]–[14] vermieden: Unstetigkeiten innerhalb eines finiten Elements werden mit Hilfe zusätzlicher Ansatzfunktionen erfasst.

Zur Strukturoptimierung von Klebverbindungen für bewehrte und nicht bewehrte Platten kann eine Kombination von Topologie- und Shape-Optimierung verwendet werden. Begonnen wird dabei mit der Topologieoptimierung, um die optimale Fugengestalt grob zu berechnen. Mit Hilfe des sogenannten topologischen Gradienten, der auch für elastische anisotrope Materialien (z. B. bewehrte Strukturen) berechenbar ist, lässt sich ein effizientes Verfahren zur Topologieoptimierung umsetzen [15]. Im Anschluss wird die optimale Lösung der Topologieoptimierung als Ausgangspunkt für die Shape-Optimierung genommen. Bei der Shape-Optimierung wird die Mittellinie der Fuge parametrisiert. Danach wird eine *Signed-Distance*-Funktion als *Level-Set*-Funktion [16]–[18] eingeführt, um die Grenzflächen zwischen Platte und Klebeschicht zu beschreiben. Diese *Level-Set*-Funktion geht direkt in die zusätzlichen Ansatzfunktionen der XFEM ein. Sowohl bei der Topologie- als auch bei der Shape-Optimierung wird das Konzept der *Level-Set*-Funktion zur impliziten Beschreibung der Grenzflächen benutzt.

3.2 Level-Set-Funktion zur Beschreibung der Fugengeometrie

Bei der Beschreibung der Fugengestalt wird eine periodische Zelle, die einen Zahn enthält, als Gebiet für die Berechnung gewählt (s. Bild 12). Zur Shape-Optimierung wird die Form der Zähne mit zwei Designvariablen A und B parametrisiert. Der Parameter A bestimmt die Neigung der Zahnflanken – $A = 0 \rightarrow$ dreieckförmiger Zahn,

topological gradient, which can also be calculated for elastic anisotropic materials (e.g. reinforced structures), an efficient procedure for topology optimization can be implemented [15]. Subsequently, the optimal solution for topology optimization is taken as the starting point for shape optimization. In shape optimization, the centre line of the joint is parameterized. A signed distance function is then introduced as a level set function [16]–[18] to describe the interfaces between the plate and the adhesive layer. This level set function is used directly in the additional XFEM trial functions. In both topology and shape optimization, the concept of the level set function is used to implicitly describe the interfaces.

3.2 Level set function to describe the joint geometry

In the description of the joint shape, a periodic cell containing a tooth is selected as the area for the calculation (see Fig. 12). The shape of the teeth is parameterized with two design variables A and B for shape optimization. The parameter A determines the inclination of the tooth flanks – $A = 0 \rightarrow$ triangular tooth, $A = 0.5 \rightarrow$ rectangular tooth –, the parameter B defines the „depth“ of the teeth.

Corners and edges in the course of the joint or at the material boundaries would lead to stress

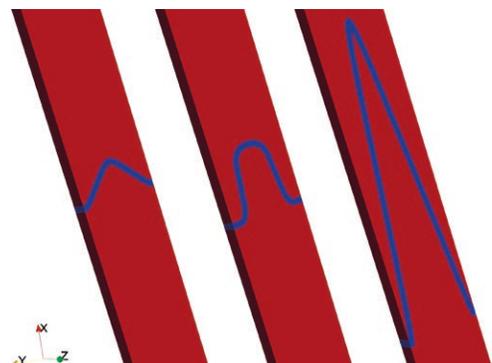


Bild 12: Modellierung der Fugengeometrie (blau: Betonfuge, rot: HPC-Platte); von links nach rechts: $A = B = 0,1$; $A = 0,4$ und $B = 0,2$ sowie $A = 0,1$ und $B = 0,9$ | **Fig. 12:** Model of the geometry of the joint (blue: cohesive joint, red: HPC-plate); from left to right: $A = B = 0,1$; $A = 0,4$ and $B = 0,2$ and $A = 0,1$ and $B = 0,9$

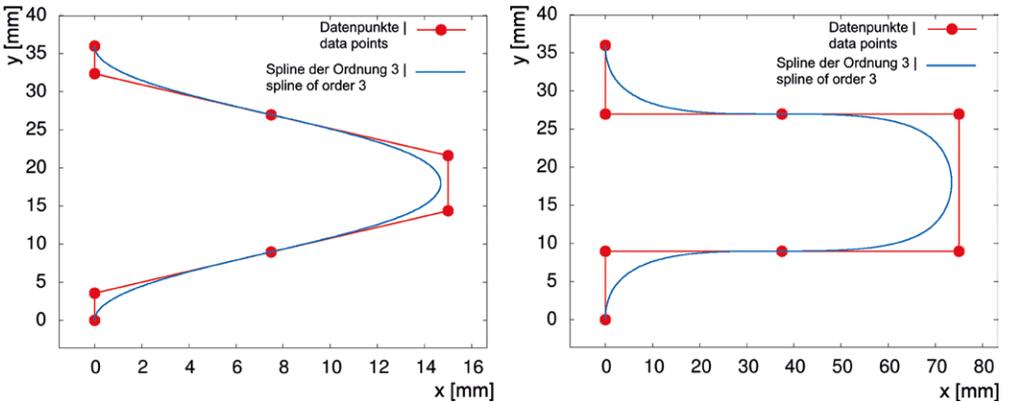


Bild 13: Kontrollpunkte und Splines 3. Ordnung; links: für die Parameter $A = 0,2$ und $B = 0,1$; rechts: $A = B = 0,5$ | **Fig. 13:** Control points and third order splines; on the left: for the parameters $A = 0.2$ and $B = 0.1$; on the right: $A = B = 0.5$

$A = 0,5 \rightarrow$ rechteckiger Zahn –, der Parameter B definiert die „Tiefe“ der Zähne.

Ecken und Kanten im Fugenverlauf bzw. an den Materialgrenzen würden zu Spannungskonzentrationen führen. Diese Spannungskonzentrationen verursachen dann Mikrorisse und schließlich Risse, die entweder entlang der Grenzfläche oder senkrecht zur Belastungsrichtung wachsen. Folglich müssen bei der Optimierung der Fugendgestalt Ecken und Kanten ausgeschlossen werden. Dazu werden glatte B-Splines eingesetzt. Aus den Designparametern A und B werden automatisch die Kontrollpunkte (rote Punkte in Bild 13) der B-Splines berechnet. Die entsprechenden B-Splines sind als blaue Kurven in Bild 13

concentrations. These stress concentrations then cause microcracks and finally cracks, which either grow along the boundary surface or perpendicular to the direction of loading. Consequently, corners and edges must be excluded when optimizing the joint shape. Smooth B-splines are used for this purpose. From the design parameters A and B , the control points (red points in Fig. 13) of the B-splines are automatically calculated. The corresponding B-splines are shown as blue curves in Fig. 13. They define the middle surfaces of the mortar joints. B-Splines of order 2 or 3 as well as a different number of control points were considered. A 3rd order B-spline and 8 control points are well suited to measure the desired inclination of the tooth flanks.

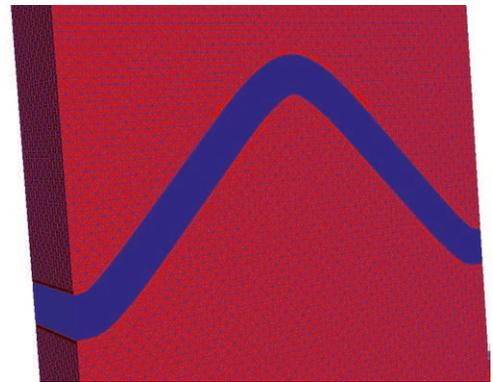
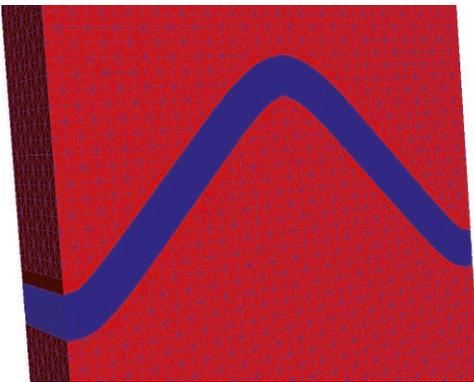


Bild 14: FE-Netze; links grobes und rechts feines Tetraedernetz (jeweils ohne angereicherte Elemente) | **Fig. 14:** Finite element meshes; fine (left) and coarse tetrahedral mesh (without enriched elements)

dargestellt. Sie definieren die Mittelflächen der Mörtelfugen. Es wurden B-Splines 2. und 3. Ordnung sowie jeweils verschieden viele Kontrollpunkte betrachtet. Ein B-Spline 3. Ordnung und 8 Kontrollpunkte sind gut geeignet, um die gewünschte Neigung der Zahnflanken gut zu erfassen.

Die gesamte Struktur wird als FE-Netz mit regelmäßigen Tetraederelementen diskretisiert. Zur Analyse der Genauigkeit werden zwei Netzfeinheiten betrachtet. In Bild 14 (links) wird das grobe und in Bild 14 (rechts) das feine Netz mit jeweils regelmäßigen Tetraederelementen gezeigt. Die Tetraeder an der Materialgrenze (Interface) sind ausgeblendet. Zur Berechnung der Level-Set-Funktion wird für jeden Knotenpunkt des FE-Netzes der Abstand zur Mittelfläche, die mittels des B-Splines definiert ist, berechnet. Schließlich wird vom Abstand die halbe Fugenbreite subtrahiert. Das Ergebnis ist eine diskrete *Signed-Distance-Funktion*, die Null auf den Materialgrenzflächen ist, negativ in der Klebefuge (blau) und positiv im Plattenmaterial (rot). Diese verschobene Abstandsfunktion wird als (diskrete) Level-Set-Funktion genommen.

3.3 XFEM zur Approximation von Sprüngen in den Verzerrungen

Für die FE-Diskretisierung werden die gleichen regelmäßigen Netze wie für die Diskretisierung der Level-Set-Funktion verwendet (s. Bild 14). Die linearen Ansatzfunktionen werden in den Tetraederelementen, die eine Materialgrenze enthalten, durch zusätzliche Ansatzfunktionen angereichert, wobei die entsprechenden zusätzlichen Freiheitsgrade den Eckknoten des jeweiligen Tetraederelements zugeordnet werden. In die Berechnung der zusätzlichen Ansatzfunktionen bei der Assemblierung des FE-Systems geht die Level-Set-Funktion direkt ein. Die Einzelheiten der Methode sind in [19] ausführlich beschrieben. Wenn der Abstand eines Knotenpunktes zu einer Grenzfläche sehr klein ist, führt dies zu einem linearen Gleichungssystem mit einer großen Konditionszahl [19], was die Gleichungslösung erheblich erschwert. Direkte Lösungsverfahren liefern bei großen

The entire structure is discretized by using a finite element mesh with regular tetrahedral elements. For the analysis of the accuracy, two mesh sizes are considered. Fig. 14 (left) shows the coarse mesh and Fig. 14 (right) the fine mesh with regular tetrahedral elements. The tetrahedra at the material boundary (interface) are hidden. To compute the level set function, the distance to the center plane defined by the B-spline is calculated for each node of the FEM mesh. Finally, half the joint width is subtracted from the distance. The result is a discrete signed distance function, which is zero on the material interfaces, negative in the adhesive joint (blue) and positive in the plate material (red). This shifted distance function is taken as a (discrete) level set function.

3.3 XFEM for the approximation of leaps in the distortions

The same regular meshes are used for the FE discretization as for the discretization of the level set function (see Fig. 14). The linear test and trial functions are enriched in the tetrahedral elements, which contain a material boundary, by additional shape functions, whereby the corresponding additional degrees of freedom are assigned to the corner nodes of the respective tetrahedral element. The level set function is directly included in the calculation of the additional shape functions during the assembly of the FE system. The specifics of the method are described in detail in [19]. If the distance of a node to an interface is very small, this leads to a linear system of equations with a large condition number [19], which makes the solution considerably more difficult. Direct solution methods provide inaccurate solutions for large condition numbers and iterative methods require a large number of iterations. Therefore, nodes with a small distance to the boundary surface are shifted in such a way that the distance is sufficiently large afterwards. Although this local mesh modification requires additional computational effort, it considerably increases the robustness of the method. The algorithm for node shifting is explained in [19].

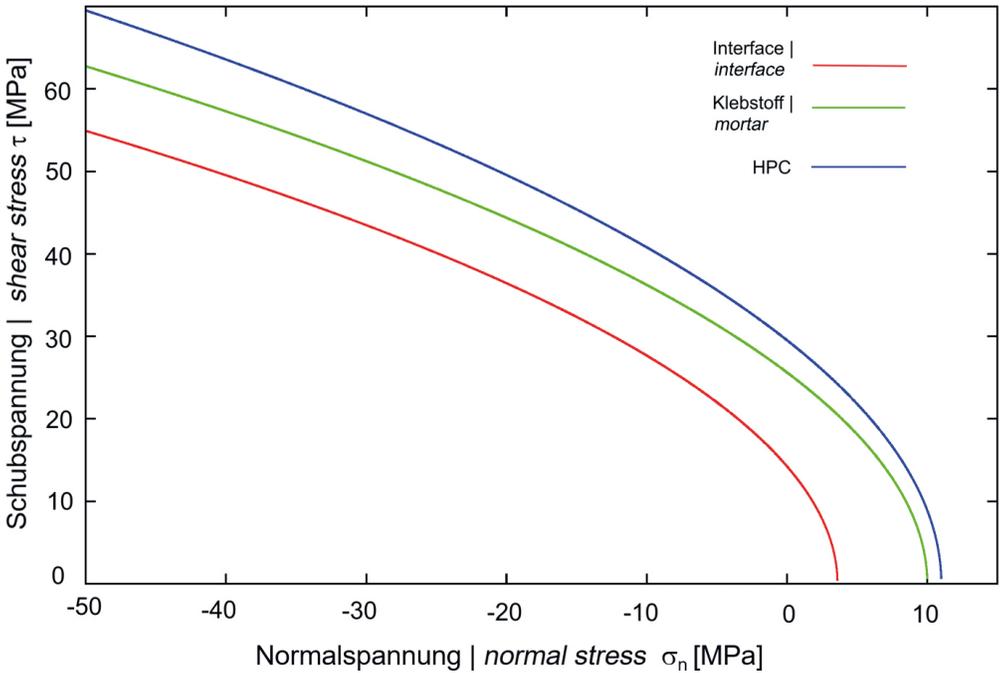


Bild 15: Versagensfläche für die HPC-Platte, den Fugenmörtel und das Interface zwischen Platte und Fuge | Fig. 15: Failure surface for the HPC plate, the mortar and the plate-joint interface

Konditionszahlen ungenaue Lösungen und iterative Verfahren benötigen eine große Anzahl von Iterationen. Deshalb werden Knotenpunkte mit einem kleinen Abstand zur Grenzfläche so verschoben, dass anschließend ein hinreichend großer Abstand vorhanden ist. Diese lokale Netzmodifikation erfordert zwar einen zusätzlichen Rechenaufwand, erhöht aber die Robustheit des Verfahrens erheblich. Der Algorithmus zur Knotenverschiebung wird in [19] erläutert.

3.4 Simulationsergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden messtechnisch die Versagensflächen für HPC-Platten, den RPC-Klebstoff und die Grenzschicht zwischen beiden Materialien bestimmt (s. Bild 15) [11]. Daraus lässt sich eine verallgemeinerte Vergleichsspannung als Funktion des dreidimensionalen Spannungstensors und eine Versagensspannung in Analogie zur Fließspannung herleiten. Weiterhin wurde auf Basis der Versagensfläche (Bild 15) ein Schädigungsmodell entwickelt. In Bild 16 ist das Schädigungsmodell für die Grenzschicht

3.4 Results of simulations

Within the scope of the project, the failure surfaces for HPC plates, the RPC adhesive and the interface between the two materials were determined (see Fig. 15) [11]. From this, a generalized equivalent stress can be derived as a function of the three-dimensional stress tensor and a failure stress in analogy to yield stress. Furthermore, a damage model was developed on the basis of the failure surface (Fig. 15). Fig. 16 visualizes the damage model for the boundary layer. In the stress space, the undamaged area is marked blue and the area leading to complete failure is marked red. If one approaches the failure area in the stress space from the undamaged (blue) area, damage already starts to evolve before reaching the failure area.

The damage is of course a monotonously growing function, which is irreversible and does not become smaller again when relieved. In this specific case, the effective modulus of elasticity of the plate is 39 GPa, the modulus of elastic-

visualisiert. Im Spannungsraum sind der nicht geschädigte Bereich blau und der Bereich, der zum vollständigen Versagen führt, rot markiert. Wenn man sich im Spannungsraum vom nicht geschädigten (blauen) Bereich an die Versagensfläche annähert, beginnt bereits vor Erreichen der Versagensfläche eine kontinuierliche Schädigung.

Die Schädigung ist natürlich eine monoton wachsende Funktion, die irreversibel ist und bei Entlastung nicht wieder kleiner wird. Im konkreten Fall beträgt der effektive E-Modul der Platte 39 GPa, der E-Modul des RPC-Klebers 36 GPa und die Querkontraktionszahl jeweils 0,2. Als Last wird eine Nennspannung von 3,7 MPa in x-Richtung angenommen. Im gesamten Bereich der Fuge bzw. des Klebers wird die Festigkeit der Grenzschicht angesetzt. Mit der beschriebenen Methode (XFEM) wird die verallgemeinerte Vergleichsspannung berechnet. Für drei verschiedene Fugenverläufe wird die Differenz aus Versagensspannung und Vergleichsspannung in Bild 17 visualisiert. In der Platte ist diese Differenz sehr groß, d. h., dass die Vergleichsspannung viel kleiner als die Versagensspannung ist. In der Fuge wird dagegen die Versagensspannung fast erreicht.

Die Differenz aus Versagensspannung und Vergleichsspannung variiert in Bild 17 links und Mitte stärker und weist bei diesen Fugenverläufen kleinere Minimalwerte als bei der Fugengestalt

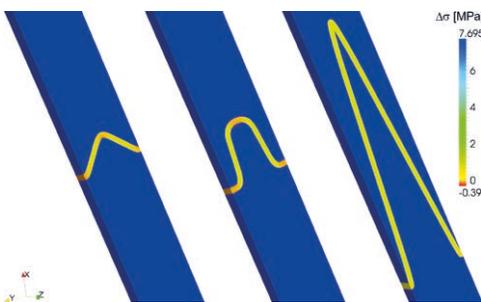


Bild 17: Differenz aus Versagens- und Vergleichsspannung (Nennspannung jeweils 3,7 MPa); von links nach rechts: $A = B = 0,1$; $A = 0,4$ und $B = 0,2$; $A = 0,1$ und $B = 0,9$; kleine bzw. negative Werte sind ungünstig | **Fig. 17:** Difference between failure stress and equivalent stress (applied stress 3.7 MPa); from left to right: $A = B = 0,1$, $A = 0.4$ and $B = 0.2$; $A = 0.1$ and $B = 0.9$; small and negative values are critical

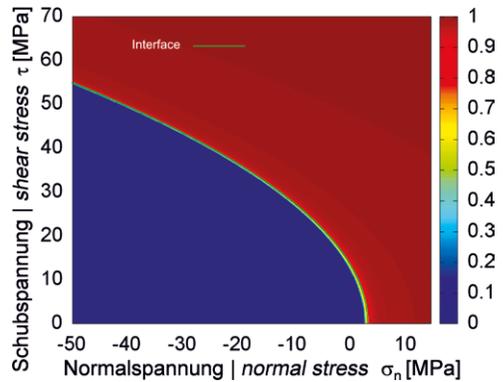


Bild 16: Schädigungsmodell für die Versagensfläche des Interfaces (blau: keine Schädigung, rot: Versagen) | **Fig. 16:** Damage model for the failure surface at the interface (blue: intact, red: failed)

ty of the RPC adhesive is 36 GPa and the Poisson's ratio is 0.2. A nominal stress of 3.7 MPa in the x-direction is assumed as the load. The strength of the boundary layer is applied in the entire area of the joint or adhesive. The method described (XFEM) is used to calculate the generalized equivalent stress. For three different joint shapes, the difference between failure stress and reference stress is visualized in Fig. 17. In the plate, this difference is very large, i.e. the equivalent stress is much smaller than the failure stress. In the joint, on the other hand, the failure stress is almost reached.

The difference between failure stress and equivalent stress varies more strongly in Fig. 17 left and centre and shows smaller minimum values for these joint shapes than for the joint shape on the right in Fig. 17. Consequently, this joint has the most favourable shape of all the examples shown in Fig. 17. The simulation results agree qualitatively with corresponding experiments [6]. Very precise simulation methods are necessary to compute the relatively small differences in the stress curves resulting from the small difference in the modulus of elasticity.

3.5 Regarding optimization of the joint geometry

Suitable gradient methods have been developed for the efficient solution of structural optimization problems. For the topology opti-

rechts in Bild 17 auf. Folglich besitzt diese Fuge die günstigste Gestalt aller in Bild 17 gezeigten Beispiele. Die Simulationsergebnisse stimmen qualitativ mit entsprechenden Experimenten [7] überein. Es sind sehr präzise Simulationsverfahren notwendig, um die relativ kleinen Unterschiede in den Spannungsverläufen, die aus dem geringen Unterschied im E-Modul resultieren, zu berechnen.

3.5 Zur Optimierung der Fugegeometrie

Zur effizienten Lösung der Strukturoptimierungsprobleme sind geeignete Gradientenverfahren entwickelt worden. Für die Topologieoptimierung von Materialgrenzen wird der topologische Gradient in [15] erläutert. Die Shape-Optimierung wird auf eine Parameteroptimierung für die Designvariablen zurückgeführt, so dass der klassische Gradient verwendet werden kann. Hier werden jedoch die Parameter $0 \leq A \leq 0,5$ und $0 \leq B \leq 1,0$ auf einem regelmäßigen Netz diskretisiert und es wird für alle Knotenpunkte die Strukturanalyse durchgeführt, um die Robustheit der XFEM-basierten Methode zu testen. Die Zielfunktion ist nicht eindeutig, sondern kann vom Anwender geeignet gewählt werden.

Es werden hier zwei sinnvoll erscheinende Zielfunktionen als Beispiel betrachtet:

1. Minimum der Differenz aus Versagensspannung und Vergleichsspannung für eine Nennspannung von 3,7 MPa (Bild 18),
2. Notwendige Spannung für den Schädigungsbeginn (Bild 19).

Die optimale Lösung bzgl. der ersten Zielfunktion liegt offensichtlich bei $A = 0$ und $B = 1$, wo die Funktion ein Minimum hat. Die optimale Lösung bzgl. der 2. Zielfunktion liegt ebenfalls bei $A = 0$ und $B = 1$, nämlich dort, wo die Zielfunktion ein Maximum besitzt. Obwohl die beiden Zielfunktionen eine unterschiedliche Gestalt haben, ergibt sich die gleiche Optimallösung. Die Fuge, die in Bild 17 rechts dargestellt ist, liegt nahe am optimalen Fugenverlauf. Die Spannungsverteilung in der Fuge ist fast homogen.

mization of material boundaries the topological gradient is explained in [15]. The shape optimization is formulated as a parameter optimization for the design variables, so that the classical gradient can be used. However, here the parameters $0 \leq A \leq 0.5$ and $0 \leq B \leq 1.0$ are discretized on a regular network and the structural analysis is performed for all nodes in order to test the robustness of the XFEM-based method. The objective function is not unique, but can be chosen by the user.

Here, two seemingly useful objective functions are considered as examples:

1. Minimum of the difference between failure stress and equivalent stress for a nominal stress of 3.7 MPa (Fig. 18),
2. Necessary stress for the beginning of the damage (Fig. 19).

The optimal solution for the first objective function is obviously $A = 0$ and $B = 1$, where the function has a minimum. The optimal solution for the 2nd objective function is also $A = 0$ and $B = 1$, i.e. where the objective function has a maximum. Although the two objective functions are different, the same optimal solution is obtained. The joint shown in Fig. 17 on the right is close to the optimum. The stress distribution in the joint is almost homogeneous.

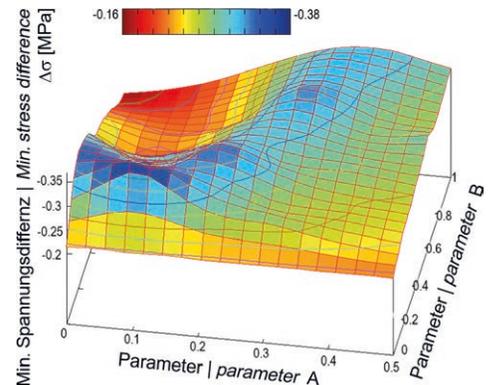


Bild 18: Minimum der Differenz aus Versagensspannung und Vergleichsspannung für eine Nennspannung von 3,7 MPa (blau: ungünstig, rot: optimal) | **Fig. 18:** Minimum of the difference between failure stress and equivalent stress for an applied stress of 3.7 MPa (blue: disadvantageous, red: optimal)

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt wurden von Beginn an experimentelle Arbeiten (Team Kohlmeier) mit mathematischen Simulations- und Optimierungsverfahren (Team Andrä) koordiniert und parallel durchgeführt. Dies erwies sich aus mehreren Gründen als vorteilhaft: Durch die qualitative Übereinstimmung von Messungen und Simulationen wurde relativ schnell ein gutes Verständnis für den Zusammenhang von Fugengestalt und Festigkeit erzielt. Die Versuche halfen, die Materialparameter für die Simulationen zu kalibrieren. Die Simulationsrechnungen führten zur Reduzierung des Versuchsaufwands.

Fazit Team Kohlmeier. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden erstmals Keilzinkenverbindungen im Hinblick auf eine Anwendung im Stahlbetonbau erforscht. In Verbindung mit zementgebundenen Klebstoffen handelt es sich hierbei um eine vielversprechende Fügetechnik für dünne Betonbauteile. Die Keilzinkenverbindung bringt neben einer entsprechend hohen Traglast weitere positive Eigenschaften mit sich: Wird der Flankenneigungswinkel steil genug gewählt, kommt es zu einem (als duktil einzustufenden) Versagen der Bewehrung im Fugenbereich. Dabei kann ein sprödes adhäsives Versagen der Grenzflächen durch eine entsprechende Bemessung sowie fachgerechte Ausführung der Verbindung ausgeschlossen werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse, was das Tragverhalten der mikrobewehrten Bauteile angeht, lassen sich unter Umständen auch auf faserbewehrte Bauteile übertragen. Insgesamt besteht aber noch weiterer Forschungsbedarf. Insbesondere den Bemessungsansatz gilt es weiterzuentwickeln.

Bei den Versuchen mit Stabstahlbewehrung wurde die höchste Tragfähigkeit erzielt. Für Anwendungsfälle, bei denen höhere Schnittkräfte übertragen werden sollen, sind Klebeverbindungen mit diskreter Bewehrung zu bevorzugen.

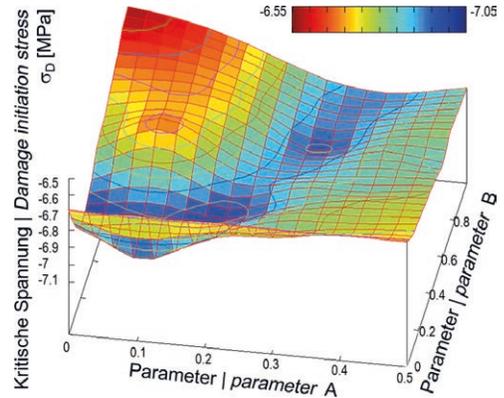


Bild 19: Notwendige Spannung für den Schädigungsbeginn | Fig. 19: Necessary stress for damage initiation

4 Summary and perspective

In the project, experimental work (Team Kohlmeier) with mathematical simulation and optimization methods (Team Andrä) were coordinated and carried out in parallel from the very beginning. This proved to be advantageous for several reasons: Due to the qualitative agreement of measurements and simulations, a good understanding of the relationship between joint shape and strength was achieved relatively quickly. The experiments helped to calibrate the material parameters for the simulations. The computer simulations led to a reduction of the testing effort.

Conclusions team Kohlmeier. Within the scope of the research project, finger joint connections were researched for the first time with regard to an application in reinforced concrete construction. In combination with cement-based adhesives, this is a promising joining technique for thin concrete components. Finger joints have further positive properties in addition to a correspondingly high load-bearing capacity: If the flank inclination angle is chosen steeply enough, the reinforcement in the joint area will fail ductilely. A brittle adhesive failure of the boundary surfaces can be excluded by appropriate design and professional execution of the joint.

Fazit Team Andrä. Bei der Shape-Optimierung von Klebefugen ist es sinnvoll, die XFEM zur Strukturanalyse einzusetzen, um die Spannungen und Verzerrungen im Fugenbereich genau zu berechnen und um aufwändige Neuvernetzungen in der Optimierungsschleife zu vermeiden. Bei der Topologie- und der Shape-Optimierung wird eine Level-Set-Funktion zur impliziten Beschreibung der unbekanntenen freien bzw. zu bestimmenden Materialgrenzen verwendet, so dass eine einheitliche Randbeschreibung bei der kombinierten Topologie- und Shape-Optimierung vorliegt. Die Bewegung dieser freien Ränder erfolgt nicht wie in der klassischen Level-Set-Methode über die Lösung der Hamilton-Jacobi-Gleichung, sondern mit der in [1] beschriebenen speziellen Projektionsmethode. Das Ergebnis der Shape-Optimierung für das hier betrachtete Beispiel der Übertragung von Zugspannungen ist, dass abgerundete dreieckförmige Zähne mit einer großen Tiefe am günstigsten sind.

Die entwickelten Methoden zur Strukturanalyse, Topologie- und Shape-Optimierung sind für beliebige Klebeverbindungen nutzbar. Die beteiligten Materialien können beliebige anisotrope Steifigkeitstensoren besitzen und es können beliebige Strukturlasten betrachtet werden. Für den Einsatz der Methode ist die messtechnische Bestimmung der Versagensflächen (s. Bild 4 und Bild 15) für das Plattenmaterial, den Kleber und die Grenzfläche notwendig. In dem hier beschriebenen Teilprojekt wurden nur Zugspannungen in Plattenebene (Scheibenprobleme) betrachtet. Die vorgeschlagene Methode kann jedoch auch zur Analyse sowohl allgemeinerer Lastfälle als auch für die Optimierung von Klebeverbindungen zwischen Schalenbauteilen eingesetzt werden.

The knowledge gained with regard to the load-bearing behaviour of microreinforced components can possibly also be transferred to fibre-reinforced components. Overall, however, there is still a need for further research. In particular, the design approach needs to be further developed.

In the tests with steel reinforcement bars, the highest load-bearing capacity was achieved. For applications in which higher internal forces are to be transferred, adhesive joints with discrete reinforcement may be preferred.

Conclusions team Andrä. When optimizing the shape of adhesive joints, it makes sense to use XFEM for structural analysis in order to precisely calculate stresses and strains in the joint area and to avoid time-consuming remeshing in the optimization loop. In topology and shape optimization, a level set function is used to implicitly describe the unknown material boundaries (or interfaces), so that a uniform boundary description is available for combined topology and shape optimization. The movement of these free boundaries is not done by the solution of the Hamilton-Jacobi equation as in the classical level set method, but by the special projection method described in [1]. The result of the shape optimization for the example of tensile load considered here is that rounded triangular teeth with a large depth are most favourable.

The methods developed for structural analysis, topology and shape optimization can be used for any adhesive joints. The materials involved can have any anisotropic stiffness tensor, and any structural load can be considered. For the application of the method, the measurement of the failure surfaces (see Fig. 4 and Fig. 15) for the plate material, the adhesive and the interface is necessary. In the subproject described here, only tensile stresses in the plate plane (disk problems) were considered. However, the proposed method can also be used for the analysis of more general load cases as well as for the optimization of glued joints between curved shell components.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198310759 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Acknowledgement

The authors thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (no. 198310759) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [3] Amstutz, S.; Andr , H.: A new algorithm for topology optimization using a level-set method. *Journal of Computational Physics* 216 (2006) 2, S. 573–588
- [4] Oster, S.; Kohlmeyer, C.: Die Keilzinkenverbindung als Fugetechnik im Stahlbetonbau. In: Breit, W.; Kurz, W.; Pan, M.; Sadegh-Azar, H.; Schnell, J.; Thiele, C. (Hrsg.): Beiträge zur 5. DAfStb-Jahrestagung mit 58. Forschungskolloquium, Band 2, 20.–21.09.2017 in Kaiserslautern, TU Kaiserslautern, 2017, Bd. 2, S. 22–33
- [5] Oster, S.: Keilzinkenverbindungen als Fugetechnik für dünne Bauteile aus mikrobewehrtem Hochleistungs-beton. Diss., TU Kaiserslautern, 2017
- [6] Mühlbauer, C.: Fugen von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton. Diss., TU München, 2012
- [7] Mühlbauer, C.; Zilch, K.: Glued Joints of Ultra High Performance Concrete Structures. In: Proc. of the 3rd Int. fib Congress and Exhibition, 29.05.–02.06.2010 in Washington D.C. (USA), Chicago: PCI, 2010, Beiträge auf CD-Rom publ., ID: 41, 13 S.
- [8] Hauser, S.: Hochfester Fasermattenbeton SIMCON neu/DUCON. Diss., TU Darmstadt, 1999
- [9] Oster, S.; Shklyar, I.; Andr , H.: Adhesive joints for structural elements of high performance concrete (HPC). In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 335–340
- [10] Kohlmeyer, C.; Oster, S.: Zugbeanspruchte Klebverbindungen für Platten- und Scheibenbauteile aus hochfestem Beton. In: Gebekken, N.; Bletzinger, K.-U.; Rothert, H. (Hrsg.): Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau 12/4, Universität der Bundeswehr München, 2012, S. 273–279
- [11] Oster, S.; Kohlmeyer, C.: Experimental investigations on a finger joint for structural elements of high performance concrete. In: Bastien, J.; Rouleau, N.; Fiset, M.; Thomassin, M. (Hrsg.): Proc. of the 10th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 21.–23.7.2014 am Research Centre on Concrete Infrastructure (CRIB) in Quebec City (Kanada), Québec, 2014, S. 315–320
- [12] Oster, S.; Kohlmeyer, C.: Untersuchungen zur Formulierung eines zweiaxialen Bruchkriteriums für Klebefugen zwischen Betonbauteilen In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07.–08.11.2013 in Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 59–64
- [13] Oster, S.; Kohlmeyer, C.: Versagenskurven f r HPC-Beton, RPC-Kleber und Grenzfläche. Pers. Mitteilung, 2014
- [14] Belytschko, T.; Black, T.: Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 45 (1999) 5, S. 610–620
- [15] Fries, T.; Belytschko, T.: The extended/generalized finite element method: An overview of the method and its applications. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 84 (2010) 3, S. 253–304
- [16] Moes, N.; Dolbow, J.; Belytschko, T.: A finite element method for crack growth without remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 46 (1999) 1, S. 131–150
- [17] Schneider, M.; Andr , H.: The topological gradient in anisotropic elasticity with an eye towards lightweight design. *Mathematical Methods in the Applied Sciences* 37 (2013) 11, S.1624–1641 – DOI: 10.1002/mma.2918
- [18] Osher, S.; Fedkiw, R.: *Level set methods and dynamic implicit surfaces*. New York: Springer, 2003
- [19] Osher, S.; Sethian, J.: Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. *Journal of Computational Physics* 79 (1988) 1, S. 12–49
- [20] Sethian, J.: *Level set methods and fast marching methods: Evolving interfaces in computational geometry, fluid mechanics, computer vision and material science*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- [21] Zangmeister, T.: On the Extended Finite Element Method for the elasto-plastic deformation of heterogeneous materials. Diss., TU Kaiserslautern, 2014

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1–10: Sebastian Oster, veröffentlicht in [3] und teilweise auch in [2], modifiziert | published in [3] and partly also in [2], modified
- Bilder | Pictures 11–19: Heiko Andr 

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben¹ | General information¹

Konstruktion und Optimierung von Klebeverbindungen für Platten- und Scheibenbauteile aus hochfestem Beton

Construction and optimization of adhesive joints for plate and plane construction elements composed of high performance concrete

Antragsteller 1 Applicant 1:	Priv.-Doz. Dr. Heiko Andrä Stv. Abteilungsleiter „Strömungs- und Materialsimulation“ Deputy Head of Department „Flow and Material Simulation“
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	AN 341/4-1 (Projektnummer Project number: 198310759)
Adresse Address:	Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Abteilung Strömungs- und Materialsimulation, Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern
Kontakt Contact:	+49 631 31600 4470 heiko.andrae@itwm.fraunhofer.de https://www.itwm.fraunhofer.de/de/abteilungen/sms/mitarbeiter/heiko-andrae.html
Antragsteller 2 Applicant 2:	Jun.-Prof. Dr.-Ing. Christian Kohlmeyer Juniorprofessor Junior professor <i>(aktuell current: Geschäftsführender Gesellschafter/Beratender Ingenieur VBI Managing Partner/Consulting Engineer VBI)</i>
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	KO 4242/1-1 (Projektnummer Project number: 198310759)
Adresse Address:	TU Kaiserslautern, Fachgebiet für Massivbau und Baukonstruktion, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern <i>(aktuell current: IG Bauplan GmbH Beratende Ingenieure VBI, Eisenbahnstraße 68, 67655 Kaiserslautern)</i>
Kontakt Contact:	<i>aktuell current:</i> +49 631 36 1926 11 c.kohlmeyer@ig-bauplan.de https://www.ig-bauplan.de/ansprechpartner.php
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.09.2011–31.10.2014
Team Team:	Sebastian Oster (TU KL) Inga Shklyar (ITWM) Matti Schneider (ITWM, 01.09.2012–31.10.2014, 12/2018)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Oster, S.; Shklyar, I.; Andrä, H.: Adhesive joints for structural elements of high performance concrete (HPC). In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 335–340
- Kohlmeyer, C.; Oster, S.: Zugbeanspruchte Klebeverbindungen für Platten- und Scheibenbauteile aus hochfestem Beton. In: Gebekken, N.; Bletzinger, K.-U.; Rothert, H. (Hrsg.): Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau 12/4, München: Universität der Bundeswehr München, 2012, S. 273–279
- Oster, S.; Kohlmeyer, C.: Untersuchungen zur Formulierung eines zweiaxialen Bruchkriteriums für Klebefugen zwischen Betonbauteilen In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07./08.11.2013 in Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 59–64

¹ Die Angaben beziehen sich grundsätzlich auf den Zeitraum der Projektbearbeitung. Bei Christian Kohlmeyer sind in kursiv die Daten zum Zeitpunkt der Berichtslegung vermerkt. | The information always refers to the period of time during which the project was being worked on. In the case of Christian Kohlmeyer, the data at the time of reporting are noted in italics.

- Schneider, M.; Andrä, H.: The topological gradient in anisotropic elasticity with an eye towards lightweight design. *Mathematical Methods in the Applied Sciences* 37 (2013) 11, S.1624–1641 – DOI: 10.1002/mma.2918
- Schnell, J.; Kohlmeyer, C.; Bayer, D.; Müller, F.: Werkstoffgerechtes Konstruieren mit Hochleistungsbetonen. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 6, S. 404–413
- Oster, S.; Kohlmeyer, C.: Experimental investigations on a finger joint for structural elements of high performance concrete. In: Bastien, J.; Rouleau, N.; Fiset, M.; Thomassin, M. (Hrsg.): *Proc. of the 10th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering*, 21.–23.07.2014 am Research Centre on Concrete Infrastructure (CRIB) in Quebec City (Kanada), Québec, 2014, S. 315–320
- Kohlmeyer, C.; Oster, S.: Klebverbindungen für Platten- und Scheibenbauteile aus hochfestem Beton. In: In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): *Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1*, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 140–151 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171445>
- Andrä, H.; Shklyar, I.; Schneider, M.; Zangmeister, T.: Zur Simulation von Klebeverbindungen für Scheibenbauteile mit Level-Set-Funktionen und erweiterter Finite-Elemente-Methode. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): *Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1*, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 254–261 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171557>
- Kohlmeyer, C.; Oster, S.: Kleben von Bauteilen aus Feinkornbeton. *BFT International* 81 (2015) 2, S. 147–149 – *Proc. der 59. BetonTage*, 24.–26.02.2015 in Neu-Ulm
- Oster, S.; Kohlmeyer, C.: Die Keilzinkenverbindung als Füge­technik im Stahlbetonbau. In: Breit, W.; Kurz, W.; Pan, M.; Sadegh-Azar, H.; Schnell, J.; Thiele, C. (Hrsg.): *Beiträge zur 5. DAfStb-Jahrestagung mit 58. Forschungskolloquium*, Band 2, 20./21.09.2017 in Kaiserslautern, TU Kaiserslautern, 2017, Bd. 2, S. 22–33

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertationen | Dissertations

- Zangmeister, T.: On the Extended Finite Element Method for the Elasto-Plastic Deformation of Heterogeneous Materials. *FB Maschinenbau und Verfahrenstechnik*, TU Kaiserslautern, 2015 (Korreferent: Heiko Andrä) – urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-39627
- Spahn, J.: An Efficient Multiscale Method for Modeling Progressive Damage in Composite Materials. *FB Maschinenbau und Verfahrenstechnik*, TU Kaiserslautern, 2015 (Hauptreferent: Heiko Andrä) – urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-39800
- Oster, S.: Keilzinkenverbindungen als Füge­technik für dünne Bauteile aus mikrobewehrtem Hochleistungsbeton. *Diss.*, TU Kaiserslautern, 2017

Flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit stabilisierten Abstandsgewirken | Flexible GFRP-formwork for the production of double curved concrete lightweight elements with stabilized spacer fabrics

- ▶ Henrik Funke, Andreas Ehrlich, Lars Ulke-Winter, Carolin Petzoldt, Sandra Gelbrich, Lothar Kroll
- ▶ Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, Technische Universität Chemnitz

Vorab: Dieser Beitrag beruht auf [1]. | In advance: This report is based on [1].

1 Ausgangsfragen und Zielsetzung

Die Herstellung mehrfach gekrümmter großflächiger Tragwerke aus Beton erfordert komplexe Schalungskonstruktionen, die in der Regel material- und kostenaufwändig sind [2]. Durch die im Projekt durchgeführte Entwicklung und Erprobung von flexiblen Strukturen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) für den Schalungsbau in Kombination mit dem Einsatz von textilverstärktem Beton sollten diese Defizite behoben werden.

Die Einstellung der vorgegebenen Mehrfachkrümmungen sollte über mehrschichtige anisotrope GFK-Schalungselemente mit geringer Biegesteifigkeit und die Nutzung anisotropiebedingter Kopplungseffekte erreicht werden. Die Elemente können ortsunabhängig vorgefertigt und vielfach kombiniert werden. Zur zielgerichteten Betonage gekrümmter Textilbetonelemente in derartigen Schalungen war außerdem die angepasste Einstellung der Mehrfachkrümmung an den textilen Verstärkungsstrukturen notwendig (s. [3]).

1 Initial question and objective

The practical implementation of large-scale curved concrete elements requires complex formwork constructions, which are rather expensive and therefore reach their limits easily [2]. Flexible glass fibre reinforced plastic (GFRP) formwork to produce textile reinforced concrete elements, which was developed and tested within the project, is expected to eliminate those deficits.

The adjustment of the defined curvature should be realized using anisotropic coupling effects on a multi-layered anisotropic GFRP-formwork with low bending stiffness. The flexible GFRP-formwork design allows a location-independent implementation of freeform surfaces and multiples combinations. Furthermore, the defined adjustment of the textile's curvature was necessary in order to have a targeted concreting of curved textile reinforced concrete elements (s. [3]).

2 Entwicklung der durchgeführten Arbeiten

Innerhalb der ersten Förderperiode des Schwerpunktprogramms 1542 wurde ein neuer konstruktiv-technologischer Lösungsansatz in Form eines flexibel formbaren, mehrschichtigen Schalungssystems aus glasfaserverstärktem Kunststoff zur Fertigung von gekrümmten Freiformschalen mit Endlosfaserverstärkung erarbeitet. Dazu wurden die Werkstoffkennwerte in Abhängigkeit der Faserorientierung und des Schichtaufbaus von asymmetrischen GFK-Schalungskomponenten ermittelt sowie analytische und numerische Berechnungen durchgeführt. In Tabelle 1 sind die Kennwerte einer unidirektional verstärkten Einzelschicht zusammengestellt.

2 Development of realized research

A new constructive-technological approach within the first funding period of the Priority Programme SPP 1542 was acquired. In the frame of the project, a flexible, multi-layered formwork from glass fibre reinforced plastic was developed for the production of curved freeform concrete elements with continuous filament reinforcement. Therefore, the characteristic values of the asymmetrical GFRP-elements were measured in dependence on fibre orientation and layer structure. Afterwards analytical and numerical calculations were performed. Table 1 shows the characteristic values of the unidirectional single layer.

E-Modul Young's modulus		
Längs Longitudinal	E_1 [GPa]	23,7
Quer Transverse	E_2 [GPa]	6,4
Querkontraktionszahl Poisson's ratio	ν_{12} [-]	0,3
Schubmodul Shear modulus	G_{12} [GPa]	1,6
Linearer thermischer Längenausdehnungskoeffizient Coefficient of linear thermal expansion		
Längs Longitudinal	$\alpha_{1(20/120)}$ [K ⁻¹]	$7 \cdot 10^{-6}$
Quer Transverse	$\alpha_{2(20/120)}$ [K ⁻¹]	$130 \cdot 10^{-6}$

Table 1: GFK-Kennwerte der unidirektional verstärkten Einzelschicht | **Table 1:** GFRP's parameters of unidirectional single layer

Zur experimentellen Verifikation der vorausberechneten anisotropen Koppelleffekte wurden ausgewählte GFK-Schalungssegmente nach den in den Bildern 1–3 dargestellten Prinzipien hergestellt und auf dem institutseigenen Strukturprüfstand mit einer ABD-Einspannvorrichtung getestet. ABD steht dabei für die Gesamtsteifigkeitsmatrix im Strukturgesetz anisotroper Mehrschichtverbunde mit der Scheibensteifigkeitsmatrix A_{ij} , der Kopplungsmatrix B_{ij} und der Plattensteifigkeitsmatrix D_{ij} . Die dabei hervorgerufenen Krümmungen wurden mit den optischen Formänderungsanalysesystemen ARGUS und ARAMIS validiert. Die Ergebnisse dienen im Weiteren der Ermittlung von funktionalen Zusammenhängen zwischen Krümmungen sowie Prozess- und Geometrieparametern. Hierauf aufbauend erfolgte die Analyse und Identi-

For the experimental verification of the anisotropic coupling effects calculated beforehand, selected GFRP-formwork segments were produced and tested in the institute's own structural test bench with the ABD-testing device (see Figures 1–3). ABD stands for the total stiffness matrix in the structural law of anisotropic multilayer composites with the disk stiffness matrix A_{ij} , the coupling matrix B_{ij} , and the plate stiffness matrix D_{ij} . The resulting curvatures were validated with the optical strain analysis systems ARGUS and ARAMIS by GOM. The results were used during the further procedure for the determination of the functional relations of curvatures, process parameters and geometrical parameters. Based on this, the analysis and identification of single and double curved basic shapes was carried out.

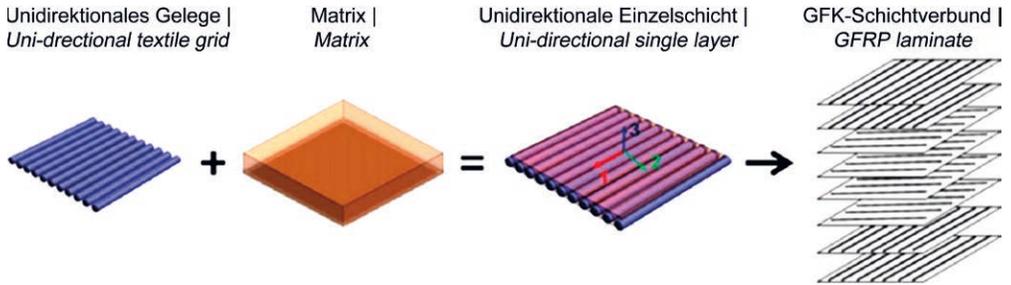


Bild 1: Prozesskette zur Herstellung anisotroper GFRP-Schichtverbunde | Fig. 1: Process chain of anisotropic GFRP layered bond structures

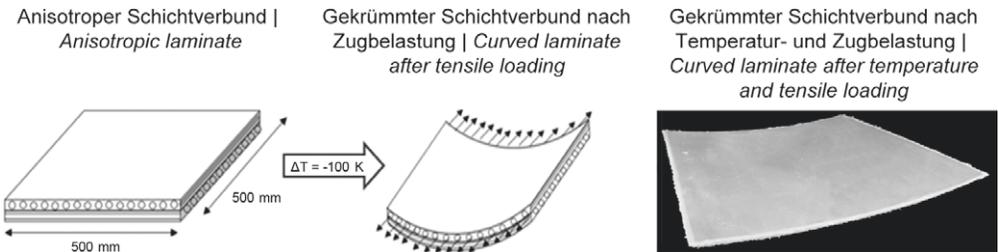


Bild 2: Temperatur- und Zugbelastung anisotroper GFRP-Schichtverbunde zur Einstellung definierter Krümmungszustände | Fig. 2: Temperature and tensile loading of anisotropic GFRP laminated composite for the adjustment of defined curvature states



Bild 3: Gekrümmte GFRP-Schichtverbundplatte mit codierten Messmarken (links), Versuchsaufbau im Formänderungsanalysesystem ARGUS (Mitte) und ABD-Strukturprüfstand (rechts) | Fig. 3: Curved GFRP composite plate with coded reference mark (left), test set-up for optical shape change analysis with the system ARGUS (middle) and ABD-test bench (right)

fikation von einfach und doppelt gekrümmten Grundformen, durch deren Kombination eine größtmögliche Variantenanzahl für definierte Freiformflächen vorliegt.

Für die Herstellung der textilverstärkten Betonelemente wurden biegeeweiche textile 3D-Gewirke verwendet, die auf den Schalungselementen abgelegt wurden, um so deren Krümmung formgenau abzubilden (Bild 4, links). Dazu wurde durch textiltechnische und -technologische Einflussnahme die Anpassung der mechanischen Eigenschaften auf die Formvielfalt

Their combination resulted in the largest possible number of variants of defined freeform surfaces.

For the production of the textile reinforced concrete elements, flexible 3D-textiles were used, which were placed on the formwork elements in order to accurately reproduce their curvature (Fig. 4, left). The soft-elastic behaviour of the 3D-textiles can be influenced to a large extent by modifying parameters such as stiffness, alignment and concentration of pile threads. The resin systems were applied by spraying,

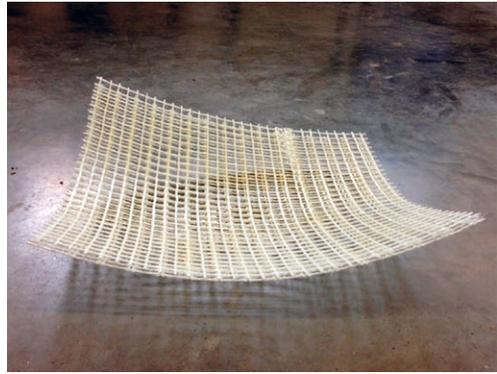
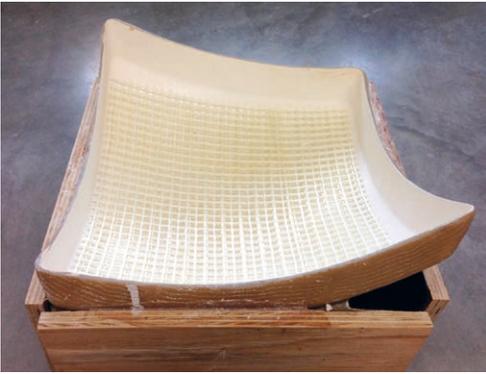


Bild 4: Polymergebundene Stabilisierung von 3D-Gewirken; links: mit duroplastischem Harzsystem gecoatetes, biegeweiches 3D-Gewirke in vorgespannter, flexibler GFK-Schalung, rechts: stabilisiertes 3D-Gewirke | **Fig. 4:** Polymer bound stabilization of 3D fabrics; left: flexible 3D-fabric coated with a thermosetting resin system in curved GFRP formwork, right: stabilized 3D fabric

und Drapierung vorgenommen, wodurch eine exakte Konturanpassung vorlag. Durch die vorgeschaltete Imprägnierung mit einem Aushärtensystem auf polymerer Basis erfolgte die Stabilisierung der räumlichen Textilbewehrung (Bild 4, rechts) für den anschließenden Auftrag der Frischbetonschicht.

In umfassenden Untersuchungen zum Systemaufbau der entwickelten GFK-Schalungen und zu Beton-Leichtbauelementen mit integrierten stabilisierten Abstandsgewirken wurden repräsentative, doppelt gekrümmte Freiformflächen mit verschiedenen Krümmungsradien entworfen, numerisch berechnet, hergestellt sowie die Konturengenauigkeit und die belastungsgerechte Integration der Gewirke validiert [4].

Die Einstellung der Krümmungen erfolgte über das neuartige flexible GFK-Schalungselement. Die grundsätzliche Vorgehensweise bei den Fertigungsstudien umfasste die Herstellung der flexiblen Schalung mit Referenz- oder Vorspannkrümmung. Im Anschluss an die Schalungsherstellung wurde das Abstandsgewirke integriert und fixiert. Nach der Stabilisierung der textilen 3D-Verstärkungsstruktur und der Positionierung mit speziell entwickelten Abstandhaltern (Bild 5) erfolgte das Auftragen der Betonschicht, wobei auf die in Tabelle 2 gezeigte angepasste Betonrezeptur mit einem Wasserbindemittelwert von 0,37 zurückgegriffen wurde.

rolling or by using the capillary effect of the pile threads on the pre-curved 3D-fabric. In this way, the 3D-textile can be adjusted to the defined curvature and stabilized (Fig. 4, right) for the following concreting.

The intensive numerical, technological and experimental tests of the developed GFRP-formworks have shown that combinations of concrete and stabilizing spacer fabrics permit the realization of representative single and double curved, multi-axially loadable surface structures [4].

Selected representative freeform surfaces, double-curved with different radii of curvature, were produced in the production tests. The adjustment of the curves was carried out via the new flexible GFRP-formwork elements. The basic procedure for carrying out the production tests included the manufacture of the flexible formwork with reference curvature or preload curvature. After the production of the formwork, the spacer reinforcement was installed and fixed. After stabilizing the textile 3D-reinforcement structure and positioning with special developed spacer elements (Fig. 5), the fine concrete was laminated using the adapted concrete composition displayed in Table 2 with a water-cement ratio of 0.37.

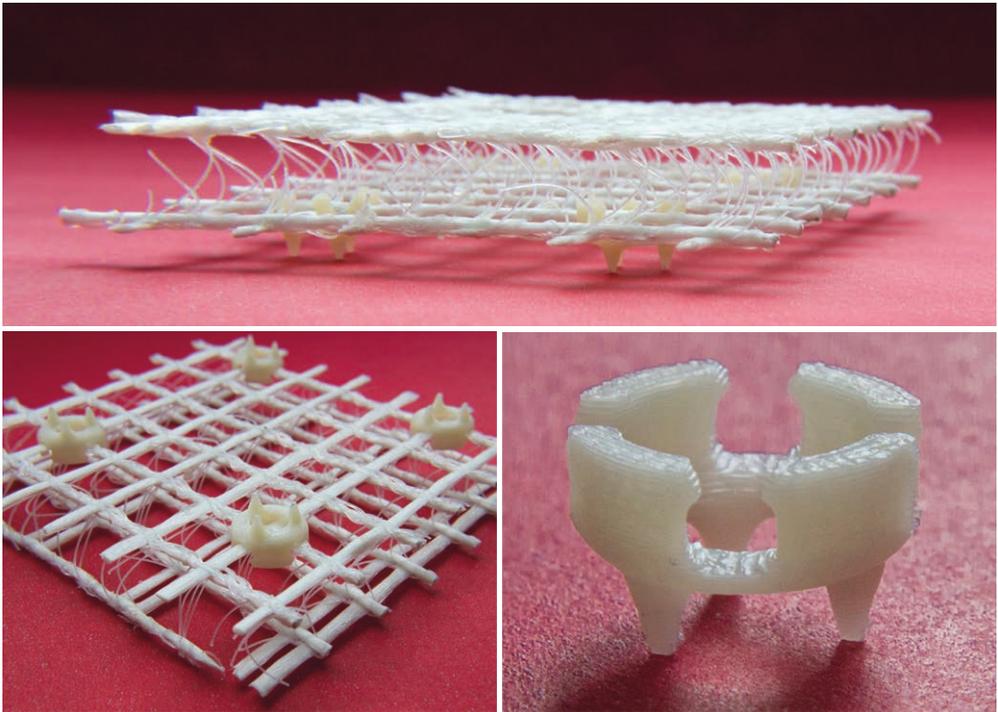


Bild 5: Entwickelte Abstandhalter für kraftflussgerechte Integration von Abstandsgewirken in Feinbeton | **Fig. 5:** Spacers developed for integration of 3D fabrics into fine grained concrete

Komponente Component	Anteil Portion in [kg/m³]
Weißzement White cement CEM I 52,5 R	500
Amorphes Alumosilikat Amorphous aluminosilicate	150
Dolomitsand 0/1 Dolomite sand 0/1	1270
Dolomitfüller Dolomite filler ($x_{50} = 70 \mu\text{m}$)	150
Wasser Water	240
AR-Glaskurzfasern AR-glass fibres (12 mm, integral)	18
Hochleistungsfließmittel Superplasticizer	10

Tabelle 2: Qualitative und quantitative Zusammensetzung des Feinbetons (x_{50} : Modalwert) | **Table 2:** Qualitative and quantitative composition of the fine grained concrete mix (x_{50} : modal value)

Die Einstellung der anisotropiebedingten Koppeleffekte wurde analytisch mit Hilfe der *klassischen Laminattheorie* (CLT) [5] sowie numerisch mittels der *Finite-Elemente-Methode* vorausberechnet. Durch Versuche an den eigens hergestellten textilverstärkten Beton-Leichtbauelementen wurde eine experimentelle Verifikation dieser intrinsischen Koppelphänomene vorgenommen.

The calculations of the coupling effects caused by anisotropy were conducted analytically with the *Classical Laminate Theory* (CLT) and the *First Order Shear Deformation Theory* (FSDT) [5]. An experimental verification of these intrinsic coupling phenomena has been conducted with specifically produced textile reinforced concrete lightweight elements.

3 Ergebnisse und Diskussion

3 Results and discussion

3.1 Theoretische und experimentelle Verifikation von Hauptkrümmungen

3.1 Theoretical and experimental verification of major curves

Die theoretischen Hauptkrümmungen (Berechnungsansätze s. [6]) eines asymmetrischen Schichtaufbaus mit 0°- und 90°-Faseranteil ($90_n/0_m$) sind exemplarisch für zwei Belastungsfälle in Abhängigkeit des 0°-Faseranteils in Bild 6 dargestellt. Die Krümmungen nahmen mit steigendem 0°-Faseranteil und damit zunehmender Anisotropie sowohl um die 1-Achse (parallel zur Faserorientierung) als auch um die 2-Achse (senkrecht zur Faserorientierung) zu.

The theoretical principal curvatures (for calculation approach cf. [6]) of an asymmetrical layer structure with 0° and 90° fibre content ($90_n/0_m$) are exemplarily depicted for two loading cases in Fig. 6 as a function of the 0° layer content. The curves increase with increasing layer content accompanied by increasing anisotropy, both in the 1- (parallel to fibre reinforcement) and in the 2-axis (vertical to fibre reinforcement).

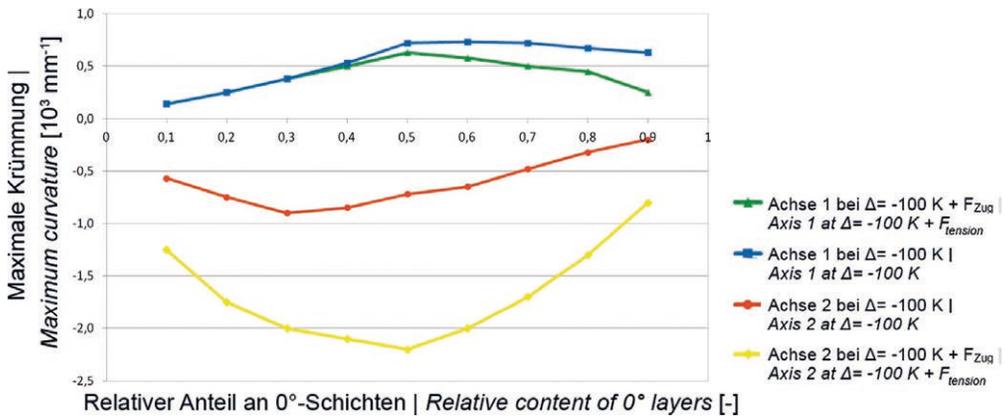


Bild 6: Theoretische Hauptkrümmungen eines asymmetrischen Schichtaufbaus ($90_n/0_m$) in Abhängigkeit vom Anteil der 0°-Schichten bei reiner Temperaturbelastung $\Delta T = -100\text{ K}$ und überlagerter Temperatur- und Zugbelastung | **Fig. 6:** Theoretical major curve of an asymmetrical layer structure ($90_n/0_m$), depending on the portion of 0° layer, with pure temperature load ($\Delta T = -100\text{ K}$) and superimposed temperature and tensile load

Die höchste Anisotropie war bei einem relativen 0°-Anteil von ca. 50 % vorhanden, wodurch sich um beide Achsen die größte Krümmung einstellte (Bild 6 und Bild 7). Eine weitere Erhöhung des 0°-Faseranteils bewirkte eine Abnahme der Krümmung, da sich die Anisotropie des GFK-Schichtverbundes verringerte (Bild 6). Mit einer Zugbelastung, durch externe Vorspannkräfte zeigte sich eine Zunahme der Krümmungen um die 2-Achse, wobei gleichzeitig die Krümmungen um die 1-Achse aufgrund der Zugkraftbeanspruchung in diese Achse einer Reduzierung unterlagen.

The highest anisotropy was found with a relative 0° fibre content of about 50 percent. This caused the largest curvature around both axes (see Fig. 6 and 7). A further increase of the 0° fibre content caused a decrease of curvature, because the anisotropy of the GFRP layered structure decreased. Due to external preloads, the tensile load caused an increase of curvature around axis 2. At the same time, curvature around the 1-axis decreased, due to traction.

Fig. 8 displays the theoretical and experimentally verified major curves of the asymmetrical layer structure ($90_n/0_m$) depending on

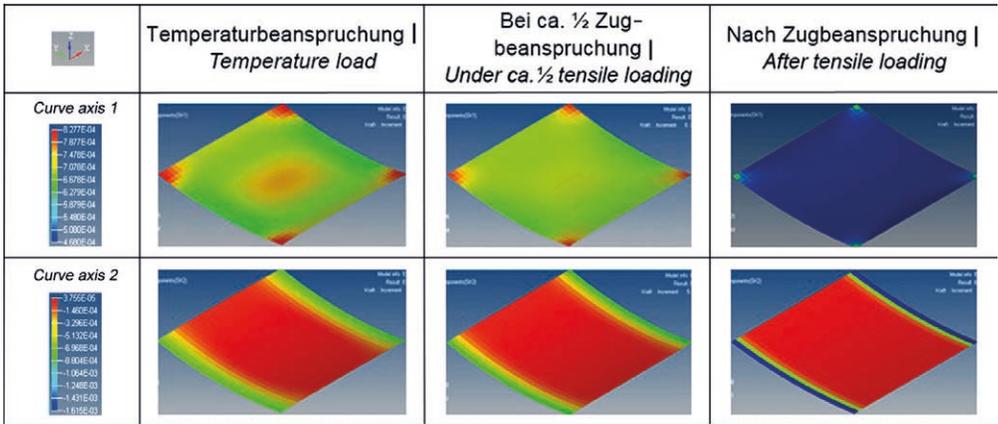


Bild 7: Theoretische Hauptkrümmungen des asymmetrischen Schichtaufbaus ($90_0/0_0$) bei reiner Temperaturbelastung ($\Delta T = -100$ K) und überlagter Temperatur- und Zugbelastung | **Fig. 7:** Theoretical major curve of the asymmetrical layer structure ($90_0/0_0$) under pure temperature load ($\Delta T = -100$ K) and under superimposed temperature and tensile load

In Bild 8 sind die theoretischen und experimentell verifizierten Hauptkrümmungen des asymmetrischen Schichtaufbaus ($90_n/0_m$) in Abhängigkeit von dem 0° -Schichtenanteil bei reiner Temperaturbelastung ($\Delta T = -100$ K) dargestellt. Die experimentell bestimmten Hauptkrümmungen um die 1-Achse stimmen qualitativ und annähernd auch quantitativ mit den berechneten Hauptkrümmungen überein (Bild 8). Die geringen quantitativen Differenzen zwischen den berechneten und den experimentell verifizierten Hauptkrümmungen um die 1-Achse können auf chemisch-physikalische Reaktionen der duroplastischen

0° layer content with a pure temperature load of $\Delta T = -100$ K. The major curves around the 1-axis that were determined experimentally agreed qualitatively and approximately also quantitatively with the major curve that was calculated previously (Fig. 10). The minor quantitative differences between the calculated and the experimentally verified major curves around the 1-axis were caused by chemical-physical reactions of the thermosetting matrices. In the calculations, these matrices could be included only insufficiently. Apart from chemical shrinkage, they included residual stress caused by swelling

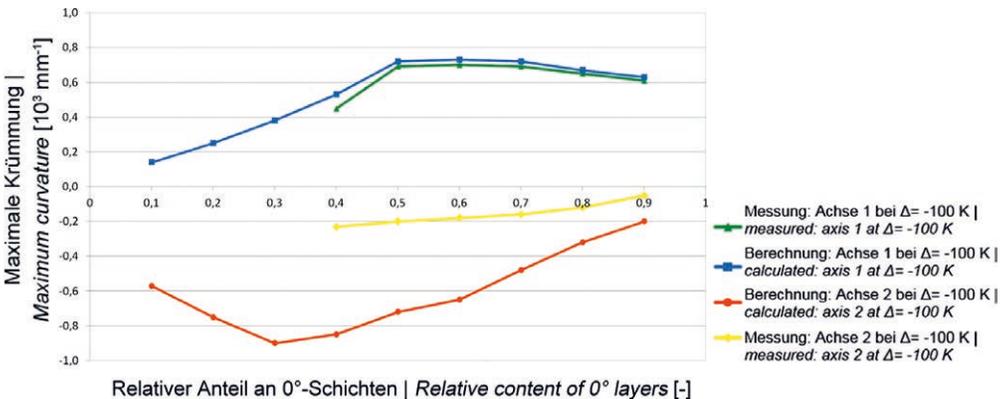


Bild 8: Vergleich der berechneten und der experimentell verifizierten Hauptkrümmungen bei $\Delta T = -100$ K | **Fig. 8:** Comparison between calculated and experimentally verified major curvatures at $\Delta T = -100$ K

Matrix zurückgeführt werden, welche bei den Berechnungen aufgrund der Komplexität nur unzureichend mit einbezogen werden konnten. Dazu zählen neben dem chemischen Schwinden auch Quelleigenspannungen infolge erhöhter Wasseraufnahme in und zwischen den Molekülketten der duroplastischen Matrix. Dabei wirken die Quelleigenspannungen der thermischen Ausdehnung entgegen, wodurch sich folglich eine Reduzierung der theoretischen Hauptkrümmung zeigte. Zudem erhöht langsames Abkühlen die Relaxations- und Kriechvorgänge der duroplastischen Matrixsysteme [7].

Demgegenüber wiesen die berechneten und die experimentell verifizierten Hauptkrümmungen um die 2-Achse erhebliche Unterschiede auf. Einzeln und ideal betrachtet ergeben sich starke Krümmungen um beide Achsen 1 und 2. In der Realität behindern sich diese Krümmungen allerdings, wobei sich schließlich eine durchsetzt, in diesem Fall die Krümmung um die 1-Achse. In den Strukturgesetzen der Mehrschichtverbunde wird dies als Stabilitätsproblem bezeichnet, in der Berechnung bzw. Simulation ist es eher ein Verzweigungsproblem.

3.2 Polymergebundene Stabilisierung von 3D-Gewirken

Mit der textiltechnischen und -technologischen Einflussnahme in Form eines Coatings mit einem duroplastischen Harzsystem wurde die Anpassung der mechanischen Eigenschaften auf die Formenvielfalt und Drapierung vorgenommen, wodurch eine exakte Konturanpassung erreicht werden konnte. Die Rückverformung betrug einen Tag nach der Stabilisierung weniger als 5 %, sodass eine exakte Abbildung der Krümmungszustände sichergestellt war.

Bei weiterführenden Fertigungsstudien wurde das Ziel verfolgt, eine zusätzliche Stabilisierung mit einem kaltaushärtenden Harzsystem durch gezielte Ausnutzung der Kapillarwirkung der Abstandsfäden zu erreichen. Allerdings konnte aufgrund der unzureichenden Kapillarwirkung der Abstandsfäden keine Steifigkeitssteigerung der 3D-Gewirke nachgewiesen werden (Bild 9).

after increased water absorption in or among the molecular chains of the thermosetting matrices [7].

In contrast, the calculated and experimentally verified principal curvatures around the 2-axis showed considerable differences. Individually and ideally, there are strong curvatures around both axes 1 and 2. In reality, however, these curvatures hinder each other, whereby one finally prevails; in this case the curvature around the 1-axis. In the structural laws of multi-layer composites, this characteristic is referred to as a stability problem; in the calculation or simulation it is rather a problem of branching.

3.2 Polymer-bound stabilization of 3D fabrics

Technique and technology from textile manufacturing had an influence on shape through coating with a thermosetting resin system. Mechanical characteristics were adapted to the variety of shapes and drapery. This resulted in an exact contour adapting. Reverse deformation was less than 5 percent one day after the stabilization. Thus, an exact depiction of the curvature state could be ensured.

Further production studies aimed on an additional stabilization with the cold-setting epoxy resin by using of the capillary effect of the pile threads. However, it was not possible to prove an increase in stiffness of the 3D-fabric due to the insufficient capillary effect of the spacer threads. That can be recognized on the sample 'pile thread without epoxy resin contact' (Fig. 9), which had no common quantitative characteristic peaks with the sample 'epoxy resin'. As opposed to this, the sample 'pile thread with epoxy resin contact' had a high quantitative and qualitative peak alignment with the sample 'epoxy resin'.

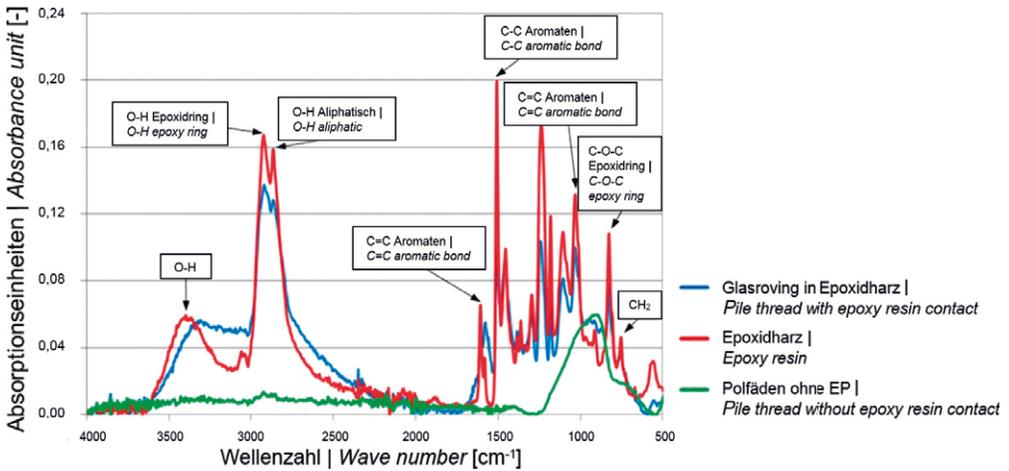


Bild 9: Ergebnisse der Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie mit abgeschwächter Totalreflexion zur Validierung der polymergebundenen Stabilisierung von 3D-Gewirke | **Fig. 9:** Results of Fourier transform infrared spectroscopy with attenuated total reflection for the validation of polymer-bound stabilization of 3D-fabric

3.3 Fertigungsversuche Beton-Leichtbauelemente

Zur Charakterisierung des Materials wurden die Frischbeton- und die Festbetoneigenschaften (nach 28 Tagen, s. Tabelle 3) bestimmt. Der Luftgehalt im Frischbeton wurde mit einem Luftgehaltsprüfer ermittelt, die Gesamtschwindverformung mittels Schwindrinne. Der Feinbeton zeigte eine hohe Dauerhaftigkeit, was anhand des bestehenden CDF-Tests nach RILEM-Empfehlung TC 117-FDC [8] validiert worden ist.

Bei den Fertigungsversuchen waren die Sicherstellung der gleichmäßigen Betonschichtdicke,

3.3 Production tests of concrete lightweight element

In Table 3, the fresh and hardened concrete characteristics after 28 days are shown. The air volume content was determined with an air content tester, the total shrinkage deformation with a shrinkage channel. The fine grained concrete showed a high durability, which was validated in the CDF-Test after 28 freeze-thaw cycles according to RILEM TC 117-FDC [8].

Of special importance during the production tests was to ensure the evenness of the concrete layer thickness, consistently good surface

Eigenschaft Characteristic	Beton Concrete	
	Frisch Fresh	Fest Hardened
Geometrische Rohdichte Geometric bulk density [g/cm³]	2,32	2,24 g/cm³
Luftgehalt Air content [Vol.-%]	2,5	-
Lineares Schwinden Linear shrinkage [mm/m]	-	0,71
Druckfestigkeit Compressive strength [MPa]	-	109,3
3-Punkt-Biegezugfestigkeit 3-point bending tensile strength [MPa]	-	14,7
CDF-Test	m_{28} [g/m²]	-
	$R_{u,28}$ [%]	-
	-	117
	-	100

Tabelle 3: Frisch- und Festbetoneigenschaften nach 28 Tagen | **Table 3:** Characteristics of fresh and hardened fine grained concrete after 28 days

eine einheitlich gute Oberflächenqualität, die ausreichende Stabilität der GFK-Schalung sowie die Vermeidung von kritischen Rissen sowohl im Beton als auch im Schalungssystem bei guten Ausschalungseigenschaften von besonderer Bedeutung. Diese Eigenschaften konnten im Rahmen der Fertigungsversuche umgesetzt werden (Bild 10).

quality, sufficient stability of the GFRP-formwork and to avoid critical cracks both in the concrete and in the formwork system. Also essential were good demoulding qualities. These requirements could be achieved within the framework of the production tests (Fig. 10).

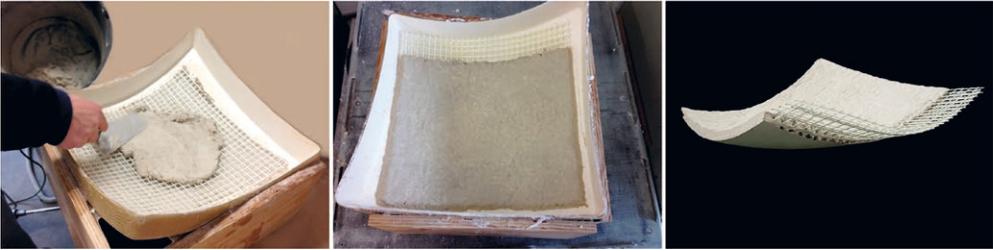


Bild 10: Fertigungsversuche zum Systemaufbau GFK-Schalung/Beton-Leichtbauelemente; links: Betonieren mit Feinbeton, Mitte: abgeschlossene Betonage, rechts: doppelt gekrümmtes Beton-Leichtbauelement | **Fig. 10:** Production test of the GFRP formwork and concrete element; left: concreting with fine grained concrete, middle: concreted element, right: double curved concrete element

3.4 Schlussfolgerungen und Perspektiven

Innerhalb dieses Forschungsprojektes wurde ein flexibel formbares, mehrschichtiges Schalungssystem aus glasfaserverstärktem Kunststoff erarbeitet, welches unter Ausnutzung des anisotropiebedingten Strukturverhaltens eine gezielte Einstellung von definierten Krümmungszuständen gestattet. Die Einstellung der anisotropiebedingten Koppelwirkungen ist analytisch mit Hilfe der erweiterten Laminattheorie sowie numerisch mittels der Finite-Elemente-Methode vorausberechnet worden, wobei eine gute Übereinstimmung der jeweiligen berechneten und experimentell bestimmten Ergebnisse für die repräsentativen Flächentragwerke nachgewiesen werden konnte. Durch die durchgeführten Versuche an den eigens hergestellten textilverstärkten Beton-Leichtbauelementen ist eine experimentelle Verifikation dieser intrinsischen Koppelphänomene vorgenommen worden. Auf Basis der erzielten Ergebnisse können optimale Schichtaufbauten für baurelevante Krümmungszustände und deren Variationsbereiche festgelegt werden.

Neben der effizienten Fertigung von gekrümmten Beton-Leichtbauelementen zeichnen sich die

3.4 Conclusions and perspectives

The objective of the research program was to develop a flexible, multi-layered formwork system made from glass-fibre reinforced plastic, which allows for a specific adjustment of defined curvature states, utilizing the structural behaviour influenced by anisotropy. The adjustment of the coupling effects, which are induced by anisotropy, were calculated in advance analytically by means of the extended laminate theory and numerically by means of the finite element method. A good correspondence of the respective results for the representative shell structures was proven. An experimental verification of these intrinsic coupling phenomena has been conducted with specifically produced textile reinforced concrete lightweight elements. On the basis of the results achieved, ideal layer constructions for the key curvature states and their variation range could be set.

Beyond the efficient production of curved concrete lightweight elements, GFRP-formworks employ excellent concrete qualities on highest classes of face concrete. This contributes to the generation of new forms of architecture and buildings. The numerical, technological and ex-

GFK-Schalungen durch die Umsetzung exzellenter Betonqualitäten in höchster Sichtbetonklasse aus, was zur Generierung neuer Architekturformen und Generationen von Bauwerken beiträgt. Die dabei intensiv durchgeführten numerischen, technologischen und experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Kombination von Beton und stabilisierten Abstandsgewirken die Umsetzung einfach und doppelt gekrümmter, mehrschichtig beanspruchbarer Flächentragwerke gestattet. Darüber hinaus erlaubt die flexible GFK-Schalungsbauweise zum einen die ortsunabhängige Umsetzung von Freiformflächen gemäß dem Prinzip *form follows force* und führt zum anderen aufgrund der angepassten Textilverstärkung zu dünnwandigen und damit extrem leichten Beton-Schalentragwerken.

Die hier entwickelten, flexibel formbaren Schalungselemente aus anisotrop verstärkten Kunststoffen bildeten den Ausgangspunkt für ein Folgeprojekt in der zweiten Förderperiode des SPP 1542 (s. S. 452 ff.). Dabei sollten Fragestellungen zu doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit bionisch inspirierten Krafteinleitungssystemen geklärt werden, um sowohl eine kraftflussgerechte Befestigung zu gestatten als auch eine Minimierung der Anzahl der Befestigungspunkte vorzunehmen. Auf Basis bestehender Feinbetonmischungen soll zudem eine an die gestellten Anforderungen angepasste Rezeptur durch Berechnung mittels neuronaler Netze erfolgen. Diese erweiterten Optimierungsalgorithmen basieren auf der Methode der künstlichen Intelligenz, z. B. [9], [10], und erlauben es, den Versuchsaufwand bei der Betonrezepturanpassung von mineralischen Matrices erheblich zu reduzieren.

4 Wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse

Zusätzlich zu den Entwicklungen der zweiten Förderperiode des SPP 1542 wird gegenwärtig ein DFG-Erkenntnistransfer-Projekt mit Industriepartnern bearbeitet, in dem die Projektergebnisse validiert und wirtschaftlich verwertet werden (s. Kurzbericht zum Projekt auf S. 726).

Experimental tests carried out intensively show that combinations of concrete and stabilizing spacer fabrics permit the implementation of single and double curved, multi-axially loaded surface structures. Furthermore, the flexible GFRP-formwork design allows not only a location-independent implementation of freeform surfaces following the principle *form follows force* but also results in thin walled and thus extremely light concrete shell structures.

The flexible formwork elements made of anisotropically reinforced plastics developed here were the initial point for a follow-up project in the 2nd funding period of the Priority Programme SPP 1542 (see page 452 et seq.). There, double curved concrete lightweight elements with bionic inspired force transmission should be developed. That is expected to lead to an efficient fastening as well as the minimization of the fastening points. Furthermore an adjusted concrete mixture should be developed, regarding the defined requirements, by calculating with artificial neuronal networks. Those extended optimization algorithms based on artificial intelligence, e.g. [9], [10], allow the minimization of the test effort during the adaptation of concrete mixture.

4 Economic exploitation of results

In addition to the developments of the second funding period of the SPP 1542, a DFG knowledge transfer project with industrial partners is currently being worked on, in which the project results will be validated and commercially exploited (see short report at p. 726).

5 Zusammenfassung

Zur effizienten Fertigung gekrümmter Freiformschalen mit großen Abmessungen wurde ein neuer konstruktiv-technologischer Lösungsansatz in Form eines flexibel formbaren, mehrschichtigen Schalungssystems aus GFK erarbeitet. Diese GFK-Schalungselemente gestatten unter Ausnutzung ihres anisotropiebedingten Strukturverhaltens eine gezielte Einstellung von definierten Krümmungszuständen. In umfassenden Untersuchungen zum Systemaufbau der entwickelten GFK-Schalungen und Beton-Leichtbauelemente mit stabilisierten Abstandsgewirken wurden repräsentative, gekrümmte Freiformflächen mit verschiedenen Krümmungsradien entworfen, numerisch berechnet, hergestellt sowie die Konturengenauigkeit und die belastungsgerechte Integration der Gewirke verifiziert. So konnten erstmals doppelt gekrümmte Feinbetonelemente mit textiler Bewehrungsstruktur aus stabilisierten 3D-Gewirken durch Nutzung flexibler GFK-Schalungen aus unidirektionalen Multilayergelegen mit definiert einstellbaren Krümmungen erzeugt werden.

Die Projektergebnisse wurden in der einschlägigen Fachpresse veröffentlicht sowie auf nationalen und internationalen Tagungen vorgestellt, z. B. [11]–[15].

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198290162 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

5 Conclusion

In summary, a new constructive-technological approach was acquired for the efficient production of curved concrete elements with large dimensions by developing a flexible mouldable formwork from GFRP. This GFRP formwork permits an aimed adjustment of defined curvature states by using the anisotropic structural behaviour. Comprehensive investigations of the GFRP formwork as well as the concrete lightweight elements show representative curved surfaces with different radii of curvature. Furthermore the elements were calculated numerically, produced with precise contours and reinforced with a textile. Thus double curved concrete lightweight elements with a textile reinforcement from stabilized 3D-fabric were produced for the first time by a flexible GFRP-formwork from unidirectional textiles with defined adjustable curvatures.

The results were published in relevant specialist publications as well as presented at national and international conferences, see e.g. [11]–[15].

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (number 198290162) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Kroll, L.; Gelbrich, S.; Funke, H.; Ehrlich, A.; Ulke-Winter, L.; Petzoldt, C.: Flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit stabilisierten Abstandsge-
wirken. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 198–207 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171509>
- [2] Brameshuber, W.: Selbstverdichtender Beton. Schriftenreihe Spezialbetone, Bd. 5, Düsseldorf: Verlag Bau und Technik, 2004
- [3] Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Ulke-Winter, L.; Kroll, L.: Anisotropic fibre-reinforced plastics as formworks for single and double-curved textile reinforced concrete. *Journal of Materials Science Research* 4 (2015) 1, S. 36–45 – DOI: 10.5539/jmsr.v4n1p36
- [4] Funke, H. L.; Ulke-Winter, L.; Gelbrich, S.; Kroll, L.: Application-specific adaptation of concrete formulations using genetic algorithms to optimize a wide range of different fit-functions. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): *Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp.* 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9251, Book of Abstracts: S. 152, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.
- [5] Altenbach, H.; Altenbach, J.; Rikards, R.: Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke. Stuttgart: Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, 1996
- [6] Dallinger, S.; Pardatscher, H.; Kollegger, J.: Zweifach gekrümmte Schalen aus Betonfertigteilen. *Forschung & Entwicklung für Zement und Beton* (2009) 5, S. 32–33
- [7] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin: Springer, 2007
- [8] RILEM TC 117-FDC: TC 117-FDC Recommendation – CDF test – test method for the freeze thaw and deicing resistance of concrete – Tests with sodium chloride (CDF). *Materials and Structures* 29 (1996) 193, S. 523–528
- [9] Ulke-Winter, L.; Kroll, L.; Schierl, S.: Developing Formulations with an Artificial Brain. *Z. Kunststoffe International* 102 (2012) 8, S. 44–47
- [10] Ulke-Winter, L.; Kroll, L.: Naturalanaloge Optimierungsverfahren zur Auslegung von Faserverbundstrukturen. In: Gehde, M.; Wagenknecht, U.; Bloß, P. (Hrsg.): *Technomer 2013 – 23. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren*, 14./15.11.2013 in Chemnitz, 2013, S. 72
- [11] Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Kroll, L.: Rheological and mechanical development of a fiber-reinforced concrete for an application in civil engineering. *SOJ Materials Science & Engineering* 2 (2014) 2, 4 S. – DOI: <http://dx.doi.org/10.15226/sojmse.2014.00111>
- [12] Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Ulke-Winter, L.; Kroll, L.: Unsymmetrical Fibre-Reinforced Plastics for the Production of Curved Textile Reinforced Concrete Elements. *Open Journal of Composite Materials* (2014) 4, S. 191–200 – DOI: 10.4236/ojcm.2014.44021.
- [13] Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.: Formation of a new hybrid material of textile reinforced concrete and glass fibre reinforced plastic. In: *Proc. of the 4th Int. fib Congress 2014*, 10.–14.02.2014 in Mumbai (Indien), Hyderabad: Universities Press Priv. Ltd., 2014, Book of Abstracts: S. 752–755, Langfassung publ. auf CD, 8 S.
- [14] Gelbrich, S.; Funke, H.; Ehrlich, A.; Petzoldt, C.: Integration von freigeformten textilen Bewehrungen zur Herstellung dünnwandiger Betonschalen. In: Ludwig, H.-M.; Fischer, H.-B. (Hrsg.): *Tagungsband zur 19. Ibausil*, 16.–18.09.2015 in Weimar, Weimar, 2015, Bd. 1, S. 1295–1300
- [15] Gelbrich, S.; Funke, H.; Ehrlich, A.; Petzoldt, C.; Kroll, L.: Flexible GFK-Schalen zur Herstellung von gekrümmten Textilbeton-Leichtbauelementen. *TUDALIT-Magazin* (2013) 9, S. 10 – Tagungsband zur 5. Anwendertagung Textilbeton am 24./25.09.2013 in Friedrichshafen

Bildnachweise | Picture credits

- Bild | Picture 1: Lars Ulke-Winter
- Bilder | Pictures 2–4, 7, 10: Carolin Petzoldt
- Bild | Picture 5: Susanne Viertel
- Bilder | Pictures 6, 8, 9: Henrik Funke

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Flexible mehrschichtige GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit stabilisierten Abstandsgewirken

Flexible multilayer GRP formworks for the production of double-curved lightweight concrete elements with stabilized spacer fabrics

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. c. Prof. Lothar Kroll, Direktor des Institutes für Strukturleichtbau (IST) und des An-Institutes Cetex Director of IST and of the affiliated institute CETEX
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	KR 1713/12-1 (Projektnummer Project number: 198290162)
Kontakt Contact:	+49 371 531 23120 slk@mb.tu-chemnitz.de www.leichtbau.tu-chemnitz.de
Antragstellerin 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich Leiterin Forschungsbereich „Leichtbau im Bauwesen“ Leader of research group “Lightweight Constructions in Civil Engineering”
Kontakt Contact:	+49 371 531 32192 sandra.gelbrich@mb.chemnitz.de www.leichtbau.tu-chemnitz.de
Adresse Address:	TU Chemnitz, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, 09107 Chemnitz
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.10.2011–30.09.2014
Team Team:	Henrik L. Funke Andreas Ehrlich Carolin Petzoldt (01.02.2013–30.09.2014) Lars Ulke-Winter

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Funke, H.; Gelbrich, S.; Kroll, L.: A New Hybrid Material of Textile Reinforced Concrete and Glass Fibre Reinforced Plastic. *Journal of Materials Science Research* 2 (2013) 3, S. 96–102
- Gelbrich, S.; Funke, H.; Ehrlich, A.; Petzoldt, C.; Kroll, L.: Flexible GFK-Schalen zur Herstellung von gekrümmten Textilbeton-Leichtbauelementen. *TUDALIT-Magazin* (2013) 9, S. 10 – Tagungsband zur 5. Anwendertagung Textilbeton am 24./25.09.2013 in Friedrichshafen
- Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.: Development of a new hybrid material of textile reinforced concrete and glass fibre reinforced plastic. In: Hufenbach, W. A.; Gude, M. (Hrsg.): *Procedia Materials Science* 2 (2013), S. 103–110 – Proc. of Materials Science Engineering, Symp. B6 – Hybrid Structures, 25.–27.09.2013 in Darmstadt – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2013.02.013>
- Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.: Formation of a new hybrid material of textile reinforced concrete and glass fibre reinforced plastic. In: Proc. of the 4th Int. fib Congress 2014, 10.–14.02.2014 in Mumbai (Indien), Hyderabad: Universities Press (India) Priv. Ltd., 2014, Book of Abstracts: S. 752–755, Langfassung publ. auf CD, 8 S.
- Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Petzoldt, C.; Kroll, L.: Flexible fibre reinforced plastic-formworks for the production of curved textile reinforced concrete. In: El-Hacha, R. (Hrsg.): Proc. of 7th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering, 20.–22.08.2014 in Vancouver (Kanada), 2014, Book of Abstracts: S. 101, Langfassung publ. auf USB-Stick, 6 S.

- Kroll, L.; Gelbrich, S.; Funke, H.; Ehrlich, A.; Ulke-Winter, L.; Petzoldt, C.: Flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit stabilisierten Abstandsgewirken. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 198–207 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171509>
- Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Ulke-Winter, L.; Kroll, L.: Anisotropic fibre-reinforced plastics as formworks for single and double-curved textile reinforced concrete. Journal of Materials Science Research 4 (2015) 1, S. 36–45 – DOI: 10.5539/jmsr.v4n1p36
- Funke, H.; Gelbrich, S.; Ulke-Winter, L.; Kroll, L.; Petzoldt, C.: An application of asymmetrical glass fibre-reinforced plastics for the manufacture of curved fibre reinforced concrete. International Journal of Engineering Sciences & Research Technology 4 (2015) 1, S. 732–740
- Gelbrich, S.; Funke, H.; Ehrlich, A.; Petzoldt, C.: Integration von freigeformten textilen Bewehrungen zur Herstellung dünnwandiger Betonschalen. In: Ludwig, H.-M.; Fischer, H.-B. (Hrsg.): Tagungsband zur 19. Ibausil, 16.–18.09.2015 in Weimar, Weimar, 2015, Bd. 1, S. 1295–1300

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Kaufmann, J.: Beitrag zu anisotropiebedingten Koppeleffekten bei rotationssymmetrischen mehrschichtigen Faserverbundbauteilen. 2014

Diplomarbeit | Diploma Thesis

- Petzoldt, C.: Flexible mehrschichtige GFK-Schalungen zur Herstellung von gekrümmten Beton-Leichtbauelementen. 2013

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Entwurf und Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit bionisch inspirierten Krafteinleitungssystemen durch Einsatz flexibler GFK-Schalungen | Design and production of double-curved lightweight concrete structures with bionic inspired force transmission elements by the use of flexible GFRP-formworks

Antragsteller:in Applicants:	Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. c. Prof. Lothar Kroll, Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 1542
Laufzeit Period:	10/2014–09/2017

- Automatisierte Herstellungstechnologie zur Fertigung von dünnwandigen 3D-geformten Verbundelementen für nachhaltige energieeffiziente Fassadenlösungen – GreenFACE | Automatization of the production technology for sustainable and energy efficient facades consisting of thin walled 3D-curved composite elements – GreenFACE

Antragstellerin Applicant:	Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich
Förderer Funding:	Sächsische Aufbaubank (SAB)
Laufzeit Period:	07/2017–12/2019

- Wiederverwendbare flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen | Re-usable and flexible GFRP formwork for the production of double curved concrete lightweight element

Antragsteller:in Applicants:	Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. c. Prof. LotharKroll, Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransfer-Projekt Knowledge Transfer Project
Laufzeit Period:	01/2018–12/2019

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Teilnahme am SPP-internen Hornbach-Wettbewerb 2012 | Participation in the SPP-internal Hornbach Competition 2012
- Organisation und Durchführung eines Arbeitsgruppentreffens der AG Herstellen und Modellieren am 17.04.2013 in Chemnitz | Organisation of the meeting of the SPP work group „Manufacturing and modelling“, 17.04.2013 in Chemnitz

Gekrümmte Beton-Leichtbauelemente mit bionisch inspirierten Krafteinleitungssystemen durch Einsatz flexibler GFK-Schalungen | Curved lightweight concrete structures with bionic inspired force transmission elements by the use of flexible GFRP-formworks

► Henrik Funke, Lars Ulke-Winter, Carolin Petzoldt, Christian Müller, Sandra Gelbrich, Lothar Kroll

► Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, Technische Universität Chemnitz

1 Ausgangsfragen und Zielsetzung

Die Architektur des 21. Jahrhunderts ist geprägt von der freien Formfindung, wobei Ressourcensparung in Kombination mit Funktionsintegration immer stärker in den Fokus effizienter Bauweisen rücken. Klassische Werkstoffe, wie z. B. Stahlbeton, stoßen hinsichtlich organischer Formen und Funktionalisierung schnell an ihre Grenzen. Darüber hinaus sind beim Stahlbeton aufgrund der Korrosionsneigung der Stahlbewehrung hohe Betonüberdeckungen gefordert, was der Umsetzung filigraner Bauweisen mit geringen Dicken entgegensteht (s. etwa [1], [2]). Daher ist die Erforschung von neuartigen Betonstrukturen mit Leichtbaueigenschaften unter Anwendung von textilen Bewehrungen seit einigen Jahren Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Arbeiten, z. B. in den DFG-SFB 528 und 532, im BMBF-Vorhaben C³ und zahlreichen internationalen Projekten, z. B. [1], [3]–[5]).

Die Herstellung frei geformter Beton-Leichtbauelemente erfordert in Abhängigkeit vom Krümmungszustand eine gezielte Einstellung der Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons, wie bspw. der dynamischen Viskosität und des zeitabhängigen Fließverhalten, z. B. [6], [7]. Der Entwurf von solchen anforderungsspezifischen

1 Initial questions and objectives

The architecture of the 21st century is characterized by free form finding, whereby saving resources in combination with functional integration are increasingly important for efficient construction methods. Classic materials, such as steel reinforced concrete, quickly reach their limits in terms of organic shapes and functionalization. In addition, due to the corrosion tendency of the steel reinforcement, high concrete coverings are required, which prevents the implementation of filigree construction methods with small thicknesses (see e.g. [1], [2]). Therefore, the research of new types of concrete structures with lightweight properties using textile reinforcement has been the subject of intensive scientific work for some years, e.g. DFG-SFB 528 and 532, BMBF project C³ and numerous international projects, e.g. [1], [3]–[5]).

The production of free-form lightweight concrete elements requires a specific adjustment of the processing properties of the fresh concrete, such as the dynamic viscosity and the time-dependent flow behaviour, depending on the grade of curvature, see [6], [7]. The design of such requirement-specific mineral formulations is coupled with a large amount of exper-

mineralischen Rezepturen ist mit einem großen Versuchsaufwand gekoppelt, um neben den mechanischen und rheologischen Eigenschaften gleichzeitig auch Anforderungen hinsichtlich Schalungsform, Technologie und Qualität abzubilden. Aufgrund der Vielzahl von Parametern und Zielgrößen ist eine multikriterielle Optimierung zwingend erforderlich, z. B. [8]. Besondere Vorteile bieten hier Optimierungsalgorithmen auf Basis künstlicher neuronaler Netze als Verfahren der nicht-parametrischen Regression, vgl. etwa [9], [10]. Diese Verfahren wurden im Bauwesen und bei der Entwicklung von mineralischen Produkten bereits angewendet [11], bspw. zur Beurteilung der Betonfestigkeit anhand zerstörungsfrei ermittelter Kennwerte [12], zur Prognose der Langzeitverformung einer mit Textilbeton verstärkten Stahlbetonplatte [13] oder zu Analyse und Überwachung der Lebensdauer von Tunnelbauwerken [14].

Ferner erfordern derartige Leichtbaukonstruktionen neue anwendungsspezifische Füge- und Befestigungsmethoden. Speziell bei Fassadenelementen zählen Einlegteile wie Anker- und Hängeschienen zu den üblichen, oft patentierten Befestigungstechniken, vgl. bspw. [15], [16]. Bei Sandwichkonstruktionen dienen Inserts zur konzentrierten Lasteinleitung in die Deckschicht und zur Weiterleitung über den schubweichen Kern in die untere Decklage. Die Befestigung dünnwandiger Textilbetonbauteile erfolgt i. d. R. über punktförmige Lagerungen, z. B. [17]. Dabei stellen bisher vorrangig stabförmige Befestigungsmittel zur Verbindung ebener Platten untereinander den Stand der Forschung dar, [18]–[20], wobei die punktförmig eingeleiteten Lasten hohe Spannungskonzentrationen und oft eine drastische Reduzierung der Tragfähigkeit bewirken, z. B. [21]. Ein ähnliches Verhalten wird auch bei Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) beobachtet.

Im Vorhaben sollte eine automatische Rezepturanpassung unter Berücksichtigung von Restriktionen aus der Verarbeitungstechnologie, der Schalungskrümmung und den rheologischen Eigenschaften unter Verwendung geeigneter bionischer Verfahren wie bspw. neuronaler Netze

imentation, in order to represent not only the mechanical and rheological properties simultaneously, but also requirements with regard to formwork, technology and quality. Due to the large number of parameters and target variables, multi-criteria optimization is absolutely necessary [8]. Optimization algorithms based on artificial neural networks as methods of non-parametric regression offer particular advantages [9], [10]. These methods have already been used in construction and in the development of mineral products [11], for assessing concrete strength based on non-destructive parameters [12], for predicting the long-term deformation of a reinforced concrete slab reinforced with textile reinforced concrete (TRC) [13] or for analyzing and monitoring the lifespan of tunnel structures [14].

Furthermore, such lightweight constructions require new application-specific joining and fastening methods. In the case of façade elements in particular, insert parts such as anchors and hanging rails are among the usual, often patented fastening techniques [15], [16]. In sandwich constructions, inserts are used for concentrated load transmission into the cover layer via the flexible core to the lower cover layer. Thin-walled components made of TRC are usually attached by point bearings [17]. So far, mainly rod-shaped fasteners for connecting flat plates to each other represent the state of the art, [18]–[20]. The loads transmitted in a punctiform manner result in high stress concentrations and often a drastic reduction in the load-bearing capacity [21]. A similar behaviour is also observed with glass fibre reinforced plastic (GFRP) composites.

In the project, an automatic recipe adjustment should be carried out taking into account restrictions from the processing technology, the formwork curvature and the rheological properties using suitable bionic methods such as neural networks or genetic algorithms including validation in laboratory tests. Furthermore, novel metallic fractal inserts were to be developed to ensure even force transmission into the lightweight concrete elements.

oder genetischer Algorithmen inklusive einer Validierung in Laborversuchen erfolgen. Weiterhin sollten neuartige metallische Fraktalinserts für eine gleichmäßige Krafteinleitung in die Beton-Leichtbauelemente entwickelt werden.

2 Durchgeführte Arbeiten

2.1 Mathematische Beschreibung von Feinbetonen mittels genetischer Algorithmen

2.1.1 Struktur des Algorithmus

Gesucht war ein neuer Lösungsansatz für eine automatische Adaption von Betonmischungen basierend auf genetischen Algorithmen zur Optimierung unterschiedlicher Fitness-Funktionen. Hierbei wurde eine Methode entwickelt, die eine numerische Beschreibung von faserverstärkten Feinbetonmischungen in Abhängigkeit der Produktionstechnologie und dem Eigenschaftsspektrum des Betons erlaubt [26].

Im ursprünglichen Algorithmus ist die Genexpressionsprogrammierung (GEP) [22] eine Weiterentwicklung und Verknüpfung eines genetischen Algorithmus (GA), z. B. [23], [24], sowie des genetischen Programmierens (GP) [25]. Sowohl GA als auch GP sind stochastische, populationsbasierte Optimierungsheuristiken, welche nach dem natürlichen Prinzip der Evolution (Selektion, Mutation, Rekombination) iterativ neue und i. A. besser angepasste Lösungsvorschläge generieren. Diese Vorschläge sind mathematische Funktionen, welche die Messergebnisse mit unterschiedlicher Genauigkeit approximieren. Damit die entsprechenden Zwischenlösungen während des Optimierungslaufes untereinander verglichen werden können, muss diesen ein Tauglichkeits- bzw. Qualitätsmaß (Fitness) zugeordnet werden, das den Abstand zu den Messergebnissen angibt [26].

2.1.2 Programmierung der Individuen

Der kanonische GEP-Algorithmus verwendet eine Graphen- oder Baumstruktur (*expression trees*) für die Darstellung der mathematischen

2 Work performed

2.1 Mathematical description of fine concrete using genetic algorithms

2.1.1 Structure of the algorithm

A new approach was used to adapt concrete mixtures automatically based on genetic algorithms to optimize different fitness functions. A method was developed that allows a numerical description of fibre reinforced fine concrete mixes depending on the production technology and the property spectrum of the concrete [26].

In the original algorithm, gene expression programming (GEP) [22] is a further development and linkage of a genetic algorithm (GA) [23], [24] and genetic programming (GP) [25]. Both GA and GP are stochastic, population-based optimization heuristics, which generate iteratively new and generally better adapted solutions according to the natural principle of evolution (selection, mutation, recombination). These suggestions are mathematical functions that approximate the measurement results with different levels of accuracy. In order to compare the corresponding interim solutions with each other during the optimization run, they must be assigned a quality measure (fitness) that indicates the distance to the measurement results [26].

2.1.2 Programming individuals

The canonical GEP algorithm uses a graph or tree structure (expression trees) for the representation of the mathematical expressions, but only in a subsequent translation step. The basic representation of the different expression trees and thus the encoded mathematical expressions takes place in the form of a vector representation analogous to the GA. These vectors, which consist of elementary mathematical function and argument symbols, are then converted into specific terms one after the other. On the one hand, such a vectorial representation increases the expressive power since mathematical expressions of different complexity

Ausdrücke, jedoch erst in einem nachgeschalteten Übersetzungsschritt. Die Basisdarstellung der verschiedenen *expression trees* und damit der kodierten mathematischen Ausdrücke erfolgt in Form einer vektoriellen Repräsentation analog zum GA. Diese aus elementaren mathematischen Funktions- und Argumentsymbolen bestehenden Vektoren werden anschließend der Reihe nach in konkrete Terme überführt. Eine derartige vektorielle Darstellung erhöht zum einen die Ausdrucksmächtigkeit, da trotz konstanter Vektorenlängen mathematische Ausdrücke unterschiedlicher Komplexität kodiert werden. Zum anderen lassen sich bei der Optimierung genetische Operatoren auf Vektorebene wesentlich flexibler anwenden. Um eine eindeutige Transformation der vektoriellen Darstellung in einen gültigen mathematischen Ausdruck zu gewährleisten, müssen für den Aufbau eines Chromosoms verschiedene, in [26] ausführlich dargelegte Bedingungen berücksichtigt werden.

2.1.3 Gene expression programming mit freien Koeffizienten (GEP-FC)

Bei der Dekodierung der Individuen wird das Ziel verfolgt, über einen genetischen Optimierungsalgorithmus geschlossene mathematische Ausdrücke zu generieren, die eine gegebene Punktwolke (*target*) am besten beschreiben. Um jedoch weitgehend kompakte mathematische Ausdrücke zu erhalten, wird hier der GEP-Basisalgorithmus um einen zusätzlichen inneren Optimierungsschritt ergänzt. Hierfür werden die Elementarfunktionen des *Head*-Bereichs als mehrdimensionale Schar in Form eines Blockes mit freien Koeffizienten w_i verallgemeinert. Werden die einzelnen *expression trees* zu mathematischen Teilausdrücken zusammengefasst und additiv miteinander verknüpft. Vertiefende Ausführungen zu dieser Thematik finden sich in [26].

2.1.4 Zusammensetzung des faserverstärkten Feinbetons

In Tabelle 1 ist die Mischungszusammensetzung eines faserverstärkten Feinbetons für

are encoded despite constant vector lengths. On the other hand, genetic operators at vector level can be used much more flexibly when optimizing. In order to ensure a clear transformation of the vector representation into a valid mathematical expression, various conditions have to be taken into account for the construction of a 'chromosome', detailed in [26]

2.1.3 Gene expression programming with free coefficients (GEP-FC)

When decoding individuals, the aim is to use a genetic optimization algorithm to generate closed mathematical expressions that describe a given point cloud. However, in order to obtain largely compact mathematical expressions, the GEP basic algorithm is supplemented by an additional internal optimization step. For this purpose, the elementary functions of the head area are generalized as a multidimensional family in the form of a block with free coefficients w_i . The individual expression trees are combined into mathematical partial expressions and additively linked with each other. More detailed information on this topic can be found in [26].

2.1.4 Composition of the fibre reinforced fine concrete

Table 1 shows the mix composition of a fibre reinforced fine concrete for a façade application. In order to test the new solution for an automatic adaptation of the concrete formulation based on GEP-FC algorithms, the mixture was varied in the dimension water-binder content $w/b \equiv x$ between 0.28 and 0.42. The goal was a homogeneous and stable fine concrete without segregation tendency. The fine concrete was mixed in an Eirich R05T intensive mixer. The mixing parameters and the total mixing time can be found in [27].

2.1.5 Test specimen and test setup for the fibre reinforced fine concrete

The test specimens were manufactured and stored in accordance with DIN EN 12390-2 [29]. The workability of the fresh concrete was deter-

Mischungsoptimierung mit GA Mixture optimization with GA											Inserttests Insert tests	
Konstante Komponenten Constant components [kg/m ³]												
Weißzement White cement CEM I 52,5 R											500	580
Amorphes Alumosilikat Amorphous aluminosilicate											55	116
Dolomitfüller Dolomite filler											300 ^{a)}	300 ^{b)}
AR-Glas-Kurzfasern AR-glass short fibres (integral, 45 tex)											5 ^{c)}	1,2 ^{d)}
Hochleistungsfließmittel auf Polycarboxylatetherbasis (PCE), Feststoffanteil 30 M.-% Superplasticizer based on polycarboxylat ether (PCE), solid content 30 wt%											11	27,8
Stabilisierer (Pulver) Stabilizer (powder)											-	1,5
Variable Komponenten Varied components [kg/m ³]	Variante Variation											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Dolomitsand Dolomite sand 0,1/1	1350	1320	1270	1250	1200	1190	1180	1170	1150	1120	990	
Wasser Water	170	180	195	205	220	225	230	235	242	252	234	
w/b-Wert w/b content [-]	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	0,42	0,34	

^{a)} mittlere Korngröße | average grain size: 70 µm, ^{b)} ~54 µm; ^{c)} 12 mm, ^{d)} 13 mm

Tabelle 1: Qualitative und quantitative Zusammensetzung des Feinbetons | **Table 1:** Qualitative and quantitative composition of the fine grained concrete mix

eine Fassadenanwendung dargestellt. Um den neuen Lösungsansatz für eine automatische Adaption der Betonrezeptur basierend auf GEP-FC-Algorithmen zu testen, wurde die Mischung in der Dimension Wasser-Bindemittel-Gehalt $w/b \equiv x$ zwischen 0,28 und 0,42 variiert. Ziel waren homogene und stabile Feinbetone ohne Entmischungsneigung. Der Feinbeton wurde in einem Intensivmischer Eirich R05T gemischt. Die Mischparameter sowie die Gesamtmischzeit sind [27] zu entnehmen. In Tabelle 1 ist zudem die Mischungszusammensetzung des Betons für die Insertversuche (s. Abschnitte 2.2.2 und 3.2) enthalten.

2.1.5 Probekörper und Versuchsaufbau für den faserverstärkten Feinbeton

Die Herstellung und Lagerung der Probekörper erfolgte nach DIN EN 12390-2 [29]. Die Verarbeitbarkeit des Frischbetons wurde anhand des Ausbreitmaßes nach DIN EN 12350-5 [30] bestimmt. Die 3-Punkt-Biegezugfestigkeit (Bild 1, links) wurde an 225 × 50 × 15 mm³ großen Proben (Spannweite 200 mm) ermittelt, die Druckfestigkeit

ermittelt wurde basierend auf dem Slump-Test nach DIN EN 12350-5 [30]. Die 3-Punkt-Biegezugfestigkeit (Fig. 1, left) wurde an Proben mit den Abmessungen 225 × 50 × 15 mm³ (Spannweite 200 mm) und der Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 [31] an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm (Fig. 1, right).

2.2 Design of metallic inserts for local application of force in textile reinforced lightweight concrete elements

2.2.1 Shape variation

Das Ziel war die Entwicklung von metallischen Bruchinserten, die eine konsistente Übertragung von konzentrierten Kräften in Leichtbetonelemente ermöglichen. Für den konstruktiven Entwurf dieser Inserte, die Verbindung zwischen metallischem Insert und textilbewehrtem Leichtbetonelement sowie das Riss- und Versagensverhalten wurden analysiert. Fig. 2 zeigt eine Auswahl der entworfenen Geometrien mit unterschiedlichen Plattenabmessungen (20...40 mm) und -formen, Inserthöhen (11...20 mm) und Versteifungselementen.



Bild 1: Ermittlung von Biegezug- und Druckfestigkeit | Fig. 1: Determination of bending tensile and compressive strength

nach DIN EN 12390-3 [31] an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm, Bild 1, rechts.

2.2 Gestaltung von metallischen Inserts zur lokalen Kräfteinleitung in textilverstärkte Beton-Leichtbauelemente

2.2.1 Formvariation

Es sollten metallische Fraktal-Inserts entwickelt werden, die eine gleichmäßige Einleitung von konzentrierten Kräften in Beton-Leichtbauelemente gestatten. Zum konstruktiven Entwurf dieser Inserts wurden der Verbund zwischen metallischer Kräfteinleitung und Textilbetonelement sowie Riss- und Versagensverhalten analysiert. Bild 2 zeigt eine Auswahl von entworfenen Geometrien mit verschiedenen Tellergrößen (20...40 mm) und -formen, Schafthöhen (11...20 mm) und Versteifungselementen.

2.2.2 Probekörper und Versuchsaufbau für die Inserts

Die Herstellung der Inserts erfolgte mittels institutseigener generativer Lasersinteranlage SLM 250HL (SLM Solution) oder durch das spanende Fertigungsverfahren Drehen. Die runden Referenzinserts besaßen einen Tellerdurchmesser von 30 mm und eine Schafthöhe von 16 mm. Die Inserts wurden in einer speziellen, $300 \times 300 \times 40 \text{ mm}^3$ großen Schalung befestigt und mit Feinbeton ausgegossen, Bild 3.

2.2.2 Test specimen and test setup for the inserts

The inserts were manufactured using the institute's own generative laser sintering system SLM 250HL (SLM Solution) or by turning. The round reference inserts had a plate diameter of 30 mm and a shaft height of 16 mm. The inserts were fastened in a special, $300 \times 300 \times 40 \text{ mm}^3$ formwork and poured with fine concrete, Fig. 3.

The qualitative and quantitative composition of the mixture for the used fine concrete is shown in Table 1, right column. The bulk density of the hardened concrete was 2.19 g/cm^3 . The compressive strengths and bending tensile strengths were 102 MPa and 14.1 MPa after 28 days.

The experimental verification of the inserts was carried out after 28 days in pull-out tests based on ETAG 034 [32]. 10 samples were tested for tension each in 90° , 0° and 45° direction, Fig. 4. Based on the test design Family B according to ETAG 034, the 0° tests were carried out with a test ring with a diameter of 180 mm. The test specimens were inserted into the Z250 tractor (Zwick/Roell) by means of a fork joint. The samples at 90° and 45° were attached using a specially designed test adapter (Fig. 4, centre and right). The sample is held against a plate with a defined angle and the insert is pulled out through an opening.

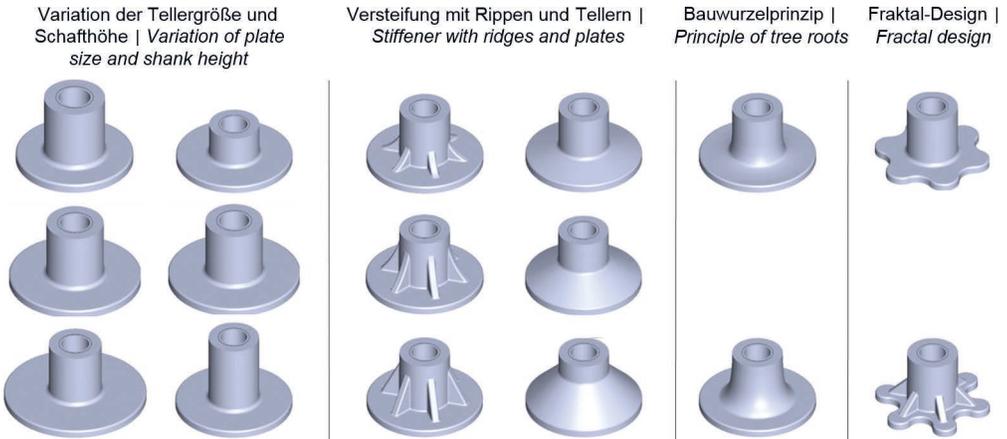


Bild 2: Variation der Inserts | Fig. 2: Variation of inserts

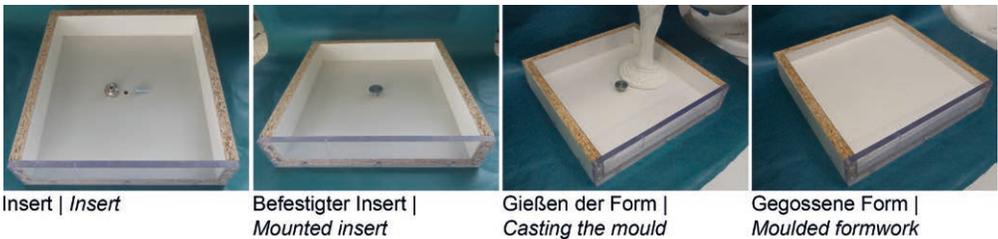


Bild 3: Herstellung der Proben für die Insert-Auszugversuche | Fig. 3: Production of the pull-out specimen

Tabelle 1, rechte Spalte, ist die qualitative und quantitative Zusammensetzung der Mischung für den verwendeten Feinbeton zu entnehmen. Die Rohdichte des Festbetons lag bei 2,19 g/cm³. Für die Druck- und Biegezugfestigkeiten betragen 102 bzw. 14,1 MPa nach 28 Tagen.

Die experimentelle Verifikation der Inserts erfolgte nach 28 Tagen in Auszugversuchen in Anlehnung an ETAG 034 [32]. Dabei wurden jeweils 10 Proben in 90°, 0°- und 45°-Richtung auf Zug geprüft, Bild 4. In Anlehnung an das Prüfdesign *Family B* nach ETAG 034 wurden die 0°-Versuche mit einem Prüfring mit 180 mm Durchmesser durchgeführt. Die Aufnahme der Probekörper in die Zugmaschine Z250 (Zwick/Roell) erfolgte mittels Gabelgelenk. Die Proben in den Winkeln 90° und 45° wurden mit einem eigens konstruierten Prüfadapter befestigt (Bild 4, Mitte und rechts). Hierbei werden die Probe gegen eine im Winkel definiert einge-

2.2.3 Simulation and verification of the pull-out behaviour of inserts made of fine concrete

Building on the experimental investigations of the reference inserts, calculations and simulations were carried out with the FEM program AB-AQUS. The calculation model was carried out as a quarter model in order to reduce the computing time. Cross-linking was done with tetrahedron (C3D4) and hexahedron elements (C3D8R) to investigate the influence of cross-linking. Concrete Damaged Plasticity was used as the material model, since the material parameters can be adjusted over a wide range and thus short fibre reinforced concrete can also be mapped. Similar to section 2.2.1, different insert geometries were considered.

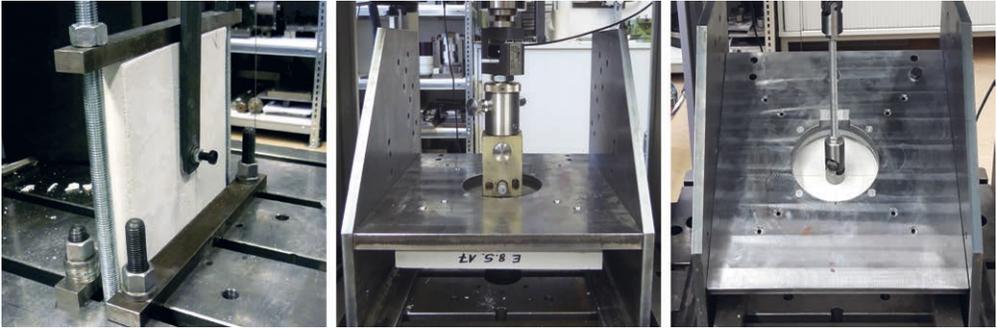


Bild 4: Versuchsaufbau der winkelabhängigen Auszugversuche | Fig. 4: Test set-up of the angle-dependent pull-out test

stellte Platte gehalten und das Insert durch eine Öffnung ausgezogen.

2.2.3 Simulation und Verifikation des Auszugverhaltens von Inserts aus Feinbeton

Aufbauend auf den experimentellen Untersuchungen der Referenzinserts wurden Berechnungen und Simulationen mit dem FEM-Programm ABAQUS durchgeführt. Das Berechnungsmodell wurde als Viertelmodell ausgeführt, um die Rechenzeit zu reduzieren. Die Vernetzung erfolgte mit Tetraeder- (C3D4) und Hexaederelementen (C3D8R), um den Einfluss der Vernetzung zu untersuchen. Als Materialmodell wurde *Concrete Damaged Plasticity* verwendet, da die Materialparameter in einem weiten Bereich angepasst werden können und somit auch kurzfaserverstärkter Beton abgebildet werden kann. Analog zu Abschnitt 2.2.1 wurden verschiedene Insertgeometrien betrachtet.

2.3 Gestaltung von belastungsgerechten Krafterleitungsstrukturen aus textilen Halbzeugen

Die in Chemnitz entwickelte MAGE-KS-Technik besitzt den Vorteil der Herstellung von Multiaxialgelegen mit variabelaxialem Faserverlauf. Damit kann eine gezielte Fadenumorientierung entlang der Kraftflüsse erreicht und so die einwirkende Belastung in das textilverstärkte Beton-Leichtbauelement beanspruchungsgerecht eingeleitet werden. Im Projekt wurden verschiede-

2.3 Design of load-bearing force transmission structures made of semi-finished textile products

The MAGE-KS technology developed in Chemnitz has the advantage of producing multiaxial beds with variable-axial fibre orientation. In this way, a targeted thread reorientation along the force flow can be achieved and thus the load acting on the textile reinforced lightweight concrete element can be introduced according to the stress. Various MAGE-KS structures were machined and examined in the project. Afterwards, manufacturing tests and experimental load capacity tests were carried out acc. to section 2.2.2 on both MAGE-KS samples and standard inserts as reference. The AR glass structures were pre-curved with a thermosetting matrix, fastened in the formwork form and poured with concrete (composition from Table 1, right, but without short AR glass fibres), Fig. 5.

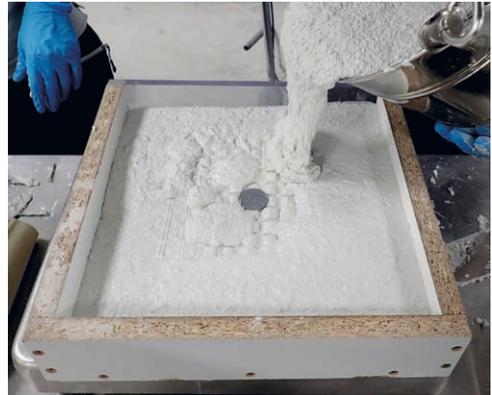
3 Results and discussion

3.1 Mathematical description using genetic algorithms

3.1.1 Properties of fresh and hardened concrete

Fig. 6 shows the characterization of the fibre reinforced fresh and hardened concrete mixes after 28 days. The fresh concrete has a slump of up to 70 cm depending on the w/b content. The concrete mixes therefore include all consistency classes according to DIN EN 12350-5 [30],

dene MAGE-KS-Strukturen maschinell gefertigt. Anschließend wurden Herstellungsversuche und experimentelle Tragfähigkeitstests nach Abschnitt 2.2.2 sowohl an MAGE-KS-Proben als auch an Standard-Inserts als Referenz durchgeführt. Hierbei wurden die AR-Glas-Strukturen mit einer duroplastischen Matrix vorgekrümmt, in der Schalungsform befestigt und mit Beton (Zusammensetzung aus Tabelle 1, rechts, jedoch ohne AR-Glas-Kurzfasern) ausgegossen, Bild 5.



3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Mathematische Beschreibung mittels genetischer Algorithmen

3.1.1 Eigenschaften des Frisch- und Festbetons

Bild 6 zeigt die Charakterisierung der faserverstärkten Frisch- und Festbetonmischungen nach 28 Tagen. Der Frischbeton besitzt ein Ausbreitmaß von zu bis 70 cm in Abhängigkeit des w/b-Gehalts. Somit umfassen die Betonmischungen alle Konsistenzklassen nach DIN EN 12350-5 [30], angefangen bei sehr steif (Mischungen 1–4) bis selbstverdichtend (Mischungen 9 und 10), s. Fotos in Bild 6. Eine Steigerung des w/b-Gehaltes geht mit einem Anstieg der Fließfähigkeit des faserverstärkten Feinbetons einher. Die Druck- und die 3-Punkt-Biegezugfestigkeiten der Festbetone variierten zwischen 55,4 und 79,2 MPa bzw. 4,8 und 10,8 MPa. Die vergleichsweise geringen Festigkeiten der Mischungen 1–4 resultierten aus der sehr steifen Konsistenz und dem rüttelfreien Einfüllen in die Schalung, wodurch hohe Luftgehalte eingeschlossen blieben, was zu einer Abnahme der Festigkeiten führte.

3.1.2 Lösung des Gene Expression Programming mit freien Koeffizienten (GEP-FC)

Die Forderung nach einem möglichst kompakten, aber dennoch repräsentativen mathematischen Ausdruck wurde durch eine schrittweise Erhöhung der erlaubten Komplexität (hinsichtlich verschiedener Parameter wie zugelassene Basisfunktionen, Verschachtelungstiefen und

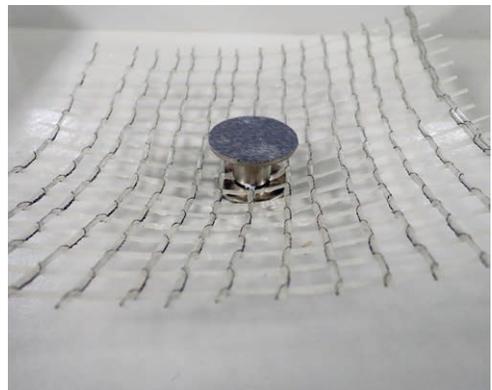


Bild 5: Preform-Probekörper | Fig. 5: Preform test specimen

starting with very stiff (mixes 1–4) to self-compacting (mixes 9 and 10), see photos in Fig. 6. An increase in the w/b content results in an increase in the flowability of the fibre reinforced fine concrete. The pressure and 3-point bending tensile strength of the hardened concretes varied between 55.4 and 79.2 MPa and 4.8 and 10.8 MPa, respectively. The comparatively low strength of mixtures 1–4 resulted from the very stiff consistency and the vibration-free filling in the formwork, which included high air contents which led to a strength decrease.

3.1.2 Solution of Gene Expression Programming with Free Coefficients (GEP-FC)

The requirement for a compact, but nevertheless representative mathematical expression was met by gradually increasing the permitted

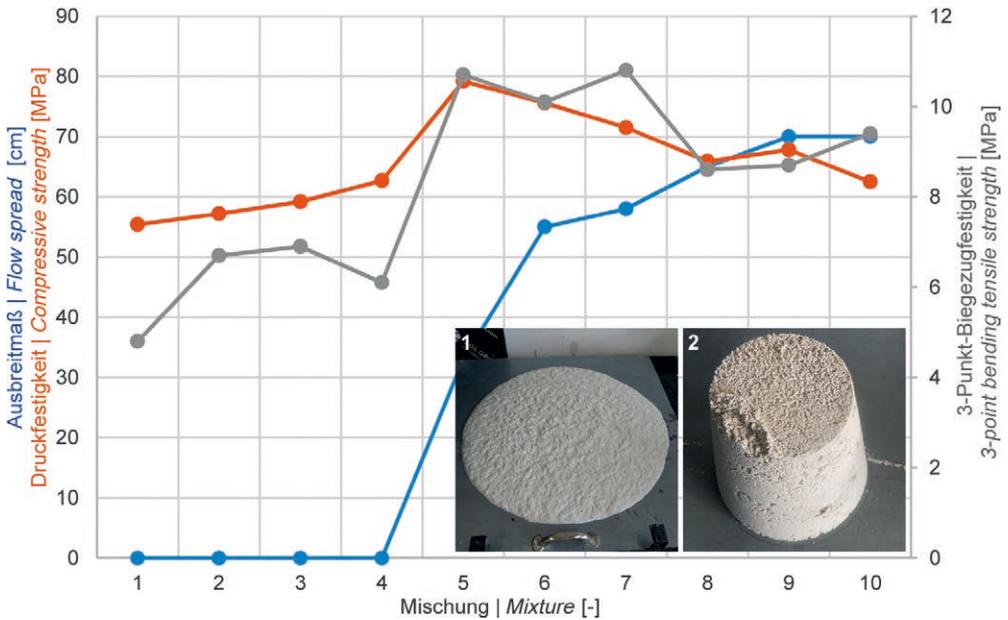


Bild 6: Eigenschaften der faserverstärkten Frisch- und Festbetonmischungen (Fotos: Ausbreitmaße der Mischungen 1 und 2) | Fig. 6: Properties of the fresh and hardened fibre reinforced concrete mixes (photos: flow spread of mixtures 1 and 2)

Anzahl der Teilausdrücke) Rechnung getragen, für Details s. [26], [27]. So erfolgten im ersten Schritt Durchläufe mit einer einfachen Verschachtelungstiefe $h = 1$ und ohne zusätzliche Teilausdrücke (einzelnes Gen). Nach 30 unabhängigen Läufen des GEP-FC-Algorithmus ergab sich die Lösung schließlich mit dem besten Chromosom lt. Tabelle 2. Die Optimierungsergebnisse des Ausbreitmaßes, der Druckfestigkeit und der 3-Punkt-Biegezugfestigkeit nach der Transformation der mathematischen Darstellung sind in den Gl. (1)–(3) dargestellt.

complexity (with regard to various parameters such as permitted basic functions, nesting depths and number of partial expressions), for details see [26], [27]. In the first step, runs were carried out with a simple nesting depth $h = 1$ and without additional partial expressions (single gene). After 30 independent runs of the GEP-FC algorithm, the solution finally came up with the best chromosome according to Table 2. The optimization results of the slump, the compressive strength and the 3-point bending tensile strength after the transformation of the mathematical representation are shown in Eq. (1)–(3).

Ausbreitmaß

Flow spread

$$f(x) = w_1 + w_2 e^{w_3 e^{w_4 e^{w_5 x}}} \tag{1}$$

Druckfestigkeit

Compressive strength

$$f(x) = w_1 + \frac{w_2 - w_3 \sqrt{w_4 + w_5 x}}{w_6 + \sin(w_7 + w_8 x)} \tag{2}$$

1. Gen 1 st Gene							
Ausbreitmaß Flow spread	exp	exp	exp	x	x	x	x
Druckfestigkeit Compressive strength	/	√	sin	x	x	x	x
3-Punkt-Biegezugfestigkeit 3-point-bending tensile strength	-	cos	sin	x	x	x	x

Tabelle 2: Beste Chromosome nach 30 unabhängigen GEP-FC-Läufen | Table 2: Best chromosome after 30 independent GEP-FC runs

3-Punkt-Biegezugfestigkeit

3-point bending tensile strength

$$f(x) = w_1 + w_2 \cos(w_3 + w_4 x) + w_5 \sin(w_6 + w_7 x) \tag{3}$$

Die Ergebnisse der Berechnungen für Ausbreitmaß, Druckfestigkeit und 3-Punkt-Biegezugfestigkeit nach der Anpassung der freien Koeffizienten der Gl. (1)–(3) sind in Bild 7 dargestellt (durchgezogene Linien). Normalerweise sinken beide Festigkeitswerte mit steigendem w/b-Gehalt. In diesen Fall steigt die Druckfestigkeit bis zu einem w/b-Gehalt von 0,36 und sinkt bei höherem w/b-Gehalt wieder. Die Ursache dafür ist die sehr steife Konsistenz der faserverstärkten Feinbetone 1–4. Dennoch korreliert das mit den GEP-FC-Algorithmen generierte parametrische Modell gut mit den gemessenen Daten.

The results of the calculations for the slump, the compressive strength and the 3-point bending tensile strength after the adjustment of the free coefficients of Eq. (1)–(3) are shown in Fig. 7 (solid lines). Normally, these both strength values decrease with increasing w/b content. Here, the compressive strength increases up to a w/b content of 0.36 and decreases again with a higher w/b content. The reason for this is the very stiff consistency of the mixes 1–4. Nevertheless, the parametric model generated with the GEP-FC algorithms correlates well with the measured data.

Das GEP-FC-Verfahren kann somit in einem nächsten Schritt für das Erstellen von faserverstärkten

As a result, the GEP-FC procedure can be used for finding closed mathematical expressions of FRC mixtures, which are only based on measured data. Beyond that, the significant advantage of the GEP-FC method is the ability of an automatic analysis of datasets resulting in explicit mathematical expressions, which allows a compact representation of measurement results. This has been shown by the results of the practical investigations and the subsequent mathematical calculations. The calculated

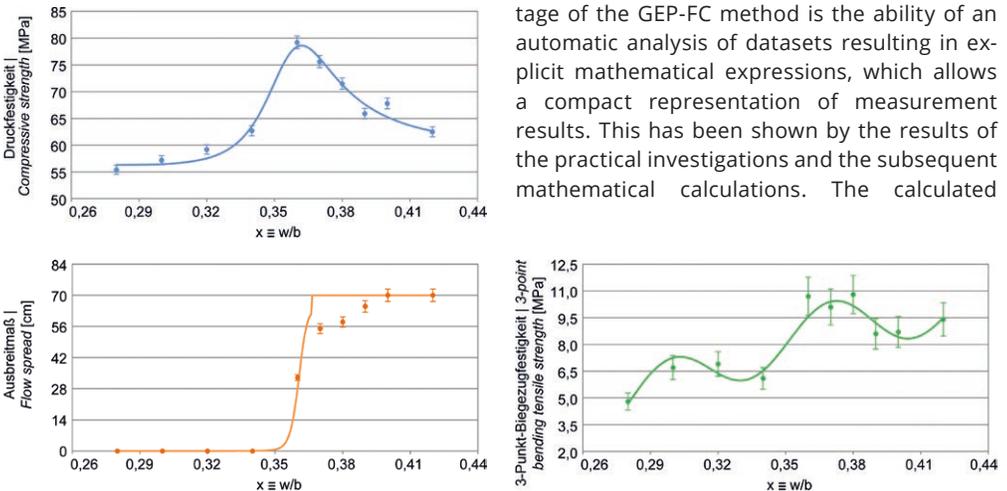


Bild 7: Ergebnisse nach den GEP-FC-Optimierungsläufen, s. [26], [27] | Fig. 7: Results after GEP-FC optimizations runs, see [26], [27]

Feinbetonrezepturen verwendet werden, welche ausschließlich aus gemessenen Daten bestehen. Weiterhin liegt der bedeutende Vorteil der GEP-FC-Methode in der Fähigkeit zur automatischen Analyse von Datensätzen zur Erstellung eindeutiger mathematischer Ausdrücke, welche eine kompakte Darstellung der gemessenen Daten erlauben. Das wurde in den Ergebnissen der praktischen Untersuchungen und den nachfolgenden mathematischen Berechnungen bewiesen. Die berechneten mathematischen Ausdrücke zeigten im Allgemeinen eine gute Korrelation mit den gemessenen Daten. Das bedeutet, dass die Funktionswerte während der Testläufe als konstant angenommen wurden. Grundsätzlich können jedoch bessere Übereinstimmungen erreicht werden. Der GEP-FC-Algorithmus kann sogar einen mathematischen Ausdruck für eine automatische Adaption der Betonmischung finden, wenn keine Plausibilität der gemessenen Daten vermutet werden kann. Dadurch wird auch die Schwäche des GEP-FC-Algorithmus gezeigt: Der Algorithmus ist abhängig von den gemessenen Daten und deren Richtigkeit.

Im Ergebnis erlaubt der Algorithmus die Suche nach Zusammenhängen in Form von geschlossenen mathematischen Beschreibungen und generiert somit ein mathematisches Verhaltensmodell. Für weitere Untersuchungen muss nur der dazugehörige Modellkoeffizient angepasst werden. Das resultiert in einer signifikanten Reduktion des experimentellen und analytischen Aufwandes, um die mechanischen und rheologischen Eigenschaften sowie Anforderungen hinsichtlich Schalungsform, Technologie und Qualität zu erfüllen. Außerdem erleichtert es die Sensitivitätsanalyse oder die Integration in weitere Berechnungsmodelle.

3.2 Auszugverhalten der metallischen Inserts

3.2.1 Experimentelle Untersuchungen

Bei den Auszugversuchen kam es in Abhängigkeit der unterschiedlichen Auszugswinkel zu einem charakteristischen Auszugverhalten. Bild 8 zeigt exemplarisch Auszugversuche an Inserts in 0°- und 90°-Zugrichtung. Während der Tests kam es zur

mathematischen Ausdrücke pointed up a good correlation with the measured data in general. This means, the function values are considered consistent with the given test points. A higher match can be achieved in principle. However, it provides only unnecessarily complex models, especially if one takes into account the measurement accuracy to be realized as well as material variations. Of course, even assuming that the measured data are completely implausible, the GEP-FC algorithm is able to generate a mathematical expression for an automatic adaptation of concrete formulations. However, this also reveals the weakness of the GEP-FC algorithm: it depends on the measurement data and the veracity of these.

In the end, the algorithm allows the search for relations in the form of a closed mathematical description and thus generates a model of the material behaviour. For further analysis, only the corresponding model coefficients have to be fitted. And this results in a significant reduction of high experimental and analysis effort in order to meet the mechanical and rheological properties as well as requirements regarding to formwork, technology and quality. Moreover, it facilitates the sensitivity analysis or the integration in further computational models, which is often essential in engineering.

3.2 Pull-out behaviour of the metallic inserts

3.2.1 Experimental investigations

In the pull-out tests, there was a characteristic pull-out behaviour depending on the different pull-out angles. Fig. 8 shows examples of pull-out tests on inserts in 0° and 90° pulling directions. During the tests, macro-cracking occurred along the top of the concrete and subsequently the fracture cone was formed. The inserts did not experience any plastic deformation. The pull-out forces of the reference insert with 30 mm plate diameter and 16 mm shaft height were 7.8 kN at 0°, 7.7 kN at 45° and 12.4 kN at 90°. The mostly asymmetrical breakout cone with angles between 15° and 30° resulted from slight deviations in the load

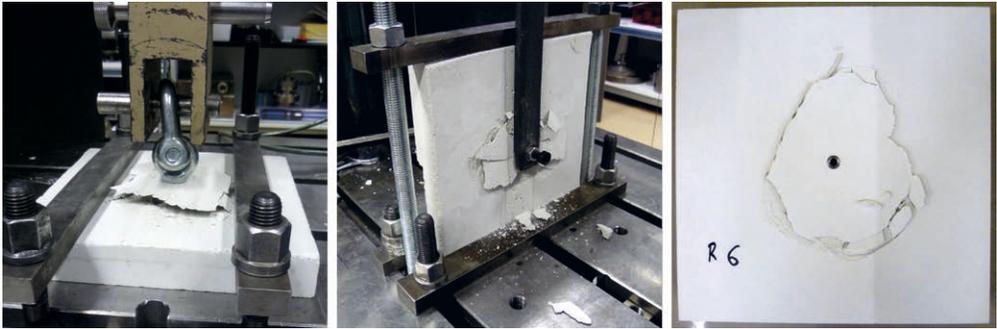


Bild 8: Auszugversuche der in Feinbeton integrierten Inserts; v. l. n. r.: Test in 0°- und in 90°-Richtung, Bruchbild nach 0°-Auszugversuch | **Fig. 8:** Pull-out tests of inserts embedded in fine grained concrete; from left to right: tests in 0° and 90° direction, fracture pattern after pull-out test in 0° direction

Makrorissbildung entlang der Betonoberseite sowie anschließend zur Ausbildung des Bruchkegels. Die Inserts erfuhren dabei keine plastische Deformation. Die Auszugkräfte des Referenzinserts mit 30 mm Tellerdurchmesser und 16 mm Schafthöhe betragen bei 0° 7,8 kN, bei 45° 7,7 und bei 90° 12,4 kN. Der zumeist unsymmetrische Ausbruchkegel mit Winkeln zwischen 15° und 30° resultierte aus geringen Abweichungen beim Lasteintrag, da bei realen Tests i. d. R. geringe Abweichungen vom Idealfall nicht ausgeschlossen werden können.

3.2.2 Berechnung des Auszugverhaltens der Inserts aus Feinbeton

Die Verifikation der Experimente sowie anschließend die Vorausberechnung weiterer Insertgeometrien erfolgten mit dem neu entwickelten Berechnungsmodell. In Abhängigkeit der Vernetzung und verwendeten Modellelemente ergaben sich teils signifikante Abweichungen der Auszugkräfte. Insbesondere die zunehmend feingliedrigere Vernetzung bedingte einen um ein Vielfaches erhöhten Rechenaufwand. Aufgrund dessen wurde schließlich ein Berechnungsmodell basierend auf relativen Auszugkräften erstellt. Hierbei ist das simulierte Versagensverhalten analog dem aus den experimentellen Untersuchungen. Allerdings erreichen die berechneten qualitativen Auszugkräfte der einzelnen Insertgeometrien nicht die experimentell ermittelten Werte, womit einzig der relative Vergleich der verschiedenen Inserts untereinander zulässig ist.

input, since in real tests small deviations from the ideal case cannot be ruled out.

3.2.2 Calculation of the pull-out behaviour of the inserts from fine concrete

The experiments were verified and the further calculation of further insert geometries was carried out using the newly developed calculation model. Depending on the networking and model elements used, there were sometimes significant deviations in the pull-out forces. In particular, the increasingly fine-grained networking necessitated a multiple increase in computing effort. Because of this, a calculation model based on relative pull-out forces was finally created. The simulated failure behaviour is analogous to that from the experimental investigations. However, the calculated qualitative pull-out forces of the individual insert geometries do not reach the experimentally determined values, which means that only the relative comparison of the different inserts with each other is permitted.

Fig. 9 shows the results of the simulation of the reference insert (Fig. 9 left) as an example. Analogous to the experiment, a macro crack formation takes place along the top of the concrete and then the fracture cone is formed. The calculated break angles are in a realistic range of 15° to 30°. In contrast to the experiment, the simulation was carried out with an ideal angle of 0°, but the irregular

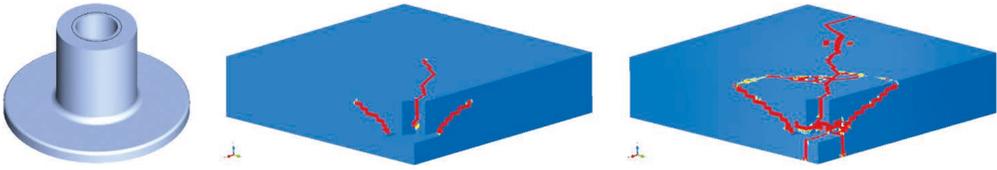


Bild 9: Simulation des Auszugs eines Referenzinserts aus einer Feinbetonplatte, Zug in 0°-Richtung; v. l. n. r.: Referenzinsert, Makrorissbildung, Ausbildung des Bruchkegels | **Fig. 9:** Simulation of pull-out of a reference insert embedded in fine grained concrete, pull-out test in 0° direction; from left to right: reference insert, macrocrack formation, formation of fracture cone

In Bild 9 b), c) sind exemplarisch die Ergebnisse der Simulation des Referenzinserts (links in Bild 9) dargestellt. Analog zum Experiment finden eine Makrorissbildung entlang der Betonoberseite sowie anschließend die Ausbildung des Bruchkegels statt. Die berechneten Bruchwinkel liegen in einem realistischen Bereich von 15° bis 30°. Die Simulation erfolgte im Gegensatz zum Experiment zwar mit einem idealen Winkel von 0°, aber durch die unregelmäßige Vernetzung ergab sich ein unsymmetrischer Bruchkegel entsprechend dem realen Versuch.

In Tabelle 3 sind exemplarisch die berechneten relativen Auszugskräfte in 0°-Richtung dargestellt. Ein auf 40 mm vergrößerter Tellerdurchmesser ergab eine hohe relative Auszugskraft von 113 %. Im Vergleich zur Referenz war das Versagen qualitativ gleich. Relative Auszugskräfte von 120 % zeigte das Insert mit einem kegligen Teller bei einem Winkel von 45°. Die verstärkte Makrorissbildung führte zu einer Erhöhung der relativen Auszugskraft. Die Rippenverstärkung eines weiteren Inserts bewirkte hingegen eine Kerbwirkung im Beton. Die Risse wurden an den Rippen initiiert, wodurch die Auszugskraft sank. Das Frak-

meshing resulted in an asymmetrical fracture cone in accordance with the real test.

Table 3 shows an example of the calculated relative pull-out forces in the 0° direction. A plate diameter enlarged to 40 mm resulted in a high relative pull-out force of 113%. The failure was qualitatively the same compared to the reference. The insert showed a relative pull-out force of 120% with a conical plate at an angle of 45°. The increased formation of macro cracks led to an increase in the relative pull-out force. The rib reinforcement of another insert, however, caused a notch effect in the concrete. The cracks were initiated on the ribs, which reduced the pull-out force. The fractal design resulted in a saving of material with increasing manufacturing effort and costs compared to the reference with almost the same pull-out force.

3.2.3 Experimental investigations of the calculated inserts

The tests in 0° direction showed 8.1 and 8.4 kN for the inserts with tapered plate shapes (columns 2 and 3 in table 4) and thus significantly

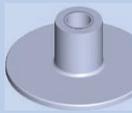
				
Durchmesser Teller Plate's diameter [mm]				
30	40	30	30	30
Relative Auszugskraft Relative pull-out force [%]				
100	113	88	120	106

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Insertgeometrien anhand von relativen Auszugskräften, Schafthöhe 16 mm | **Table 3:** Comparison of different geometries of inserts using relative pull-out forces, 16 mm shank height

			
Tellerwinkel Plate's angle [°]			
-	30	45	-
Berechnete relative Auszugskraft Calculated relative pull-out force [%]			
100	111	120	106
Mittelwert der Auszugskraft Mean pull-out force [kN (%)]			
7,8 (100)	8,1 (104)	8,4 (107)	7,6 (97)

Tabelle 4: Vergleich verschiedener Insertgeometrien anhand von ermittelten Auszugkräften, Tests in 0°-Richtung, Tellerdurchmesser 30 mm, Schafthöhe 16 mm | **Table 4:** Comparison of different inserts using determined pull-out forces in 0° direction, tests in 0° direction, plate diameter 30 mm, shank height 16 mm

tal-Design ergab bei nahezu gleich bleibender Auszugskraft eine Einsparung von Material bei steigendem Herstellungsaufwand und Kosten im Vergleich zur Referenz.

3.2.3 Experimentelle Untersuchungen der berechneten Inserts

Die Tests in 0°-Richtung ergaben für die Inserts mit kegeligen Tellerformen (Spalten 2 und 3 in Tabelle 4) 8,1 bzw. 8.4 kN und damit signifikant höhere Auszugkräfte im Vergleich zum Referenzinsert (Spalte 1). Mit umgerechnet 104 % bzw. 107 % relativer Auszugskraft stimmenversuch und Rechnung gut überein. Auch die mit 97 % ermittelte relative Auszugskraft des Fraktal-Inserts (rechte Spalte) zeigt im Vergleich zum Referenzinsert eine gute Übereinstimmung mit der Rechnung (100 % Auszugskraft). Demzufolge erlaubt das erstellte Berechnungsmodell eine Vorauslegung der Insertgeometrien anhand relativer Auszugkräfte, wodurch der Versuchsaufwand minimiert und geeignete Insertgeometrien vorausgesagt werden können.

Im Ergebnis ergaben sich die höchsten Auszugkräfte in 0°-Richtung mit 8,8 kN bzw. 113 % bei dem konischen Insert (Bild 10). Dabei verzögert die kegelförmige Geometrie des Inserts die Entstehung der Makrorisse auf der Betonoberseite und demzufolge die gesamte Rissbildung.

higher extraction forces compared to the reference insert (column 1). With the equivalent of 104% or 107% relative pull-out force, the experiment and the calculation agree well. The relative pull-out force of the fractal insert (right column), determined at 97%, also shows a good agreement with the calculation (100% pull-out force) compared to the reference insert. As a result, the computation model created enables the insert geometries to be predefined based on relative pull-out forces, which minimizes the experimental effort and allows the prediction of suitable insert geometries.

As a result, the highest pull-out forces in the 0° direction were 8.8 kN or 113% for the conical insert (Fig. 10). The conical geometry of the insert delays the formation of macro cracks on the



Bild 10: Konischer Insert | **Fig. 10:** Conical insert

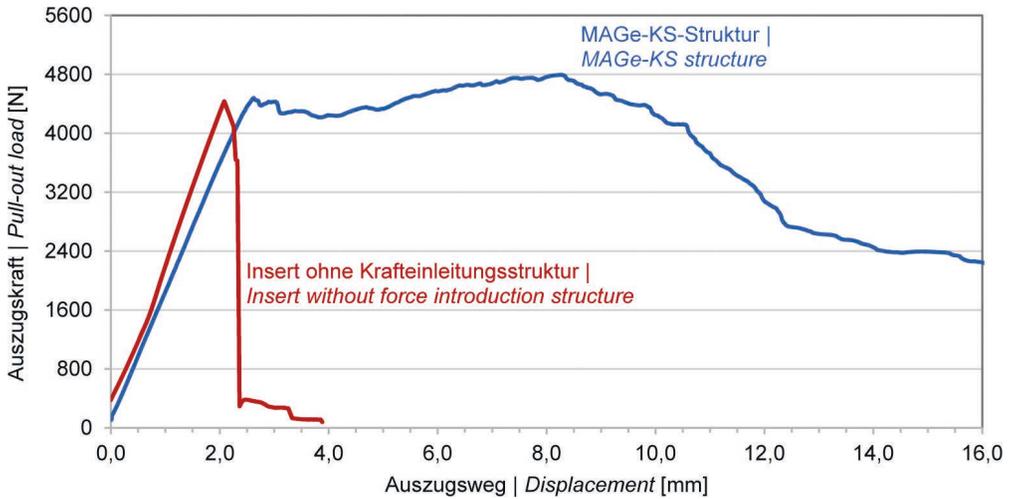


Bild 11: Auszugversuche in 0°-Richtung | Fig. 11: Pull-out tests in 0° direction

3.3 Auszugversuche an Preform-Elementen

Die Ergebnisse der Auszugversuche sind exemplarisch in Bild 11 dargestellt, Bild 12 zeigt eine Probe nach einem Auszugtest. Dabei ist neben dem Kraft-Weg-Diagramm der MAGe-KS-Probekörper auch ein Standard-Insert (s. Tabelle 4, Spalte 1) dargestellt. Die MAGe-KS-Struktur zeigt keine signifikante Änderung der mittleren Auszugskräfte im Vergleich zum Standard-Insert. Allerdings bewirkt die MAGe-KS-Struktur eine Verringerung der Spannungskonzentration im Lasteinleitungsbereich sowie eine deutlich höhere Festigkeit nach dem Erstriss, was demzufolge zu einer Quasi-Duktilität der Elemente führt. Gerade für Fassadenelemente bedeutet

top of the concrete and consequently the entire crack formation.

3.3 Pull-out tests with preform elements

The results of the pull-out tests are exemplarily shown in Fig. 11. Fig. 12 shows a sample after a pull-out test. In addition to the force-displacement diagram of the MAGe-KS test specimen, a standard insert (see Table 4, column 1) is also shown. The MAGe-KS structure shows no significant change in the mean pull-out force compared to the standard insert. However, the MAGe-KS structure causes a reduction in the stress concentration in the area of load introduction and a significantly higher strength af-



Bild 12: Preform-Probe nach Auszugversuch in 0°-Richtung | Fig. 12: Preform specimen after pull-out test in 0° direction

dies einen immensen Vorteil für die Sicherheit, wenn ein spontanes Versagen der Befestigungselemente verhindert werden kann.

4 Zusammenfassung

Im Ergebnis präsentiert dieser Bericht die Berechnung anwendungsspezifischer Betonrezepturen mittels genetischer Algorithmen zur Herstellung von frei geformten, dünnwandigen Betonelementen. Hierbei wird eine definierte Einstellung der Materialeigenschaften des Feinbetons erreicht. Aufgrund der großen Anzahl an Parametern und unterschiedlichen Zielvariablen bei der anwendungsspezifischen Mischungsanpassung bietet die multikriterielle Optimierung basierend auf künstlichen neuronalen Netzen als Methode der nichtparametrischen Regression eine besondere Möglichkeit, den experimentellen Aufwand und ferner auch die wirtschaftlichen Aufwendungen zu reduzieren.

Weiterhin wurden neue anwendungsspezifische Füge- und Befestigungsmethoden untersucht und berechnet, die im Bereich der dünnwandigen Fassadenelemente Anwendung finden können. Die neuen Inserts stellen geometrisch optimierte Lasteinleitungselemente dar, sodass ein bestmöglicher Lastabtrag herrscht.

Die Projektergebnisse wurden u. a. auf internationalen Tagungen, z. B. [22], in einer Dissertation [26] sowie einer Habilitation [33] vorgestellt.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 257332657 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

ter the initial crack, which consequently leads to a quasi-ductility of the elements. For façade elements in particular, this means an immense security advantage if spontaneous failure of the fastening elements can be prevented.

4 Summary

As a result, this report presents the calculation of application-specific concrete formulations using genetic algorithms for the production of free-form, thin-walled concrete elements. A defined setting of the material properties of the fine concrete is achieved. Due to the large number of parameters and different target variables in the application-specific mixture adjustment, multi-criteria optimization based on artificial neural networks as a method of nonparametric regression offers a special possibility to reduce the experimental effort and also the economic effort.

Furthermore, new application-specific joining and fastening methods were examined and calculated, which can be used in the area of thin-walled façade elements. The new inserts represent geometrically optimized load transfer elements so that the best possible load transfer takes place.

The project results were published at international conferences (e.g. [22]) as well as in several scientific papers and theses like a dissertation [26] and a habilitation [33].

Acknowledgement

The authors kindly acknowledge the German Research Foundation (DFG) for funding project No. 257332657 within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Scheerer, S.; Schladitz, F.; Curbach, M.: Textile reinforced Concrete – from the idea to a high performance material. In: Brameshuber, W. (Hrsg.): Proc. of FERRO-11 and 3rd ICTRC, 07.–10.06.2015 in Aachen., Bagnaux, France: Rilem Publications S.A.R.L., 2015, S. 15–33
- [2] Funke, H.; Gelbrich, S.; Kroll, L.: A New Hybrid Material of Textile Reinforced Concrete and Glass Fibre Reinforced Plastic. *Journal of Materials Science Research 2* (2013) 3, S. 96–102
- [3] Triantafyllou, T. C. (Hrsg.): *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*. Woodhead Publ., 2016
- [4] Funke, H.; Gelbrich, S.; Kroll, L.: The Durability and Performance of Short Fibers for a Newly Developed Alkali-Activated Binder. *Fibers – Special Issue Glass Fibers – 4* (2016) 1, 8 S. – DOI: 10.3390/fib4010011
- [5] Homepage C³-Projekt: <https://www.bauen-neudenken.de/> (Zugriff am 08.08.2019)
- [6] Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.: Development of a new hybrid material of textile reinforced concrete and glass fibre reinforced plastic. In: Hufenbach, W. A.; Gude, M. (Hrsg.): *Procedia Materials Science 2* (2013), S. 103–110 – Proc. of Materials Science Engineering, Symp. B6 – Hybrid Structures, 25.–27.09.2013 in Darmstadt – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2013.02.013>
- [7] Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Kroll, L.: A Fiber-Reinforced Architectural Concrete for the Newly Designed Façade of the Poseidon Building in Frankfurt am Main. *Journal of Materials Science Research 3* (2014) 3, S. 33–39 – DOI: 10.5539/jmsr.v3n3p33
- [8] Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Ulke-Winter, L.; Kroll, L.: Unsymmetrical Fibre-Reinforced Plastics for the Production of Curved Textile Reinforced Concrete Elements. *Open Journal of Composite Materials* (2014) 4, S. 191–200 – DOI: 10.4236/ojcm.2014.44021
- [9] McCulloch, W. S.; Pitts, W.: A logical calculus of the idea immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5 (1943), S. 115–133
- [10] Budelmann, H.; Rostasy, F. S.; Hariri, K.; Holst, A.; Wichmann, H.-J.: Zustandserfassung und -beurteilung vorgespannter Zugglieder durch Monitoring. Tagungsband zum Berichtskolloquium des SFB 477, 16./17.06.2003, 2003, S. 69–77
- [11] Adeli, H.: Neural networks in civil engineering 1989–2000. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 16 (2001), S. 126–142
- [12] Hola, J.; Schabowicz, K.: Beurteilung der Betonfestigkeit unter Nutzung der künstlichen Neuronalen Netze aufgrund zerstörungsfreier Untersuchungen. *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2005) 5, S. 416–421
- [13] Freitag, S.; Graf, W.; Kaliske, M.: Prognose des Langzeitverhaltens von Textilbeton-Tragwerken mit rekurrenten neuronalen Netzen. In: Curbach, M. (Hrsg.): Proc. of CTRS4 – 4. Koll. zu textilbewehrten Tragwerken, 03.–05.06.2009 in Dresden, Dresden: TU Dresden, 2009, S. 365–376
- [14] Bergmeister, K.; Santa, U.; Strauss, A.: Überwachung und Analyse der Lebensdauer von Tunnelbauwerken. *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007) 1, S. 24–32
- [15] Evers, H. J. J.; Isthia, J.: *Konsoleneinrichtung/ JORDAHL*. DE 69820322 T3, 25.07.2013
- [16] Fricker, S.: *Fassadenplattenanker/Halfen GmbH & Co. KG*. DE 3721452 C2, 10.02.2000
- [17] Dilthey, U.; Schleser, M.; Feldmann, M.; Pak, D.; Geßler, A.: Investigation of punctiform, plane and hybrid joints of textile-reinforced concrete parts. *Cement and Concrete Composites* 30 (2008), S. 82–87
- [18] Curbach, M.; Speck, K.: Lasteinleitung in dünnwandige Bauteile aus textilbewehrtem Beton mit kleinen Dübeln. Abschlussbericht zum DAFStb-Forschungsvorhaben V426, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2003
- [19] Jesse, D.; Jesse, F.; Curbach, M.: Lokale Lasteintragung über Bolzenverbindungen in dünne Bauteile aus textilbewehrtem Beton. *Beton- und Stahlbetonbau* 103 (2008) 2, S. 73–84
- [20] Kulas, C.; Schneider, M.; Will, N.; Grebe, R.: Hinterlüftete Vorhangfassaden aus Textilbeton – Tragverhalten und Ausführungen. *Bautechnik* 88 (2011) 5, S. 271–280
- [21] Seidlitz, H.; Kroll, L.; Ulke, L.: Load adjusted joining technology for Composite-Metal Hybrids. In: Burczyński, T.; Cholewa, W.; Moczulski, W. (Hrsg.): *Methods of Artificial Intelligence, AI-Meth Series*, Gliwice, 2009, S. 51–52
- [22] Ferreira, C.: Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Systems* 13 (2001) 2, S. 73–129
- [23] Goldberg, D. E.: *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison Wesley, 1989
- [24] Holland, J. H.: *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT Press, 1992
- [25] Adams, R. D.; Maheri, M. R.: Dynamic flexural properties of anisotropic fibrous composite beams. *Composite Science Technology* 50 (1994) 4, S. 497–514
- [26] Ulke-Winter, L.: *Naturalanaloge Optimierungsverfahren zur Auslegung von Faserverbundstrukturen*. Diss., TU Chemnitz, 2017 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-220529>
- [27] Funke, H. L.; Ulke-Winter, L.; Gelbrich, S.; Kroll, L.: Application-specific adaptation of concrete formulations using genetic algorithms to optimize a wide range of different fit-functions. In: Bögle,

A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture. engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9251, Book of Abstracts: S. 152, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.

[28] Funke, H. L.; Ulke-Winter, L.; Gelbrich, S.; Kroll, L.: A Numerical Description of a Fibre Reinforced Concrete Using a Genetic Algorithm. International Journal of Civil and Environmental Engineering 12 (2018) 3, S. 329–334 – DOI: urn:dai:10.1999/1307-6892/10008783

[29] DIN EN 12390-2:2009-08: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2009.

[30] DIN EN 12390-5:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-5:2009.

[31] DIN EN 12390-3:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009.

[32] ETAG 034:2012-04: Guideline for European technical approval of Kits for Externa wall claddings – Part I: Ventilated cladding kits comprising cladding components and associated fixings. Brüssel: EOTA

[33] Gelbrich, S.: Funktionsintegrierte Leichtbaustrukturen für Tragwerke im Bauwesen. Habilitationsschrift, TU Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz, 2016

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1, 7, 8, 12: Henrik Funke
- Bilder | Pictures 2–7, 9, 13: Carolin Petzoldt
- Bilder | Pictures 10, 11: Christian Müller

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Entwurf und Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit bionisch inspirierten Kraffteinleitungssystemen durch Einsatz flexibler GFK-Schalungen

Design and production of double-curved lightweight concrete structures with bionic inspired force transmission elements by the use of flexible GFRP-formworks

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. c. Prof. Lothar Kroll Direktor des Institutes für Strukturleichtbau (IST) und des An-Institutes Cetex Director of IST and of the affiliated institute CETEX
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	KR 1713/22-1 (Projektnummer Project number: 257332657)
Kontakt Contact:	+49 371 531 231 20 slk@mb.tu-chemnitz.de www.leichtbau.tu-chemnitz.de
Antragstellerin 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich Leiterin Forschungsbereich „Leichtbau im Bauwesen“ Leader of research group “Lightweight Constructions in Civil Engineering”
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	GE 2277/1-1 (Projektnummer Project number: 257332657)
Kontakt Contact:	+49 371 531 321 92 sandra.gelbrich@mb.chemnitz.de www.leichtbau.tu-chemnitz.de
Adresse Address:	TU Chemnitz, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, 09107 Chemnitz
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.10.2014–30.09.2017
Team Team:	Henrik L. Funke Andreas Ehrlich Carolin Petzoldt (01.10.2014–31.07.2016) Lars Ulke-Winter

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Funke, H.; Gelbrich, S.; Ehrlich, A.; Ulke-Winter, L.; Kroll, L.: Unsymmetrical Fibre-Reinforced Plastics for the Production of Curved Textile Reinforced Concrete Elements. Open Journal of Composite Materials (2014) 4, S. 191–200 – DOI: 10.4236/ojcm.2014.44021
- Funke, H. L.; Gelbrich, S.; Ulke-Winter, L.; Ehrlich, A.; Kroll, L.: A novel flexible and adjust table fibre-reinforced plastic formwork technology for freeform textile reinforced concrete elements. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-479199, publ. auf USB stick, 13 S.
- Funke, H. L.; Ulke-Winter, L.; Gelbrich, S.; Kroll, L.: Application-specific adaptation of concrete formulations using genetic algorithms to optimize a wide range of different fit-functions. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9251, Book of Abstracts: S. 152, Langfassung auf USB-Stick, 10 S.
- Funke, H. L.; Ulke-Winter, L.; Gelbrich, S.; Kroll, L.: A Numerical Description of a Fibre Reinforced Concrete Using a Genetic Algorithm. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Civil and Environmental Engineering 12 (2018) 3, S. 329–334 – DAJ: urn:dai:10.1999/1307-6892/10008783
- Gelbrich, S.; Funke, H.; Ehrlich, A.; Kroll, L.: Flexible fiber-reinforced plastic formworks for the production of curved textile-reinforced concrete. Advances in Structural Engineering 21 (2018) 4, S. 580–588 – DOI: <https://doi.org/10.1177/1369433217732681>
- Gelbrich, S.; Funke, H.; Kroll, L.: Function-Integrative Textile Reinforced Concrete Shells. Open Journal of Composite Materials (OJCM) 8 (2018) 4, S. 161–174 – DOI: 10.4236/ojcm.2018.84013

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Habilitation | Habilitation

- Gelbrich, S.: Funktionsintegrative Leichtbaustrukturen für Tragwerke im Bauwesen. 2016 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-215103>

Dissertation | Dissertation

- Ulke-Winter, L.: Naturanaloge Optimierungsverfahren zur Auslegung von Faserverbundstrukturen. 2017 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-220529>

Folgeprojekt | Follow-up project

- Wiederverwendbare flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen | Re-usable and flexible GFRP formwork for the production of double curved concrete lightweight elements

Antragsteller:in Applicants:	Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. c. Prof. Lothar Kroll Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project
Laufzeit Funding period:	01/2018–12/2019

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation und Durchführung des Arbeitsgruppentreffens am 26.03.2015 in Chemnitz | Organisation and execution of the work group meeting, 26.03.2015 in Chemnitz

Wickelverstärkte Hybridrohre | Wrapping-reinforced hybrid tubes

- ▶ Ludger Lohaus, Jan Markowski
- ▶ Institut für Baustoffe (IfB), Leibniz Universität Hannover

1 Motivation und Zielsetzung

Dieses Projekt widmete sich einer neuen Bauweise für stabförmige Drucktragglieder aus ultrahochfestem Beton (UHFB), die – als UHFB-Rohre mit Stahlrohren ummantelt – hier als Hybridrohre bezeichnet werden. Durch eine äußere Wickelverstärkung aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) werden die beiden, für sich alleine betrachtet ausgeprägt spröden Hochleistungsmaterialien UHFB und CFK so kombiniert, dass sie zu besonders leichten Bauteilen hoher Tragfähigkeit mit ausgeprägt duktilem Versagensverhalten zusammengefügt werden.

UHFB eignet sich besonders gut für leichte Tragwerke. Aufgrund seines günstigen Verhältnisses von hoher Druckfestigkeit (es können Druckfestigkeiten erreicht werden, die im Bereich der Fließgrenze von konventionellem Baustahl liegen) zu geringem Eigengewicht (UHFB-Rohrdichte beträgt lediglich ca. 30 % der Dichte von Stahl) können stabförmige Drucktragglieder konstruiert werden, welche bei vergleichbarer Tragfähigkeit ein wesentlich geringeres Gewicht aufweisen als Profile aus konventionellem Baustahl. Zudem ist der Einsatz von Beton gegenüber Stahl hinsichtlich der Verfügbarkeit der Ressourcen, der für die Herstellung des Baustoffs notwendigen Energie und der damit verbundenen CO₂-Emissionen sowie seines Preises vorteilhaft. Obwohl UHFB schon seit vielen Jahren Gegenstand der Forschung ist, spielen Bauteile aus UHFB für tragende Elemente in Deutschland noch immer nur eine untergeordnete Rolle. Sein ökologisches, wirtschaftliches und auch architektonisches Potential, das bislang weitgehend ungenutzt bleibt, soll durch die neue

1 Motivation and objective

This project was dedicated to a new construction method for rod-shaped support elements made of ultra-high performance concrete (UHPC), which – as UHPC tubes coated with steel sheets – are called hybrid tubes in this report. Through an exterior wrapping-reinforcement made of carbon fibre reinforced plastic (CFRP), the two high-performance materials UHPC and CFRP, which are distinctly brittle when viewed on their own, are combined in such a way that they form particularly light components of high load-bearing capacity with profound ductile failure behaviour.

UHPC is particularly suitable for lightweight structures. Due to its favourable ratio of high compressive strength (compressive strengths in the range of the yield point of conventional structural steel can be achieved) to low dead weight (UHPC's raw density is only approx. 30% of the density of steel), rod-shaped pressure support elements can be constructed which have a significantly lower weight than profiles made of conventional structural steel with a comparable load capacity. In addition, the usage of concrete has advantages over steel in terms of the availability of resources, the energy required for the production of the material and the associated CO₂ emissions as well as its price. Although UHPC has been a subject of research for many years, to this day components made of UHPC only play a minor role for load-bearing elements in Germany. Its ecological, economic and also architectural potential, which has remained largely unused to date, is to be utilised far better than before by means of this new con-

Bauweise weit besser als bisher genutzt werden. Ein wesentliches Hemmnis, das einem vermehrten Einsatz von UHFB entgegensteht, stellt dabei sein sprödes Versagensverhalten dar: Durch die extrem hohen aufnehmbaren Druckspannungen wird beim Überschreiten der Druckfestigkeit schlagartig sehr viel Energie freigesetzt, was sich durch ein explosionsartiges Versagensverhalten äußert. Hierin liegt eine große Herausforderung für das Konstruieren duktiler und resilienter Tragwerke aus UHFB.

In der UHFB-Richtlinie [1] des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) werden Regeln für die Bemessung und Ausführung von Bauteilen aus UHFB erarbeitet. Die Richtlinie orientiert sich an der Struktur der DIN EN 1992-1-1 (Eurocode 2) [2] und kann aufgrund dessen nur wenig Anreize für grundlegend neue, UHFB-gerechte Konstruktionen liefern.

Projektziel war es, das Trag- und Versagensverhalten solcher wickelverstärkten Hybridrohre unter zentrischer und exzentrischer axialer Druckbeanspruchung zu erfassen, zu beschreiben und zu prognostizieren.

2 Wickelverstärkte Hybridrohre – Beschreibung der Konstruktion

2.1 Vorarbeiten: UHFB-Hybridrohr

Das Konzept der wickelverstärkten Hybridrohre basiert auf der Weiterentwicklung von UHFB-Hybridrohren, zu denen bereits umfangreiche Vorarbeiten [3]–[5] am Institut für Baustoffe (IfB) der LU Hannover bestehen. Beim UHFB-Hybridrohr wird ein hohler UHFB-Betonkern durch zwei konzentrisch angeordnete Stahlbleche ummantelt. In Abgrenzung zum konventionellen Verbundbau sollen Normalkräfte nahezu ausschließlich durch den Betonkern aufgenommen werden, wobei die Stahlrohre als Umschnürungs- und Stützbewehrung dienen. Wird die Druckfestigkeit des UHFB überschritten, kann der gebrochene Betonkern seitlich durch die beiden Stahlrohre gestützt werden und auf diese Weise weiterhin Normalkräfte übertragen. So kann ein

struction method.

A major obstacle hindering the increased use of UHPC is its brittle failure behaviour: Due to the extremely high compressive stresses that can be absorbed, a great amount of energy is suddenly released when the compressive strength is exceeded, which is expressed by explosive failure behaviour.

Herein lies a major challenge for the design of ductile and resilient UHPC structures. The UHPC guideline [1] issued by the German Committee for Reinforced Concrete (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb) contains rules for the design and execution of structural components made of UHPC. The guideline is based on the structure of DIN EN 1992-1-1 (Eurocode 2) [2] and can therefore only provide little incentive for fundamentally new designs that are compatible with UHPC.

The project's aim was to record, describe and predict the load bearing and failure behaviour of such wrapping-reinforced hybrid tubes under centric and eccentric axial compressive stress.

2 Wrapping-reinforced hybrid tubes – description of the construction

2.1 Preparatory work: UHPC hybrid tubes

The concept of wrapping-reinforced hybrid tubes is based on the further development of UHPC hybrid tubes, for which a wide range of preliminary work [3]–[5] has already been done at the Institute of Building Materials Science (IfB) of LU Hanover. In the UHPC hybrid tube, two concentrically arranged steel sheets coat a hollow UHPC concrete core. In contrast to conventional composite construction, normal forces are to be absorbed almost exclusively by the concrete core, with the steel tubes serving as a strapping and supporting reinforcement. If the compressive strength of the UHPC is exceeded, the broken concrete core is supported laterally by the two steel sheets and can thus continue to transmit normal forces. In this manner, a "good-natured", ductile component behaviour can be

„gutmütiges“, duktiler Bauteilverhalten sogar völlig ohne Stahlfasern erreicht werden. Eine alleinige Verstärkung mit Stahlfasern wäre dazu nicht in der Lage [5]. Erst mit Sicherstellung eines gutmütigen Versagens kann die außerordentlich hohe Druckfestigkeit von UHFB praktisch nutzbar gemacht und der Gewichtsvorteil gegenüber Konstruktionen aus konventionellem Baustahl realisiert werden [4]. Darüber hinaus erleichtert der Verzicht auf Stahlfasern die Verarbeitung des UHFB und die Herstellung dünnwandiger UHFB-Hohlprofile in entscheidender Weise.

UHFB-Hybridrohre zeigen ein charakteristisches Tragverhalten, bei dem nach Überschreiten der primären Maximallast, welche als Punkt vor dem ersten Abfall der Kraft im Kraft-Verformungs-Diagramm definiert ist, weiterhin Normalkräfte übertragen werden können. Diese *primäre Maximallast* wird im Folgenden im Sinne einer besseren Lesbarkeit als *Maximallast* bezeichnet. Die *Resttraglast* oder *residuale Tragfähigkeit* ist hingegen diejenige Normalkraft, die vom Bauteil nach Überschreiten der primären Maximallast noch übertragen werden kann. Sie wird beim UHFB-Hybridrohr hauptsächlich vom Stahlanteil der Konstruktion beeinflusst [5]. Dies hat zur Folge, dass große Stahlteile benötigt werden, um ein ausreichend hohes Resttragniveau sicherzustellen. Hohe Stahlanteile stehen jedoch den erzielbaren Gewichts- und Kostenersparnissen entgegen. Ferner ergibt sich ein weiteres, aus dem Verbundbau bekanntes Problem: Das äußere Stahlblech neigt aufgrund seines gegenüber UHFB deutlich höheren Elastizitätsmoduls zu lokalem Beulen (sogenanntes „Elefantenfußbeulen“). Im Bereich dieser Beulen steht das äußere Stahlblech dann nicht mehr als dringend benötigte Umschnürungsbewehrung zur Verfügung, und zwar deutlich bevor die maximale Tragfähigkeit des UHFB erreicht ist.

2.2 Wickelverstärktes UHFB-Hybridrohr

Mit dem Ziel, den Leichtbau mit Beton weiter voranzutreiben, stellen wickelverstärkte Hybridrohre (Aufbau s. Bild 1) eine Weiterentwicklung der UHFB-Hybridrohre dar. Ihr Aufbau gleicht dem eines UHFB-Hybridrohrs mit dem

erreicht vollständig auch ohne Stahlfasern. Nur wenn gutmütiger, duktiler Versagen garantiert werden kann, kann die außerordentlich hohe Druckfestigkeit von UHPC in die praktische Anwendung und der Gewichts- und Kostenvorteile gegenüber Strukturen aus herkömmlichem Stahl erreicht werden [4]. In addition, the absence of steel fibres simplifies the processing of UHPC and the production of thin-walled UHPC hollow sections significantly.

UHPC hybrid tubes show a characteristic load-bearing behaviour in which normal forces can still be transmitted after exceeding the primary maximum load, which is defined as the point before the first drop of the force in the force-deformation diagram. In the following, this *primary maximum load* will be referred to as *maximum load* for better readability. The *residual load capacity*, is the normal force that can still be transmitted by the component after the primary maximum load has been exceeded. In the case of UHPC hybrid tubes, it is mainly influenced by the steel content of the construction [5]. This means that a high content of steel is needed to ensure a sufficient residual load capacity. However, high steel contents are counterproductive to the weight and cost savings that could be achieved. There is also another problem known from composite construction: the outer steel sheet has a tendency to local buckling (also known as "elephant's foot buckling") due to its significantly higher modulus of elasticity compared to UHPC. In the area of these dents, the outer steel sheet is then no longer available as needed strapping reinforcement, well before the maximum load-bearing capacity of the UHPC is reached.

2.2 Wrapping-reinforced UHPC hybrid tubes

With the aim of advancing lightweight construction with concrete, wrapping-reinforced hybrid tubes (structure see Fig. 1) represent a further development of UHPC hybrid tubes. Their structure is similar to that of a UHPC hybrid tube, with the difference being that the outer steel tube is almost completely replaced by a layer of fibre-reinforced plastic (carbon fibre reinforced plastic, CFRP). That way, the weight of the con-

Unterschied, dass die äußere Stahlblechummantelung weitgehend durch eine Schicht aus faserverstärktem Kunststoff (Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff, CFK) ersetzt wird. So kann das Gewicht der Konstruktion bei gleichbleibender Traglast weiter reduziert und ein vorzeitiges Beulen des äußeren Stahlblechs verhindert werden. In [6], [7] sind die Überlegungen zum Aufbau wickelverstärkter Hybridrohre und des zugrundeliegenden Bewehrungskonzepts detailliert dargestellt.

Wickelverstärkte Hybridrohre bestehen aus vier wesentlichen Komponenten, die ein rundes Hohlprofil bilden. Hohlprofile haben gegenüber Vollquerschnitten den Vorteil, bei gleicher Querschnittsfläche größere Flächenmomente 2. Grades zu erreichen. So können bei gleichem Gewicht größere Widerstände gegen das für Stützen oft relevante Biegeknicken realisiert werden. Ferner kann der Hohlraum im Inneren ggf. auch für Installationsleitungen oder für eine Vorspannung genutzt werden, die den Momentenwiderstand erhöht.

Der UHFB-Kern dient der Aufnahme axialer Druckkräfte. Er liegt zwischen zwei Stahlrohren eingebettet. Das innere Stützrohr fungiert als Aussteifung in radialer Richtung. Kommt es durch Überschreitung der Druckfestigkeit zum Bruch im UHFB, benötigt er eine seitliche Stützung, damit der teilweise zerstörte Betonkern weiterhin Längskräfte übertragen kann. Auf der Innenseite des Betonkerns werden die Betonscherben durch das innere Stahlrohr gehalten. Auf der äußeren Seite des Betonkerns wird die Stützung durch die CFK-Bewehrung übernommen. Die Kohlenstofffasern sind nahezu unidirektional in Umfangsrichtung angeordnet. So können sie ihre große Zugfestigkeit und Steifigkeit zur seitlichen Stützung des Betonkerns einbringen, ohne dass sie sich am axialen Lastabtrag maßgeblich beteiligen und ohne dass lokales Beulen der außenliegenden Bewehrung vor dem Bruch des Betons auftreten kann. Mit der Auswahl eines geeigneten Matrixmaterials kann die CFK-Schicht gleichzeitig als wirksamer Korrosionsschutz ausgebildet werden. Das äußere Stahlblech dient als integrierte Schalung: Neben der formgebenden

struction can be further reduced while maintaining the same load-bearing capacity and premature buckling of the outer steel tube can be prevented. In [6] and [7], the considerations regarding the design of wrapping-reinforced hybrid tubes and the reinforcement concept are presented in detail.

Wrapping-reinforced hybrid tubes consist of four essential components that form a round hollow profile. Compared to full cross-sections, hollow profiles have the advantage of achieving greater 2nd degree surface moments with the same cross-sectional area. This enables greater resistance to flexural buckling, which is often relevant for pillars, to be achieved at the same weight. Furthermore, the hollow inside can also be used for installation lines or for pre-stressing, which increases the moment of resistance.

The concrete core consists of UHPC and is used to absorb axial compressive forces. It is embedded between two steel tubes. The inner support tube acts as a stiffener in radial direction. If the UHPC breaks due to exceeding the compressive strength, it requires lateral support so that the partially destroyed concrete core can continue to transmit longitudinal forces. On the inside of the concrete core, the concrete fragments are held in place by the inner steel tube. On the outer side of the concrete core, the CFRP layer provides the support. The carbon fibres are arranged almost unidirectionally in the circumferential direction. This allows them to provide their high tensile strength and stiffness for lateral support of the concrete core without making a significant contribution to axial load transfer and without local buckling of the external reinforcement before the concrete breaks. With the selection of a suitable matrix material, the CFRP layer can simultaneously provide an effective protection against corrosion. The outer steel tube serves as an integrated formwork: In addition to its shaping function, it also assumes a load-distributing function once the concrete core is broken (or: if the concrete core breaks). Without the outer steel tube, concrete fragments could locally damage the transverse pressure-sensitive wrapping reinforcement

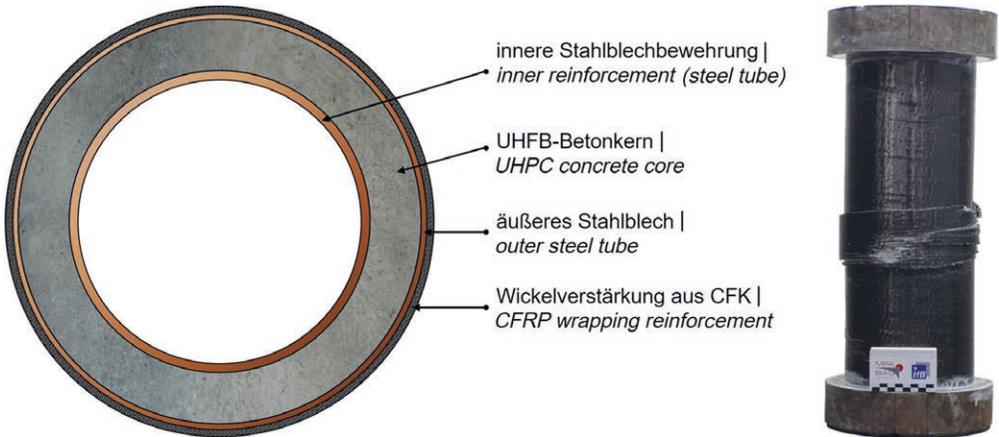


Bild 1: Wickelverstärktes Hybridrohr; links: schematische Darstellung im Querschnitt, rechts: Rohr mit Lasteinleitungsplatten nach der Prüfung | **Fig. 1:** Wrapping-reinforced hybrid tube; left: schematic representation of a cross-section, right: tube with load introduction plates after testing

Funktion übernimmt es eine lastverteilende Aufgabe, wenn der Betonkern gebrochen ist. Ohne das äußere Stahlblech würden Betonscherben die querdruckempfindliche Wickelverstärkung lokal beschädigen und zu einem Sprödbruch führen können. Probekörper ohne äußeres Stahlblech zeigten aufgrund dieses Effektes teilweise ein abruptes, explosionsartiges Versagensverhalten, ohne dass die angestrebte Resttragfähigkeit erreicht wurde (siehe Abschnitt 3.2.3).

3 Arbeitsprogramm und Untersuchungsmethoden

Es wurden experimentelle Untersuchungen auf Baustoff- und auf Bauteilebene sowie begleitende numerische Analysen durchgeführt, um die Auswirkungen der einzelnen Komponenten der wickelverstärkten Hybridrohre und ihre Interaktionen auf die maximale und auf die residuale Traglast zu untersuchen (s. Bild 2).

3.1 Untersuchungen zur radialen Steifigkeit der Wickelverstärkung

Mit dem Ziel der Auswahl eines geeigneten Faser-Kunststoff-Verbundsystems (FKV-System) und der Ermittlung charakteristischer mechanischer Kennwerte wurden in einem ersten Schritt Versuche zur Ermittlung einer realitätsnahen,

and lead to brittle fracture. Due to this, test specimens without the outer steel tube sometimes showed abrupt, explosive failure behaviour without achieving the desired residual load-bearing capacity (see section 3.2.3).

3 Work programme and investigation methods

Experimental investigations on building material and component level as well as accompanying numerical analyses have been carried out to investigate the effects of the individual components of the wrapping-reinforced hybrid tubes and their interactions on the maximum and residual load (see Fig. 2).

3.1 Investigations on the radial stiffness of the wrapping-reinforcement

With the aim of selecting a suitable fibre reinforced plastic composite (FRP) system and determining characteristic mechanical properties, tests to determine a realistic radial stiffness of the FRP have been carried out as a first step. The radial stiffness is the central property of the FRP regarding the assurance of the residual load-bearing capacity of the components. Glass and carbon fibres were investigated. In the following, only the wrapping reinforcements made

radialen Steifigkeit des FKV durchgeführt. Die radiale Steifigkeit ist die zentrale Eigenschaft des FKV hinsichtlich der Sicherstellung der Resttragfähigkeit der Bauteile. Es wurden Fasern aus Glas und Kohlenstoff untersucht. Im Folgenden werden nur die Wickelverstärkungen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) betrachtet. In [8] ist der dafür verwendete Versuchsstand beschrieben: Es handelt sich um einen mechanischen Aufweitmechanismus, der in eine Universalprüfmaschine eingebaut werden kann. Durch die von der Maschine vorgegebene Verformung werden zylindrische FKV-Proben aufgeweitet. Von der gemessenen Maschinenkraft lässt sich ein Innendruck auf die Proben berechnen und mithilfe der gemessenen Dehnung eine Umfangsspannung ableiten.

In Tabelle 1 sind auszugsweise Ergebnisse zur radialen Steifigkeit zusammengefasst. Es wurden insgesamt sechs unterschiedliche FKV untersucht, wobei sowohl das Fasermaterial als auch die Faserorientierung variiert wurden. In Bezug auf die Auswahl eines geeigneten FKV für die Bauteilversuche wurden dabei die folgenden Erkenntnisse gewonnen:

- Handlamierte FKV-Schichten erzielen bereits gut reproduzierbare hohe radiale Steifigkeiten.
- Besonders geringe Streuungen traten bei den Proben mit einer horizontalen Umwicklung auf.
- Bereits geringe Abweichungen von der horizontalen Wickelrichtung verringern die radiale Steifigkeit maßgeblich.

Basierend auf den Ergebnissen wurde für alle weiteren Untersuchungen auf Bauteilebene ein unidirektional angebrachtes FKV aus Kohlenstofffasern ausgewählt, was einen guten Kompromiss aus reproduzierbaren Eigenschaften bei gleichzeitig hoher radialer Steifigkeit und vernachlässigbar geringer Steifigkeit in Längsrichtung verspricht. Da die Faserorientierung nachträglich optisch leicht überprüft werden kann, ist die starke Abhängigkeit der Steifigkeit vom Winkel ein gut beherrschbarer Einfluss auf die Tragfähigkeit.

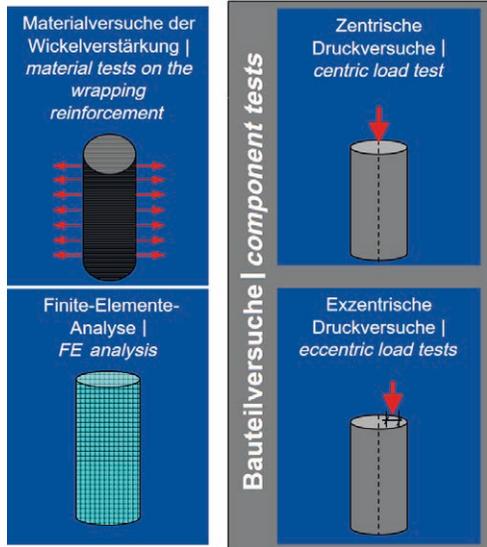


Bild 2: Untersuchungsprogramm | Fig. 2: Research programme

of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) are considered. The test setup used for this purpose is described in [8]. It is a mechanical enlarging mechanism that can be installed in a universal testing machine. Cylindrical FRP specimens are expanded by the predefined deformation of the machine. From the measured machine force, an internal pressure on the specimen can be calculated, as well as a circumferential stress using the measured expansion.

Table 1 summarizes excerpts from the results on radial stiffness. Six different FRP with varying fibre material and fibre orientation were investigated. With regard to the selection of a suitable FRP for the component tests, the following conclusions were made:

- Hand laminated FRP coatings already achieve well reproducible high radial stiffness.
- Especially low scattering occurred in the samples with a horizontal wrapping.
- Even small deviations from the horizontal wrapping direction significantly reduce the radial stiffness.

Based on the results, a unidirectionally positioned FRP made of carbon fibres was selected

Bezeichnung Designation	Eigenschaften der Kohlenstoffasergelege und Orientierung Properties of carbon fibre fabrics and orientation	Sekantenmodul (radiale Steifigkeit) Secant modulus (radial stiffness) [N/mm ²]	Standardabweichung Standard deviation [N/mm ²]
CFK-90 UD	200 g/m ² , 90° horizontale Wicklung horizontal winding	60.000	3.800
CFK-80 AWW	80 g/m ² , ausgleichender Winkelverbund* compensating angular composite*	70.000	5.800
CFK-80 UD	200 g/m ² , 80° unidirektional unidirectional	29.000	5.200

* Mehrlagiges Gelege, bei dem die Fasern in einer symmetrischen Anordnung zueinander stehen | Multilayer fabric in which the fibres are in a symmetrical arrangement to each other

Tabelle 1: Sekantenmodul der radialen Steifigkeit unterschiedlicher Faser-Kunststoff-Verbunde (bezogen auf den Durchschnitt aus jeweils drei Proben, Auszug) | **Table 1:** Secant modulus describing the radial stiffness of different fibre-plastic composites (based on the average of three samples, extract)

3.2 Experimentelle Untersuchungen auf Bauteilebene

3.2.1 Probekörperherstellung

Nachfolgend sind die Herstellungsschritte der Bauteilprobekörper dargelegt:

1. Konzentrisches Ausrichten des inneren und des äußeren Stahlblechs,
2. Einfüllen des ultra-hochfesten Betons in den Zwischenraum mithilfe einer Mörtelpumpe,
3. Ausschalen nach 48 h, Wärmebehandlung bei 90 °C über 48 h,
4. Auftragen des FKV,
5. Tempern des FKV bei ca. 60 °C über min. 48 h.

Folgende Baustoffe wurden verwendet:

Ultra-hochfester Beton. Es wurde ein feinkörniger, fließfähiger ultra-hochfester Mörtel mit selbstverdichtenden Eigenschaften verwendet, der auf der Zusammensetzung M3Q (entwickelt im SPP 1182 „Nachhaltig Bauen mit Ultra-Hochfestem Beton“ [9]) basiert. Nach einer Wärmebehandlung wurde eine charakteristische Würfeldruckfestigkeit (100 mm) von ca. 220 N/mm² erreicht.

Stahlrohre. Die verwendeten Stahlrohre bestehen aus robotergeschweißtem Stahlblech der Güteklasse DC01 nach [10] mit einer Fließgrenze von ca. 235 N/mm².

for all further investigations at the component level. This promises a good compromise between reproducible properties with high radial stiffness and negligible stiffness in the longitudinal direction. Since the fibre orientation can easily be checked optically afterwards, the strong dependence of stiffness on angle is a well controllable influence on the load-bearing capacity.

3.2 Experimental investigations on component level

3.2.1 Specimen production

In the following, the manufacturing steps of the specimens are described:

1. concentric alignment of the inner and outer steel sheet,
2. filling the ultra-high strength concrete into the interstitial space using a mortar pump,
3. stripping after 48 h, heat treatment at 90 °C for 48 h,
4. application of the FRP,
5. tempering of the FRP at approx. 60 °C for at least 48 h.

The following building materials were used:

Ultra-high performance concrete. A fine-grained, flowable ultra-high performance mortar with self-compacting properties was used, based on the composition M3Q (developed

Faser-Kunststoff-Verbundsystem. Für das FKV wurde ein zweikomponentiges Epoxidharz verwendet. Damit wurde ein 25 mm breites, unidirektionales Kohlenstofffaserband (*high tension*, Flächengewicht 350 g/m², Feinheit 400 tex, Dicke 0,3 mm) im Bandwickelverfahren von Hand auf die Probekörper laminiert.

3.2.2 Untersuchungen von wickelverstärkten UHFB-Hybridrohren unter zentrischer Druckbeanspruchung

Im ersten Schritt der Untersuchungen auf Bauteilebene wurde der Einfluss der Wickelverstärkung auf das axiale Tragverhalten (maximal aufnehmbare Normalkraft N_{max} und residuale Normalkraft N_{res}) untersucht.

Bei einigen Probekörpern kommt es dazu, dass nach dem Erreichen der Kraft N_{max}, die definitionsgemäß den ersten Abfall im Kraft-Dehnungs-Diagramm markiert, im weiteren Verlauf der Belastung des Probekörpers aufgrund von Umschnürungseffekten noch größere Kräfte als N_{max} aufgenommen werden können (N_{max,global}). Um trotzdem eine einheitliche Resttraglast benennen zu können, wird ein flächenbasiertes Verfahren herangezogen, das auf dem Duktilitätsindex I_s nach Attard/Foster [11] basiert.

$$I_s = \frac{0,5 \cdot A \cdot \epsilon_1 + C \cdot (3 \cdot \epsilon_1 - \epsilon_1)}{0,5 \cdot A \cdot \epsilon_1}$$

In Bild 3 ist die Berechnung des Duktilitätsindex I_s exemplarisch für einen fiktiven Probekörper gezeigt, dessen Residuallast aus Gründen der Anschaulichkeit bei konstant 50 % der Maximallast liegt. Dieses flächenbasierte Verfahren lässt sich auch anwenden, wenn der Verlauf der Residuallast nicht linear verläuft, sondern weiter steigt oder fällt. Indem das Integral über den Verlauf des Nachbruchbereichs gebildet wird, kann ein mittlerer Wert für N_{res} angegeben werden, wenn zuvor der Duktilitätsindex I_s berechnet worden ist.

$$N_{res} = (I_s - 1) \cdot \frac{N_{max}}{4}$$

in SPP 1182 "Building Sustainable with Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)" [9]). After heat treatment, a characteristic cube (100 mm) compressive strength of approx. 220 N/mm² was achieved.

Steel tubes. The steel tubes used were made of robot-welded steel sheets of grade DC01 according to [10] with a yield point of approx. 235 N/mm².

Fibre-plastic composite system. A two-component epoxy resin was used for the FRP. A 25 mm wide, unidirectional (UD) carbon fibre tape (*high tension*, weight per unit area 350 g/m², fineness 400 tex, thickness 0.3 mm) was laminated to the test specimens by hand lay-up.

3.2.2 Investigations of wrapping-reinforced UHPC hybrid tubes under centric compressive load

In the first step of the investigations on component level, the influence of the wrapping reinforcement on the axial load-bearing behaviour (maximum absorbable normal force N_{max} and residual normal force N_{res}) were investigated.

Some specimens, after reaching the force N_{max}, which by definition marks the first drop in the force-strain diagram, could absorb even higher forces than N_{max} in the further process of loading the specimen due to strapping effects (N_{max,global}). In order to be able to designate a uniform residual load nevertheless, an area-based method is used, which is adapted from the ductility index I_s according to Attard/Foster [11].

$$I_s = \frac{0,5 \cdot A \cdot \epsilon_1 + C \cdot (3 \cdot \epsilon_1 - \epsilon_1)}{0,5 \cdot A \cdot \epsilon_1}$$

Figure 3 shows an example of the calculation of the ductility index I_s of a fictitious specimen with a residual load of constant 50% of the maximum load for demonstrative clarity. This area-based method can also be used if the course of the residual load is not linear but continues to rise or fall. By forming the integral over the course of the post-fracture area, a mean value

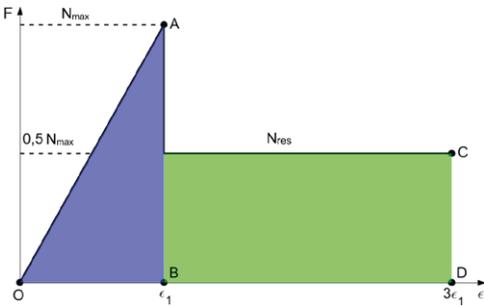


Bild 3: Idealisierter Last-Stauchungs-Verlauf zur Bestimmung der Residuallast nach Attard/Foster | **Fig. 3:** Idealised load-deformation curve to determine the residual load according to Attard/Foster

In Bild 4 ist exemplarisch der Kraft-Längsdehnungs-Verlauf von Probekörper CFK15-PK-2 dargestellt. Dabei sind die zur Berechnung der Residuallast verwendeten Flächenanteile wie in Bild 3 markiert.

Bei den Versuchen wurde eine Ausgangsgeometrie gewählt, von der aus die Dicke der Wickelverstärkung (Nennstärke Kohlenstofffasern t_f) variiert wurde (Serien CFK06 bis CFK24). In einer Referenzserie (CFK00) wurde auf eine Wickelverstärkung komplett verzichtet. Die Serie mit dem Präfix Si40 hat eine Aussteifung des inneren Kerns (Dicke des inneren Stützrohrs $T_{S,inner}$, um Einflüsse aus der Interaktion zwischen innerem Stahlrohr und Wickelverstärkung zu untersuchen. Serie G01 sind großformatigere Proben zur Untersuchung möglicher Skalierungseffekte. In Tabelle 2 sind die Probekörpergeometrien zusammengestellt.

Es wurden weggeregelte Druckversuche in einer Universalprüfmaschine durchgeführt, s. Tabelle 3 und Bild 5. Übereinstimmend mit dem Ingenieurmodell nach Lindschulte/Lohaus für nichtwickelverstärkte Hybridrohre kann der Betonquerschnitt ca. 80 % der querschnittsbezogenen, rechnerisch möglichen Kraft aufnehmen [3]. Diese Abminderung kann als Bauteilfaktor für dünnwandige Hohlprofile verstanden werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits dünne Schichten einer Wickelverstärkung die residuale Traglast gegenüber Probekörpern ohne Wickelverstärkung (Serie CFK00) zuverlässig steigern.

for N_{res} can be given if the ductility index I_s has been calculated beforehand.

$$N_{res} = (I_s - 1) \cdot \frac{N_{max}}{4}$$

Figure 4 shows an example of the force-strain curve, in this case of the CFK15-PK-2 specimen. The areas used for the calculation of the residual load are marked as shown in figure 3.

For the tests, an initial geometry was selected from which the thickness of the wrapping-reinforcement (nominal thickness carbon fibres t_f) was varied (series CFK06 to CFK24). In one reference series (CFK00), no wrapping-reinforcement was used at all. The series with the prefix Si40 has a stiffening of the inner core (thickness of the inner support tube $T_{S,inner}$ to investigate influences from the interaction between inner steel tube and wrapping reinforcement. Series G01 are larger sized samples to investigate possible scaling effects. The specimen geometries are listed in Table 2.

Path-regulated compression tests were performed in a universal testing machine, see Table 3 and Figure 5. In accordance with the engineering model according to Lindschulte/Lohaus for non-wrapping-reinforced hybrid tubes, the concrete cross-section can absorb approx. 80% of the cross-section-related, mathematically possible force [3]. This reduction can be understood as a component factor for thin-walled hollow sections.

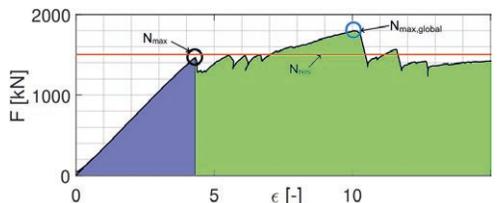


Bild 4: Kraft-Dehnungs-Verlauf von Probekörper CFK15-PK-2: da die Maximallast N_{max} als Maximum vor dem ersten Abfall der Kraft-Dehnungs-Kurve definiert ist, liegt die Residuallast N_{res} in diesem Fall höher als N_{max} ; die global größte Kraft $N_{max,global}$ bleibt ohne besondere Berücksichtigung. | **Fig. 4:** Force-strain curve of test specimen CFK24-PK-1: since the maximum load N_{max} is defined as the maximum before the first drop of the force-strain curve, the residual load N_{res} is higher than N_{max} in this case; the globally largest force $N_{max,global}$ is not taken into account.

Geometriegröße Geometry	Probekörper Specimen	
	Kleinformatig Small scale CFK00–24, Si40	Großformatig Large scale G01
Länge Length	500 mm	1.000 mm
Außendurchmesser Stahlrohr innen Inner steel tube's outside diameter $\varnothing S_{\text{innen}}$	133,0 mm	304,8 mm
Außendurchmesser Stahlrohr außen Outer steel tube's outside diameter $\varnothing S_{\text{außen}}$	169,0 mm	339,6 mm
Dicke Stahlrohr außen Outer steel tube's thickness $t_{s,\text{außen}}$	1,0 mm	0,8 mm

Tabelle 2: Probekörpergeometrien | Table 2: Specimen's geometries

Probekörper Specimen	t_f [mm]	$T_{s,\text{innen}}$ [mm]	N_{max} [kN]	N_{res} [kN]
CFK00-PK-1	0,0	2,9	1.419	658
CFK00-PK-2	0,0	2,9	1.399	705
CFK00-PK-3	0,0	2,9	1.261	735
CFK06-PK-1	0,6	2,9	1.425	1.085
CFK06-PK-2	0,6	2,9	1.235	1.221
CFK15-PK-1	1,5	2,9	1.969	1.554
CFK15-PK-2	1,5	2,9	1.464	1.505
CFK24-PK-1	2,4	2,9	1.803	1.838
CFK24-PK-2	2,4	2,9	2.011	1.815
Si40-CFK-06	0,6	4,0	1.428	1.482
Si40-CFK-15	1,5	4,0	1.801	1.675
Si40-CFK-24	2,4	4,0	1.670	1.874
G01-PK1	1,5	2,0	2.279	1.111
G01-PK2	1,5	2,0	2.115	1.418

Tabelle 3: Versuchsprogramm der zentrisch beanspruchten Probekörper | Table 3: Test program for centrally loaded specimens

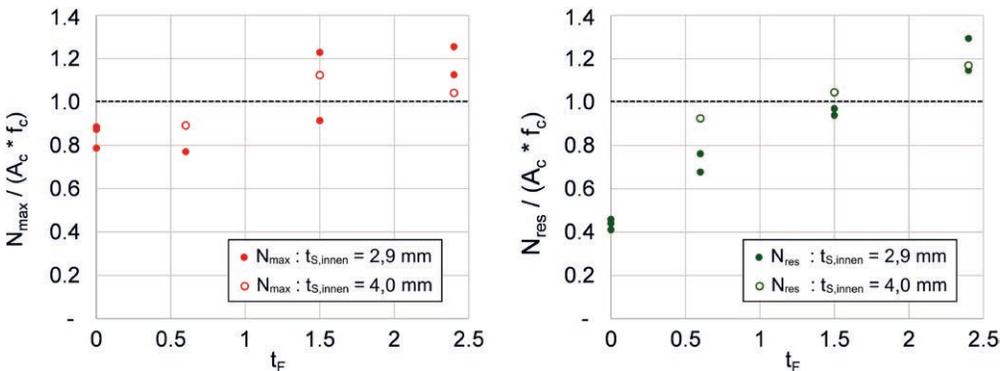


Bild 5: Darstellung der über die Betondruckfestigkeit f_c normierten Traglast N_{max} (links) und Resttraglast N_{res} (rechts) in Abhängigkeit der Dicke t_f der Wickelverstärkung der zentrisch beanspruchten, kleinformatigen Probekörper | Fig. 5: Diagram of the load-bearing capacity (left) and the residual load bearing capacity (right) of the centrally loaded, small-format specimens in dependency of the winding reinforcement's thickness t_f , normalized by the concrete compressive strength f_c

Dieser Effekt lässt sich exemplarisch gut an einem Vergleich der residualen Traglast von der Referenzserie CFK00 und der Serie CFK06 nachvollziehen. Hier wurde die Resttraglast mit einer

The results show that even thin layers of a wrapping-reinforcement reliably increase the residual load compared to test specimens without wrapping reinforcement (CFK00 series). This

Wickelverstärkung von nur 0,6 mm (d. h. zwei Lagen des 0,3 mm dicken Kohlenstofffaser-UD-Bandes) verdoppelt. Bei den Serien mit dickerer Wickelverstärkung ($> 0,6$ mm) können über große Verformungen konstant hohe Lasten aufgenommen werden (vgl. Bild 3). Aus Sicht einer wirtschaftlichen Bemessung ist ein solches Tragverhalten, bei dem die Residuallast nahezu so groß ist wie die Maximallast nicht anzustreben. Jedoch kann auf diese Weise die Fähigkeit der Konstruktion unter Beweis gestellt werden, extrem duktile UHFB-Drucktragglieder auszubilden.

Weiter zeigte sich, dass mit zunehmender Dicke der Wickelverstärkung die maximale Traglast der Probekörper nicht in dem Maße weiter gesteigert werden kann wie die residuale Traglast. Hierauf wird in [12] detaillierter eingegangen.

3.2.3 Wickelverstärkte Hybridrohre ohne äußeres Stahlblech

Zusätzlich wurden zwei Serien mit jeweils drei Probekörpern hergestellt, bei denen auf das äußere Stahlblech verzichtet wurde und das FKV direkt auf den Betonkern appliziert wurde. Als außenseitige Schalung für den Betonkern wurde dazu ein abnehmbares Plexiglasrohr verwendet. Bei diesen Proben kam es im Druckversuch teilweise zu einem schlagartigen Versagen, da die querdrukempfindlichen Fasern durch den Betonkern abrupt zerstört wurden und somit danach nicht mehr als Umschnürungsbe- wehrung wirken konnten [8].

3.2.4 Untersuchungen von wickelverstärkten UHFB-Hybridrohren unter exzentrischer Druckbeanspruchung (Normalkraft-Momenten-Überlagerung)

Zur Untersuchung der Interaktion zwischen Momenten- und Normalkraftbeanspruchung wurden jeweils zwei Exzentrizitätsniveaus (Exzentrizität e zu Außendurchmesser d) und jeweils zwei unterschiedlich dicke Wickelverstärkungen miteinander kombiniert (s. Tabelle 4 und Bild 6). Jede Serie bestand aus drei Proben. Das 1,0 mm dicke Stahlrohr ($t_{s,außen}$) besaß Durchmesser $\varnothing S_{innen} = 133,0$ mm und $\varnothing S_{außen} = 169,0$ mm. Auf-

effect can be demonstrated by comparing the residual load of the CFK00 reference series and the CFK06 series. Here, the residual load was doubled with a wrapping reinforcement of only 0.6 mm (i.e. two layers of the 0.3 mm thick carbon fibre UD tape). In the series with thicker wrapping-reinforcement (> 0.6 mm), constantly high loads can be absorbed by large deformations (see. Fig. 3). From the point of view of economic dimensioning, such a load-bearing behaviour, in which the residual load is almost as high as the maximum load, is not to be aimed for. However, in this way the ability of the design to form extremely ductile UHPC pressure support elements can be demonstrated.

Furthermore, it was shown that with increasing wrapping-reinforcement's thickness, the maximum ultimate load of the specimens cannot be further increased to the same extent as the residual load. This is discussed in more detail in [12].

3.2.3 Wrapping-reinforced hybrid tubes without an outer steel tube

In addition, two series of three specimens each were produced, in which the outer steel tube was dispensed and the FRP was applied directly to the concrete core. A removable acrylic glass tube was used as an outer formwork for the concrete core. In some cases, these specimens failed abruptly in the compression test because the transverse pressure-sensitive fibres were abruptly destroyed by the concrete core and could therefore no longer act as strapping reinforcement [8].

3.2.4 Investigations of wrapping-reinforced UHPC hybrid tubes under eccentric compressive load (normal force-moment superposition)

To investigate the interaction between moment and normal force loading, two eccentricity levels (eccentricity e to outer diameter d) and two wrapping reinforcements of different thickness were combined (see Table 4 and Fig. 6). Each series consisted of three specimens. The 1.0 mm thick steel tube ($t_{s,outside}$) had diameters

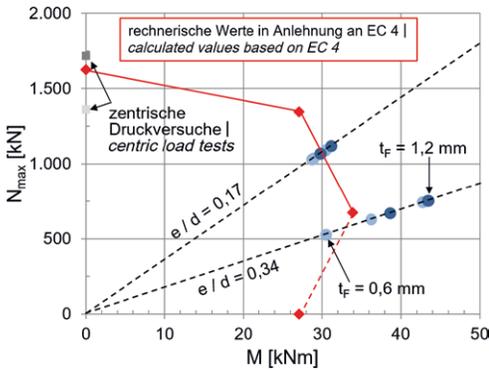


Bild 6: Versuchsergebnisse als Momenten-Normalkraft-Interaktionsdiagramm; die rote Linie repräsentiert charakteristische Widerstandswerte in Anlehnung an das Nachweisverfahren aus dem Eurocode 4 [13] | **Fig. 6:** Representation of the results as a moment normal force interaction diagram; the red line represents characteristic resistance values according to the procedure of the Eurocode 4 [13]

grund der Momentenbeanspruchung durch die exzentrische Lasteinleitung ist der vorgestellte Ansatz zur Berechnung der Resttagfähigkeit N_{res} nicht aussagekräftig. Stattdessen wird die Definition nach Lindschulte/Lohaus verwendet, bei der die Kraft, die unmittelbar nach Überschreiten der maximalen Traglast aufgenommen wird, als Resttraglast N_{res^*} definiert wird.

Es lässt sich ableiten, dass die Traglast wickelverstärkter Hybridrohre trotz des konzeptuellen Unterschieds zum Verbundbau mit bereits bekannten Nachweisverfahren approximiert werden kann. Die Ergebnisse zeigen geringere Streuungen als die Ergebnisse der zentrisch beanspruchten Probekörper und die festgestellten residualen Traglasten liegen vergleichsweise auf einem höheren Niveau. Hinsichtlich der Sicherstellung der angestrebten Bauteilduktilität zeigt sich somit die exzentrische Beanspruchung als weniger kritisch als die rein zentrische Druckbeanspruchung. Die Wickelverstärkung

$\varnothing S_{inside} = 133.0 \text{ mm}$ and $\varnothing S_{outside} = 169.0 \text{ mm}$. Due to the moment loading caused by the eccentric load application, the presented approach for calculating the residual load-bearing capacity N_{res} is not meaningful. Instead, the definition according to Lindschulte/Lohaus is used, in which the force absorbed immediately after exceeding the maximum ultimate load is defined as the residual ultimate load N_{res^*} .

It can be deduced that the ultimate load of wrapping-reinforced hybrid tubes can be approximated with already known verification methods despite the conceptual difference to composite construction. The results show lower scatter than the results of the centrally loaded specimens and the residual ultimate loads determined are comparatively at a higher level. With regard to ensuring the desired component ductility, the eccentric compressive loading appears to be less critical than the purely centric compressive loading. The wrapping reinforcement is therefore a highly effective type of reinforcement even under moment loading.

3.3 Numerical investigations

Accompanying the experiments, numerical investigations were carried out to verify the design principles and gain detailed insights into the load-bearing behaviour of the components. For example, stresses and strains in the concrete core can be read off, failure modes (Fig. 7) can be determined and the utilization states of the individual components can be determined for optimized design.

A fully parameterized (material and geometry) Abaqus solid model was used, which allows automated model generation. In a pre-in-

Serie Series	e/d [-]	t _F [mm]	N _{max} [kN]	σ ² N _{max} [kN]	N _{res*} [kN]	σ ² N _{max} [kN]
E28-C06	0,17	0,6	1.049	34	894	15
E28-C12	0,17	1,2	967	88	947	63
E58-C06	0,34	0,6	681	95	522	37
E58-C12	0,34	1,2	723	45	604	62

Tabelle 4: Versuchsergebnisse zur Normalkraft-Momenten-Überlagerung | **Table 4:** Experimental program of tests with normal force-moment superposition including the in-series standard deviations

ist demnach auch bei Momentenbeanspruchung eine hochwirksame Art der Bewehrung.

3.3 Numerische Untersuchungen

Begleitend zu den Experimenten wurden numerische Untersuchungen durchgeführt, um die Konstruktionsprinzipien zu überprüfen und detaillierte Einsichten in das Tragverhalten der Bauteile zu gewinnen. So können beispielsweise Spannungen und Dehnungen im Betonkern abgelesen werden, Versagensmodi (Bild 7) bestimmt und die Ausnutzungszustände der einzelnen Komponenten für eine optimierte Bemessung ermittelt werden.

Verwendet wurde ein vollständig parametrisiertes (Material und Geometrie) Abaqus-Volumenmodell, das eine automatisierte Modellerzeugung erlaubt. In einer Voruntersuchung wurden unter Berücksichtigung der am IfB bestehenden Versuchsergebnisse zum UHFB-Hybridrohr Materialparameter des verwendeten *Concrete-Damage-Plasticity*-Materialmodells kalibriert. Ein detaillierter Einblick in die numerischen Untersuchungen ist in [14] gegeben. Das Modell ist in der Lage, mit einer hohen Übereinstimmung die maximale und residuale Traglast zu prognostizieren.

4 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Bauweise *wickelverstärkte Hybridrohre* können extrem leichte Betonbauteile mit hoher Tragfähigkeit konzipiert werden. Während der Betonbau üblicherweise als Massivbau und der Stahlbau eher als Leichtbauweise eingestuft wird, kann der als Benchmark anzusehende Kennwert Tragfähigkeit zu Gewicht mit etwa 15 kN/kg gegenüber einem vergleichbaren Rohr aus Baustahl (S235, 30 kN/kg) etwa um das Doppelte gesteigert [8] werden. Sowohl unter reiner Normalkraftbeanspruchung als auch unter Normalkraft- und Momentenbeanspruchung kann mithilfe der Wickelverstärkung ein duktileres Tragverhalten sichergestellt werden. So kann UHFB beispielsweise in besonders leichten Stützen eingesetzt werden, ohne dass große Stahlteile zur Sicherstel-

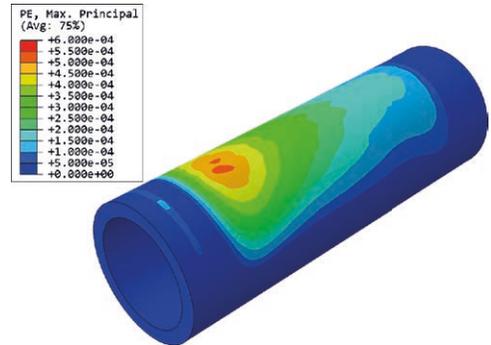


Bild 7: Anhand der Simulation einer exzentrisch beanspruchten Probe kann das Versagen der Betondruckzone durch die Darstellung plastischer Verformungen nachvollzogen werden | **Fig. 7:** By simulating an eccentrically loaded specimen, the failure of the concrete pressure zone can be demonstrated by displaying plastic deformations

vestigation, material parameters of the *concrete-damage-plasticity* material model used were calibrated taking into account the existing test results on the UHPC hybrid tube at the IfB. A detailed insight into the numerical investigations is given in [14]. The model is able to predict the maximum and residual ultimate load with a high accuracy.

4 Summary

With the help of the *wrapping-reinforced* hybrid tube construction method, extremely lightweight concrete components with high load-bearing capacity can be designed. Concrete constructions are usually classified as solid and heavy construction and steel constructions are considered rather as lightweight construction. The characteristic value of load-bearing capacity to dead weight, which is to be regarded as a benchmark, can be increased by about double with about 15 kN/kg compared to a comparable pipe made of structural steel (S235, 30 kN/kg) [8]. Ductile load-bearing behaviour can be ensured both under pure normal force loading and under normal force and moment loading with the aid of the wrapping reinforcement. For example, UHPC can be used in particularly lightweight columns without the need for large amounts of steel to ensure ductility

lung der Duktilität notwendig werden und ohne dass dem UHFB Stahlfasern beigefügt werden müssten, welche die Verarbeitbarkeit und die Formfüllungseigenschaften des UHFBs erfahrungsgemäß deutlich verschlechtern würden. Im Gegensatz zu einer Stahlfaserverstärkung, deren Orientierung kaum zielsicher beeinflusst werden kann, stellt in wickelverstärkten Hybridrohren ein Faser-Kunststoff-Verbundsystem mit einer steuerbaren Faserorientierung sicher, dass die günstigen Materialeigenschaften der Kohlenstofffasern sowie des UHFB zielgerichtet so eingesetzt werden können, dass sie sich funktional gegenseitig ergänzen, um leichte und sichere Drucktragglieder zu erzeugen.

Während Betontragwerke bislang immer deutlich schwerer waren als Stahltragwerke können wickelverstärkte Hybridrohre diesen Nachteil nicht nur ausgleichen, sondern bei gleicher Traglast und gutmütigem Versagensverhalten sogar ca. 50 % des Eigengewichts vergleichbarer Konstruktionen aus konventionellem Baustahl einsparen. Damit bilden sie eine aussichtsreiche Perspektive beim „Leicht Bauen mit Beton“.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 257623116 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): DAfStb-Richtlinie Ultrahochfester Beton (UHFB-Richtlinie). Entwurf 01.07.2019, verwobene Fassung von EC 2-1-1 + NA + UHFB-Regelungen
- [2] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC2010.
- [3] Lindschulte, N.; Lohaus, L.: Rohre aus Ultrahochfestem Beton mit Stahlblechummantelung unter zentrischer Druckbeanspruchung. Bauingenieur 90 (2015) 2, S. 71–80

and without the need to add steel fibres to the UHPC, which would significantly deteriorate the workability and mold-filling properties of the UHPC according to experience. In contrast to steel fibre reinforcement, which orientation can hardly be influenced in a targeted manner, in wrap-reinforced hybrid tubes a fibre-plastic composite system with a controllable fibre orientation ensures that the favourable material properties of the carbon fibres as well as the UHPC can be used in such a manner, that they complement each other functionally, producing lightweight and safe compression members.

While concrete structures have always been significantly heavier than steel structures so far, wrapping-reinforced hybrid tubes can not only compensate this disadvantage but also even save around 50% of the dead weight of comparable structures made of conventional structural steel with the same ultimate load and good-natured failure behaviour. This makes them a promising option for "Future Concrete Structures Using Bionic, Mathematical and Engineering Formfinding Principles".

Acknowledgement

The authors would like to thank "Deutsche Forschungsgemeinschaft" (DFG) for funding project no. 257623116 within the priority program SPP 1542.

- [4] Scholle, N.; Lohaus, L.; Lindschulte, N.: Weight-saving potential of hybrid tube structures. In: Midendorf, B.; Fehling, E. (Hrsg.): Proc. of HiPerMat 2016 – 4th Int. Symp. on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Material, Kassel: kassel university press GmbH, 09.–11.03.2016, 2016, Contribution 193, S. 237–238
- [5] Lindschulte, N.: Drucktragverhalten von Rohren aus Ultrahochfestem Beton mit Stahlblechummantelung. Diss., Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2013
- [6] Markowski, J.; Lohaus, L.: Innovatives Bewehrungskonzept für leichte Stützen aus ultra-hochfestem Beton. In: Lohaus, L.; Haist, M.; Marx, S. (Hrsg.):

Beiträge zur 7. DAFStb-Jahrestagung mit 60. Forschungskolloquium, 28./29.10.2019 in Hannover, Hannover: Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover, 2019, S. 183–195 – DOI: 10.15488/5538

[7] Markowski, J.; Lohaus, L.: UHPC Sandwich Structures with Composite Coating under Compressive Load. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* 7 (2016), S. 38–42 – DOI: 10.14311/APP.2017.7.0038

[8] Markowski, J.; Lohaus, L.: Winding Reinforced UHPC Sandwich Structures for Lightweight Jackets for Offshore Megastructures. *Journal of Physics: Conference Series* 1356 (2019) – Proc. of EERA Deep Wind Conf. 2019, 16.–18.01.2019 in Trondheim (Norwegen), Beitrag Nr. 012027, 9 S. – DOI: 10.1088/1742-6596/1356/1/012027

[9] Fehling, M.; Schmidt, T.; Teichmann, K.; Bunje, K.; Bornemann, R.; Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht zum Projekt DFG FE 497/1-1, erschienen in: Schmidt, M.; Fehling, E. (Hrsg.): *Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau*, Heft 1, Kassel: kassel university press, 2005

[10] DIN EN 10130:2007-02: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 10130:2006.

[11] Attard, M. M.; Foster, J. F.: *Ductility on High Strength Concrete Columns*. Uniciv Report 344, University of New South Wales, Sydney, Australia, 1995

[12] Lohaus, L.; Markowski, J.: Rohrförmige Drucktragglieder aus Ultrahochfestem Beton – Wirkung der Blechummantelung und Wickelverstärkung auf Duktilität und Resttragfähigkeit. In: Pahn, M.; Thiel, C.; Glock, C. (Hrsg.): *Vielfalt im Massivbau – Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell*, TU Kaiserslautern / Ernst & Sohn, 2018, S. 501–514

[13] DIN EN 1994-1-1:2010-12: Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1994-1-1:2004 + AC:2009.

[14] Markowski, J.; Lohaus, L.: Ultra-high Performance Concrete Sandwich Structures as Basic Element of Offshore Mega Structures – A Finite Element Model. In: *The Int. Society of Ocean and Polar Engineers (Hrsg.): Proc. of 29th Int. Ocean and Polar Engineering Conf. (ISOPE)*, 16.–21.06.2019 in Honolulu (Hawaii, USA), 2019, S. 4128–4134

Bildnachweise | Picture credits

Alle Bilder | All pictures: Jan Markowski

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Wickelverstärkte Hybridrohre | Wrapped hybrid tubes

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus Institutsleiter (bis 2020) Head of the institute (until 2020)
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	LO751/16-1 (Projektnummer Project number: 257623116)
Adresse Address:	Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe, Appelstr. 9A, 30167 Hannover
Kontakt Contact:	+49 511 762 3722 institut@baustoff.uni-hannover.de www.baustoff.uni-hannover.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Reporting / funding period: 01.04.2015–31.03.2018 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 31.05.2018
Team Team:	Niklas Scholle (01.04.2015–30.11.2015) Jan Markowski (01.12.2015–31.05.2018)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Markowski, J.; Lohaus, L.: UHPC Sandwich Structures with Composite Coating under Compressive Load. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* 7 (2016), S. 38–42 – DOI: 10.14311/APP.2017.7.0038
- Lohaus, L.; Markowski J.: Rohrförmige Drucktragglieder aus Ultrahochfestem Beton – Wirkung der Blechummantelung und Wickelverstärkung auf Duktilität und Resttragfähigkeit. In: Pahn, M.; Thiel, C.; Glock, C. (Hrsg.): *Vielfalt*

im Massivbau – Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell, TU Kaiserslautern / Ernst & Sohn, 2018, S. 501–514

- Markowski, J.; Lohaus, L.: Winding Reinforced UHPC Sandwich Structures for Lightweight Jackets for Offshore Megastructures. In: Journal of Physics: Conference Series 1356 (2019) – Proc. of 16th Deep Sea Offshore Wind R&D conf., 16.–18.01.2019 in Trondheim (Norwegen), 2019, 9 Seiten – DOI: 10.1088/1742-6596/1356/1/012027
- Markowski, J.; Lohaus, L.: Ultra-high Performance Concrete Sandwich Structures as Basic Element of Offshore Mega Structures – A Finite Element Model. In: The International Society of Ocean and Polar Engineers (Hrsg.): Proc. of 29th Int. Ocean and Polar Engineering Conf. (ISOPE), 16.–21.06.2019 Honolulu (Hawaii, USA), 2019, paper ISOPE-I-19-619, S. 4128–4134
- Markowski, J.; Lohaus, L.: Innovatives Bewehrungskonzept für leichte Stützen aus ultra-hochfestem Beton. In: Beiträge zur 7. DAfStb-Jahrestagung mit 60. Forschungskolloquium, 28./29.10.2019 in Hannover, Hannover: Institutionelles Repository der Leibniz Universität Hannover, 2019, S. 183–195 – DOI: 10.15488/5538

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Markowski, J.: Zum Tragverhalten von Hohlzylindern aus Ultra-hochfestem Beton mit Bewehrung aus Stahlblech und Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. (geplante Einreichung | planned submission: 2022)

Studienarbeiten | Student's research projects

- Hunnius, J.: Untersuchungen des Einflusses einer zusätzlichen Faserkunststoff-Wickelverstärkung auf das Tragverhalten von stahlblechummantelten UHFB-Rohrstrukturen. Masterarbeit, 2015
- Abdulkarim, W.: Erstellung eines parametrisierten, numerischen Modells zum tragverhalten Wickelverstärkter Hybridrohre. Bachelorarbeit, 2016
- Müller, M.: Dauerhaftigkeitsbedingungen von Faser-Kunststoff-Verbundsystemen unter Offshore-Bedingungen. Projektarbeit, 2016
- Duhni, A.: Erstellung eines numerischen Modells zum Tragverhalten Wickelverstärkter Hybridrohre. Bachelorarbeit, 2017
- Jakoby, F.: Tragverhalten von exzentrisch belasteten UHFB-Hohlzylindern mit Carbon- und Blechbewehrung. Bachelorarbeit, 2018
- Loose, A. J.: Beschreibung des Tragverhaltens von Wickelverstärkten UHFB-Hybridrohren. Projektarbeit, 2018
- Müller, M.: Wickelverstärkte Rohre aus Ultrahochfestem Beton unter einaxialer Druckbeanspruchung. Bachelorarbeit, 2018
- Bramme, A.: Knoten und Fügstellen von stabförmigen Stahlbeton (Fertig-)Bauteilen. Projektarbeit, 2019
- Horst, L.: Numerische Untersuchung zum versagensinitierenden Mechanismus Wickelverstärkter Hybridrohre. Projektarbeit, 2019
- Richter, D.: Vergleichende Gegenüberstellung unterschiedlicher Bauweisen schlanker Stützen unter besonderer Berücksichtigung des Eigengewichts. Projektarbeit, 2019

Folgeprojekt | Follow-up project

- Qualitätsgesicherte Fließfertigung leichter UHFB-Stabelemente mittels Künstlicher Neuronaler Netze | Quality-assured flow production of lightweight UHPC rod elements using artificial neural networks

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus, Prof. Dr.-Ing. Raimund Rolles (Institut für Statik und Dynamik, LUH)
Förderung Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 2187
Förderzeitraum Funding period:	01.01.2020–31.12.2022

Methoden und Werkzeuge für Entwurf und Herstellung schalenartiger und dünnwandiger Betonbauteile mit Regelflächengeometrie | Methods and tools for the design and construction of thin-walled concrete structures with ruled surface geometry

- ▶ Mike Schlaich¹, Arndt Goldack¹, Juan Pablo Osman-Letelier¹, Daniel Lordick², Kevin Noack², Martin Friedrich Eichenauer², Robert Päßler² Michael Pott²
- ▶ ¹ Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, TU Berlin
- ▶ ² Institut für Geometrie, TU Dresden

1 Einführung

Schalentragwerke werden derzeit häufig aus Stahl oder Holz gebaut, dagegen findet Beton aus diversen Gründen selten Verwendung. Dies liegt unter anderem an der aufwändigen und daher kostenintensiven Schalungsherstellung [1], [2]. Werden Schalen mit einer Regelflächengeometrie entworfen, kann die Anwendung von Beton wieder wirtschaftlich sein. Regelflächen werden aus Geraden erzeugt und weisen dennoch eine doppelte Krümmung auf. Dadurch kann die Schalung aus geradlinigen Elementen (z. B. Holzbrettern) oder für eine höhere Präzision mit einer Heißdrahtschneidemaschine hergestellt werden. Somit lässt sich das effiziente Tragverhalten doppelt gekrümmter Schalen mit einer vergleichsweise einfachen Herstellung vereinen [3], [4].

Das Potenzial von Regelflächen zeigt sich vor allem in Dachformen der 1950er und 1960er Jahren deutlich, bei denen weltweit verschiedene Varianten von Betonschalen mit Regelflächengeometrie gebaut wurden. In Mexiko unter Felix Candela und in Deutschland unter Ulrich Müther wurden zahlreiche Bauten realisiert, deren Gestaltung im Vergleich zu anderen Schalentragwerken eine einfache Herstellung im Blick hat.

1 Introduction

These days, shell structures are generally made of steel or wood, whereas concrete is rarely used. One reason for this is the complex and therefore cost-intensive production of formwork [1], [2]. However, with the use of ruled surface geometries, the use of concrete can once again become economical. Ruled surfaces are created from straight lines and still can have a double curvature. This allows the formwork to be made from straight elements (e.g. wooden boards) or for greater precision, with a hot wire cutting machine. Thus, the efficient load-bearing behaviour of doubly curved shells can be combined with a comparatively simple production process [3], [4].

The potential of ruled surfaces is particularly evident in roof forms from 1950s and 1960s. In this decades, different variants of concrete shells with ruled surface geometry were built worldwide. In Mexico under Felix Candela and in Germany under Ulrich Müther, numerous buildings were realized, whose design, compared to other shell structures, focused on a simple production process.

2 Schalen mit Regelflächengeometrie

Regelflächen gehören zu den sogenannten geometrischen Formen, da sie mathematisch explizit beschrieben werden können. Anhand ihrer Hauptkrümmungsrichtungen lassen sich Regelflächen mit dem Gauß'schen Krümmungsmaß κ in einfach gekrümmte ($\kappa = 0$) oder negativ gekrümmte ($\kappa < 0$, von einzelnen Erzeugenden abgesehen) Flächen gliedern. Im ersten Fall ($\kappa = 0$) sind die Flächen wie z. B. Zylinder und Kegel *abwickelbar* und lassen sich aus einem ebenen Material verzerrungsfrei herstellen. Im zweiten Fall ($\kappa < 0$) nennt man die Flächen *windschief*. Wichtige Vertreter der Gruppe der nicht abwickelbaren Regelflächen sind das hyperbolische Paraboloid (Bild 1 a) und das einschalige Hyperboloid (Bild 1 b). Sie bilden gemeinsam die Gruppe der sogenannten algebraischen Regelflächen 2. Ordnung, auch Reguli genannt [5]. Ihre Besonderheit ist, dass sie je zwei Scharen von geraden Erzeugenden tragen, also zwei Reguli enthalten.

Allgemein werden Regelflächen durch die Bewegung einer Gerade im dreidimensionalen Raum erzeugt. Pottmann et al. [6] kategorisieren die Erzeugung von Regelflächen insofern nach zwei Verfahren: Entweder wird eine Gerade entlang einer Leitkurve $\mathbf{c}(u)$ mit einem variablen Richtungsvektor $\mathbf{d}(u)$ bewegt (Bild 1 e) oder die Regelfläche wird durch zwei korrespondierende Leitkurven \mathbf{C}_1 und \mathbf{C}_2 erzeugt (Bild 1 f). Eine weitere Methode wird von Pottmann und Wallner vorgestellt [7], nach welcher die Erzeugenden mit Mitteln der Liniengeometrie [8] direkt verändert werden. Dieser Ansatz wird in Abschnitt 4 beschrieben und wurde auch im Rahmen dieses Projektes für den Entwurf von Betonbauteilen mit Regelflächengeometrie untersucht [4].

3 Entwurf (TU Berlin)

Der Entwurf gehört zu den wichtigsten und schwierigsten Phasen und ist der Ursprung des Tragwerks. Die Wahl der Baustoffe, des Systems und der Abmessungen ist maßgeblich für Funktionstüchtigkeit, Wirtschaftlichkeit, äußere Erscheinung, Bauausführung und Bauzeit. Vor

2 Shells with ruled surface geometry

Ruled surfaces belong to the so-called geometric shapes, since they can be explicitly described by mathematical formulae. Based on their curvature, ruled surfaces can be classified with the Gaussian curvature measure κ as single curved ($\kappa = 0$) or negatively curved ($\kappa < 0$) surfaces. In the first case ($\kappa = 0$), the surfaces such as cylinders and cones and torsal surfaces can be developed and produced from a flat material without distortion. In the second case ($\kappa < 0$) the surfaces cannot be developed and called *skew*. Most prominent representatives of the group of skew ruled surfaces are the hyperbolic paraboloid (Fig. 1 a) and the one-sheeted hyperboloid (Fig. 1 b). Together they form the group of the algebraic ruled surfaces of second order, also called regulus [5]. Their special feature is that they each carry two families of generators, i.e. they contain two reguli.

In general, ruled surfaces are created by moving a straight line in three-dimensional space. Pottmann et al. [6] categorized the generation of ruled surfaces in two methods: In the first method, a straight line is moved along a director curve $\mathbf{c}(u)$ with a variable direction vector $\mathbf{d}(u)$ (Fig. 1 e) or the ruled surface is generated by two corresponding guide curves \mathbf{C}_1 and \mathbf{C}_2 (Fig. 1 f). A further method is presented by Pottmann and Wallner [7], according to which the straight lines can be manipulated directly by means of line geometry [8]. This approach is described in section 4 and was investigated in this project for the design of concrete shells with ruled surface geometry [4].

3 Conceptual design (TU Berlin)

The conception and design, the birth of the structure, is one of the most important and difficult phases. The choice of building materials, system and dimensions is decisive for the functional efficiency, economy, external appearance, construction and construction time. The conceptual design plays an important role, especially in shell structures: in double-curved

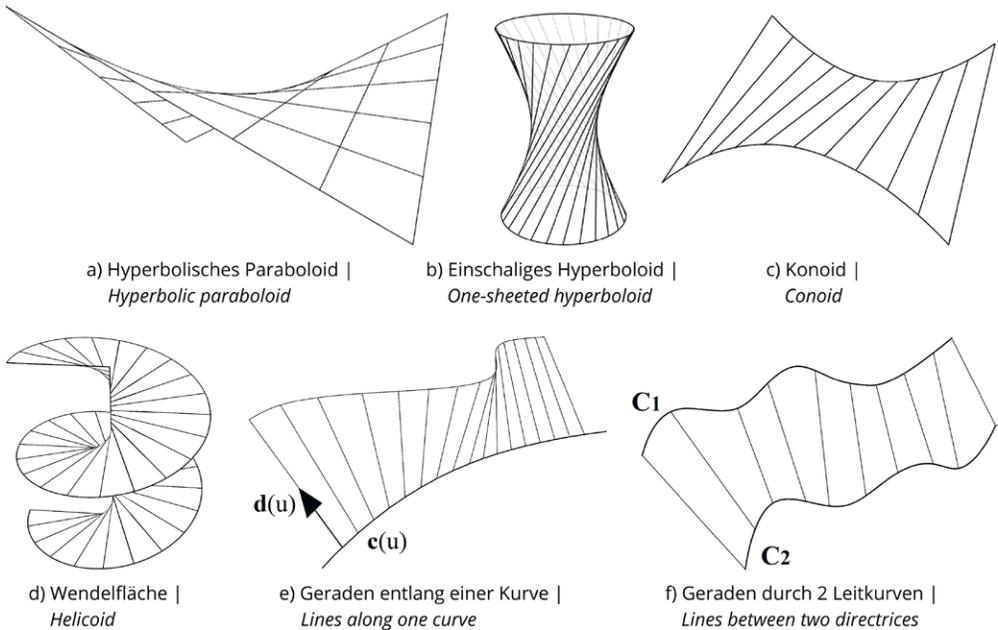


Bild 1: Beispiele für einige negativ gekrümmte Regelflächen (a-f) | Fig. 1: Examples of some skew ruled surfaces (a-f)

allen bei Flächentragwerken spielt der Entwurf eine wichtige Rolle: bei doppelt gekrümmten Flächentragwerken beeinflussen sich Form und Konstruktion entscheidend, sodass jede Variation der Form eine direkte Wirkung auf Tragverhalten, Herstellung und Montage hat. Deshalb werden leichte dünnwandige Flächentragwerke nicht in der üblichen Art und Weise entworfen. Im Mittelpunkt des Entwurfs steht die Formfindung [9]. Dazu gibt es eine Vielzahl physikalischer und numerischer Methoden [10]. Die bekannteste physikalische Methode ist das Hängemodell, beispielsweise verwendet von Antoni Gaudí und Heinz Isler. Klassische numerische Methoden sind die Finite-Elemente-Methode (direkte Übersetzung der physikalischen Hängemodelle), dynamische Relaxation und die Kraft-Dichte-Methode [11]. Allerdings sind diese Methoden üblicherweise auf Tragwerke mit reiner Membranwirkung beschränkt [10], [12]. Weiterhin ermöglichen sie nur die Betrachtung eines Lastfalles (i. d. R. Eigengewicht) [12]. Im Falle keiner reinen Membranwirkung und mehrerer Lastfälle ist eine Ergänzung mittels der Methoden der Strukturoptimierung vielversprechender [13].

shell structures, form and construction have a decisive influence on each other in such a way that every variation of the form has a direct effect on structural behaviour, production and installation. Therefore, shell structures are not designed in the usual way. The focal point of the design is the form finding [9]. This includes a variety of physical and numerical methods [10]. The best known physical method is the hanging model, for example used by Antoni Gaudí and Heinz Isler. Classical numerical methods are the finite element method, dynamic relaxation and the force-density method [11]. However, these methods are usually limited to structures with pure membrane action [10], [12]. Furthermore, they only allow the consideration of one load case (usually dead weight) [12]. In the case of no pure membrane action and several load cases, the use of the methods involving structural optimization is more promising [13].

As already mentioned, ruled surfaces belong to the group of so-called geometric shapes, since they can be described mathematically or, in some cases, their structural behaviour can be

Wie bereits erwähnt, gehören Regelflächen zu der Gruppe der sogenannten geometrischen Formen, da sie mathematisch beschrieben werden können bzw. ihr Tragverhalten bei einigen Fällen analytisch untersucht werden kann. Allerdings weisen diese i. d. R. keinen reinen Membranzustand auf, wodurch zusätzliche Maßnahmen wie Randträger, Steifen oder Vorspannung betrachtet werden müssen [14].

Für den Entwurf von Schalen mit Regelflächengeometrie können die Methoden der Strukturoptimierung verwendet werden. Hierbei werden Geometrieparameter soweit variiert, bis eine Zielfunktion minimiert ist [15]. Das generelle Problem der Strukturoptimierung kann wie folgt beschrieben werden [14]:

$$\text{minimiere } f(\mathbf{x}) \quad (1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$h_i(\mathbf{x}) = 0, i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$g_j(\mathbf{x}) = 0, j = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$x_k(\mathbf{x}) = 0, k = 1, \dots, p \quad (4)$$

Die Zielfunktion f ist abhängig von dem Entwurfsvektor \mathbf{x} , in dem die Optimierungsvariablen definiert sind, sowie m Gleichungen $h_i(\mathbf{x})$ und p Ungleichungen $g_j(\mathbf{x})$ als Nebenbedingungen begrenzt. Es ist ebenso möglich, für mehrere Zielfunktionen und unterschiedliche Lastfälle sowie für die entsprechenden Lastfallkombinationen zu optimieren [16].

Die Strukturoptimierung kann, in Abhängigkeit von der Art der Entwurfsvariablen, in die folgenden vier Unterkategorien aufgeteilt werden: Form-, Topologie-, Querschnitts- und Materialoptimierung [15], [16], Tabelle 1. Im Rahmen dieses Projektes wurden die Untersuchungen auf Form- und Materialoptimierung beschränkt, da hierbei die Vorzüge der Regelflächengeometrie am besten genutzt werden können.

4 Formoptimierung (TU Berlin)

In diesem Projekt war die Regelflächengeometrie als feste Bedingung für die Form der Schale

described analytically. However, these usually do not show a pure membrane state, therefore, additional measures such as edge beams or prestressing have to be considered [14].

For the design of shells with ruled surface geometry the methods of structural optimization can be used. Here, geometric parameters are varied until an objective function is minimized [15]. The general problem of structural optimization can be described as follows [14]:

$$\text{minimize } f(\mathbf{x}) \quad (1)$$

$$\text{subject to } h_i(\mathbf{x}) = 0, i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$g_j(\mathbf{x}) = 0, j = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$x_k(\mathbf{x}) = 0, k = 1, \dots, p \quad (4)$$

The objective function f depends on the design vector \mathbf{x} , in which the optimization variables are defined, and m equations $h_i(\mathbf{x})$ and p inequalities $g_j(\mathbf{x})$ as constraints. It is also possible to optimize several objective functions with different load cases and for the corresponding load combinations [16].

Depending on the type of design variables, the structural optimization can be divided into the following four subcategories: shape, topology, cross-section and material optimization [15], [16], see Table 1. In the context of this project, the investigations were limited to shape and material optimization, since the advantages of a ruled surface geometry can be used best here.

4 Shape optimization (TU Berlin)

In this project, a ruled surface geometry was set as a fixed constrain for the shape optimization. The shape optimization is an iterative process that works with three models: Design, analysis and optimization model [10], [16]. The *design model* defines the parametric representation of the shape. To develop the *analysis model*, the model properties (e.g. support conditions, load cases, cross-sections, material properties, etc.) are defined and a structural analysis based on finite elements (FE) is performed (Fig. 2). The

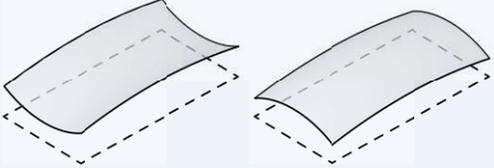
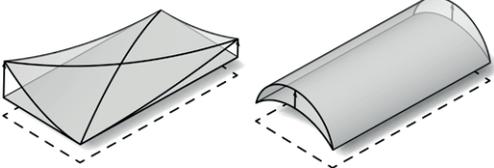
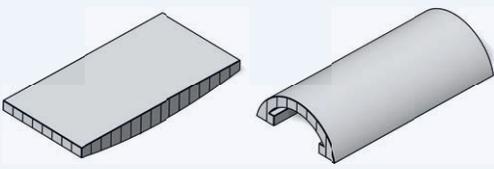
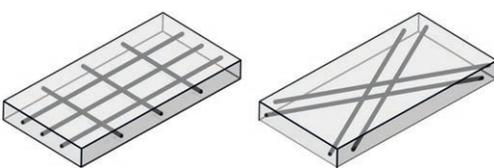
<p>Topologieoptimierung Topology optimization</p>	
<p>Formoptimierung Shape optimization</p>	
<p>Querschnittsoptimierung Cross-section optimization</p>	
<p>Materialoptimierung Material optimization</p>	

Tabelle 1: Methoden der Strukturoptimierung | Table 1: Methods of structural optimization

gesetzt und somit eine Beschränkung auf eine Formoptimierung vorgegeben. Die Formoptimierung ist ein iterativer Prozess, der mit drei Modellen arbeitet: Entwurfs-, Analyse- und Optimierungsmodell [10], [16]. Das *Entwurfsmodell* definiert die parametrische Darstellung der Form. Zur Erzeugung des *Analysemodells* werden die Modelleigenschaften (z. B. Auflagerbedingungen, Lastfälle, Querschnitte, Materialeigenschaften etc.) definiert und eine Tragwerksanalyse auf Basis einer Finite-Elemente-Berechnung (FE-Berechnung) ausgeführt (Bild 2). Dabei können die Tragwerkseigenschaften und Ergebnisse (z. B. Masse, Verformungsenergie, Druck- und Zugspannungen, Dehnungen, Verformungen, Eigenfrequenzen, Beullastfaktoren) verwendet werden, um die Zielfunktion oder die Nebenbedingungen der Optimierung zu definieren [10]. Das *Optimierungsmodell* wertet die Ergebnisse aus dem Analysemodell aus und

structural properties and results (e.g. mass, deformation energy, compressive and tensile stresses, strains, deformations, natural frequencies, buckling load factors) can be used to define an objective function or the constraints for the optimization [10]. The *optimization model* evaluates the results from the analysis model and searches for a shape, in which the objective function is minimized within the defined constraints.

The selected parameterization of the shape in the *design model* simultaneously defines and limits ("filters") the set of possible shapes (the *design space*) and thus has a significant influence on the solution of the optimization problem [17]. The usual methods for parameterization are CAGD-based (*Computational Aided Geometric Design*), FE-based or isogeometric analysis (IGA) [14]. Especially for the parameterization of ruled

steuert die Suche nach einer Form, bei der die Zielfunktion innerhalb der definierten Nebenbedingungen minimiert wird.

Die gewählte Parametrisierung der Form im *Entwurfsmodell* definiert und limitiert („filtert“) gleichzeitig die Menge der möglichen Formen (den *Entwurfsraum*) und hat somit großen Einfluss auf die Lösung des Optimierungsproblems [17]. Die üblichen Methoden für die Parametrisierung sind die CAGD-basierte (*Computational Aided Geometric Design*), die FE-basierte oder die isogeometrische Analyse (IGA) [14]. Speziell für die Parametrisierung von Regelflächen und als Alternative zu den oben genannten Methoden werden die Modelle der Liniengeometrie von Lordick et al. [8] aufgeführt.

5 Formoptimierung mittels der Verwendung eines liniengeometrischen Modells (TU Dresden)

5.1 Liniengeometrisches Modell

Die Mannigfaltigkeit aller Geraden im dreidimensionalen Anschauungsraum \mathbb{R}^3 ist vierdimensional. Das heißt im Klartext, dass zur Festlegung einer Geraden mindestens vier Koordinaten erforderlich sind. Das ist auch der Grund, warum der Umgang mit Geraden erhöhte Anforderungen an das räumliche Vorstellungsvermögen stellt. Um die Geraden rechnerisch in den Griff zu bekommen, ist es aus mathematischer Sicht üblich, die Geraden als *Punkte* in einem höherdimensionalen Modellraum zu betrachten. Im vorliegenden Projekt wird dazu die sogenannte *Dualsphäre* oder auch *Study Sphere* S_D^2 verwendet. Nun entspricht jeder Punkt auf der vierdimensionalen Dualsphäre einer *orientierten Geraden* im dreidimensionalen Raum. Da jede Regelfläche als Bewegung einer Geraden durch den Raum beschrieben werden kann [7], gibt es eine bijektive Abbildung zwischen den Regelflächen im dreidimensionalen Raum und stetigen Pfaden bzw. Kurven auf der Dualsphäre. Eine Anwendung ist etwa die Kinematik von Industrierobotern.

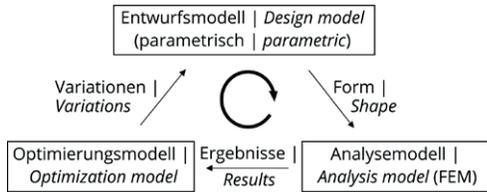


Bild 2: Schematischer Workflow des Optimierungsprozesses | Fig. 2: Schematic representation of the optimization workflow

surfaces and as an alternative to the methods mentioned above, the models of line geometry are recommended by Lordick et al. [8].

5 Shape optimization by using a line geometric model (TU Dresden)

5.1 Geometric point model of line space

The manifold of all straight lines in the Euclidean space is four-dimensional, i.e., for the definition of a straight line, at least four coordinates are necessary. This is also the reason why the handling of straight lines it difficult to imagine the geometry. In order to manipulate straight lines computationally, it is common from a mathematical point of view to consider the lines as *points* in a higher-dimensional model space. In the present project, the so-called *dual unit sphere* or *Study sphere* S_D^2 is used for this purpose. Now, each point on the four-dimensional Study sphere corresponds to an *oriented line* in three-dimensional space. Since each ruled surface can be described as the motion of a straight line through space [7], there is a bijective mapping between ruled surfaces in three-dimensional space and continuous paths or curves on the dual unit sphere. An application of this concept is for example the kinematics of industrial robots.

On the dual unit sphere, ruled surfaces can be treated like spline curves interpolating points. That is, in our algorithms, ruled surfaces interpolate individual predefined control lines represented by individual points on the dual unit sphere (Fig. 3). This allows to implement a range of well-known interpolation algorithms with

Auf der Dualsphäre können Regelflächen wie Spline-Kurven, die Punkte interpolieren, behandelt werden. Das bedeutet, in unseren Algorithmen interpolieren Regelflächen einzelne vordefinierte Kontrollgeraden, welche durch einzelne Punkte auf der Dualsphäre repräsentiert werden (Bild 3). Damit ermöglicht man die Implementierung einer Palette von bekannten Interpolationsalgorithmen mit raffinierten Kontrolloptionen [17], [18]. Die einfache Interpolation zweier Punkte auf S_D^2 durch eine Geodätische entspricht einer Wendelfläche im dreidimensionalen Raum. Ferner erlaubt die Adaption von Finite-Elemente-Verfahren zur Lösung von Randwertproblemen auf S_D^2 die Anwendung des liniengeometrischen Modells auf die im Folgenden genutzten Optimierungsverfahren.

Die Identifikation einzelner Punkte einer Erzeugenden ist mit dem liniengeometrischen Modell nicht direkt möglich. Hier war ein Ansatz, neben dem Richtungs- und dem Momentenvektor noch eine dritte Komponente zur Beschreibung der Geraden mit aufzunehmen. Ein Punkt der Geraden kann durch einen Vektor charakterisiert werden, der den Schnitt mit einer anderen Geraden beschreibt. Diese Methode eignet sich zwar, jedoch verliert man hierbei den Vorteil

refined control options [17], [18]. The simple interpolation of two points on S_D^2 by a geodesic, corresponds to a helical surface in three-dimensional space. Furthermore, the adaptation of finite element methods to solve boundary value problems on S_D^2 allows linking the line geometric model to the optimization methods used in the following.

With the line geometric model, the identification of individual points of a generatrix is not possible in a direct way. Here, one approach was to introduce a third component into the model description of the straight line, additional to the direction and moment vectors. Any point of the line can be characterized by a vector indicating the intersection with another straight line. This method is feasible, however, in the process the advantages of the established calculus on the dual unit sphere cannot be utilized. Therefore, this approach was not pursued. Instead, a solution approach from the first funding period of the SPP was retained.

For the shape optimization, the initial design should be defined on the dual unit sphere. This has the distinct advantage that the design space is by default restricted to ruled surfaces. However, the generated and geometrical optimal

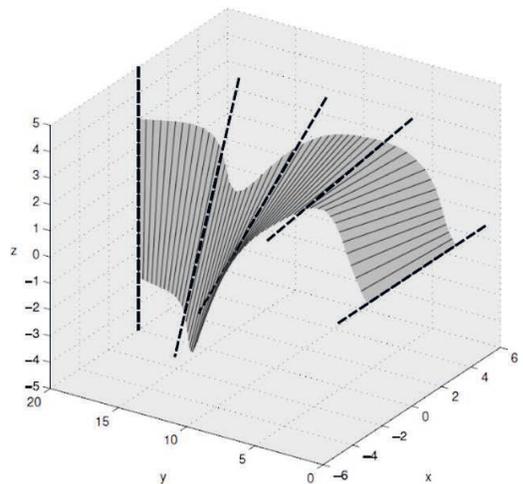
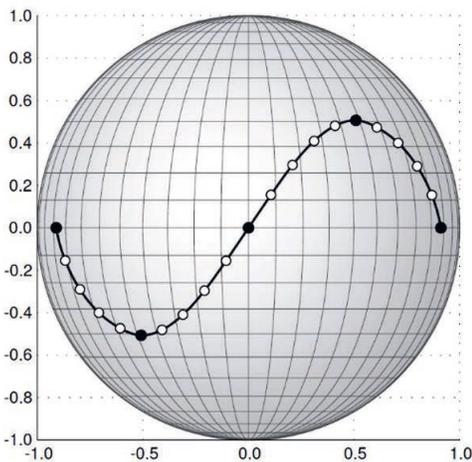


Bild 3: Interpolation auf der Dualsphäre (zweidimensionaler Realteil; links) und entsprechende Regelfläche im dreidimensionalen Raum (schematisch; rechts) | **Fig. 3:** Interpolation on the Study Sphere (two-dimensional real part) on the left side and corresponding ruled surface in the tree-dimensional space (schematic diagram) on the right side

des geschlossenen Kalküls auf der Dualsphäre. Deshalb wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt. Stattdessen wurde ein Lösungsansatz aus der ersten Förderperiode des SPP beibehalten.

Für die Formoptimierung kann das Entwurfsmodell auf der Dualsphäre definiert werden. Das hat den entscheidenden Vorteil, dass der Entwurfsraum auf Regelflächen eingegrenzt wird. Allerdings muss die generierte Form in den euklidischen Raum übersetzt werden, damit das Analysemodell (FE-Modell) erzeugt werden kann. Somit kann das liniengeometrische Modell nicht durchgängig für den ganzen Optimierungsprozess verwendet werden. Dies stellt einen Nachteil im Vergleich zu anderen Formoptimierungsansätzen dar (z. B. isogeometrisches Verfahren [14]), ist aber im Rahmen dieses Projektes nicht zu vermeiden.

5.2 Stückweise geodätische Interpolation von Regelflächenstücken

Die stückweise geodätische Interpolation von Regelflächenstücken mit stetigen Übergängen wurde mithilfe geodätischer Pfade auf der Dualsphäre durchgeführt. Dabei entspricht eine kürzeste Strecke auf S_{D^2} , eine sogenannte Geodätische, einer Wendelfläche im \mathbb{R}^3 . Dafür wurde die duale Rodrigues-Formel verwendet [19] (Bild 4):

$$R(t) = I + \sin(\varphi \cdot t) \cdot N + (1 - \cos(\varphi \cdot t)) \cdot N^2 \quad (5)$$

Hierbei beschreiben $\varphi \cdot t$ die duale Winkelgeschwindigkeit zwischen zwei Erzeugenden und N das duale Kreuzprodukt, welches die Rotationsachse beschreibt. Damit wird nach Chasles-Theorem [20] eine Bewegung einer Erzeugenden im Raum, also eine Regelfläche, über eine Rotation sowie eine Translation beschrieben. Auf eine Starterzeugende $I^{(1)}$ angewendet, bedeutet das:

$$I(t) = R(t) \cdot I^{(1)} = \sin(\varphi \cdot t) \cdot (n \times I^{(1)}) + \cos(\varphi \cdot t) \cdot I^{(1)} \quad (6)$$

Mit $t \in [0,1]$ wird die jeweilige Erzeugende der Regelfläche beschrieben. Diese kann auch analog zu (6) mit

shape must be translated into Euclidean space in order to apply the analysis model (FE model). Thus, the line geometric model cannot be used consistently for the entire optimization process. This is a disadvantage compared to other shape optimization approaches (e.g. isogeometric method [14]), but cannot be avoided in context of this project.

5.2 Piecewise geodesic interpolation of ruled surface patches

The piecewise geodesic interpolation of ruled surface patches with continuous junctions was performed with the help of geodesic paths on the dual unit sphere. Here, a shortest path on S_{D^2} , a so-called geodesic, corresponds to a helical surface in \mathbb{R}^3 (Fig. 4). The dual Rodrigues formula was used for this purpose [19]:

$$R(t) = I + \sin(\varphi \cdot t) \cdot N + (1 - \cos(\varphi \cdot t)) \cdot N^2 \quad (5)$$

Here, $\varphi \cdot t$ describes the dual angular velocity between two generatrices and N the dual cross product, which describes the rotation axis. According to Chasles' theorem [20], a motion of a generatrix in space, i.e. a ruled surface, is described by a rotation and a translation. Applied to an initial generatrix $I^{(1)}$, this means:

$$I(t) = R(t) \cdot I^{(1)} = \sin(\varphi \cdot t) \cdot (n \times I^{(1)}) + \cos(\varphi \cdot t) \cdot I^{(1)} \quad (6)$$

With $t \in [0,1]$, the respective generatrix of the ruled surface is described. This can also be specified analogously to (6), [21] with

$$I(t) = \frac{\sin(\varphi \cdot (1-t))}{\sin \varphi} \cdot I^{(1)} + \frac{\sin(\varphi \cdot t)}{\sin \varphi} \cdot I^{(2)} \quad (7)$$

If the two generatrices $I^{(1)} = r^{(1)} + \epsilon \cdot m^{(1)}$ and $I^{(2)} = r^{(2)} + \epsilon \cdot m^{(2)}$ are parallel, the ruled surface is a plane. This is a trivial minimal surface. For skew generatrices, the helical surface is given by:

$$I(t) = \frac{\sin((1-t) \cdot \theta) + \epsilon \cdot (1-t) \cdot \delta \cdot \cos((1-t) \cdot \theta)}{\sin(\theta) + \epsilon \cdot \delta \cdot \cos(\theta)} \cdot (r^{(1)} + \epsilon \cdot m^{(1)}) + \frac{\sin(t \cdot \theta) + \epsilon \cdot t \cdot \delta \cdot \cos(t \cdot \theta)}{\sin(\theta) + \epsilon \cdot \delta \cdot \cos(\theta)} \cdot (r^{(2)} + \epsilon \cdot m^{(2)}) \quad (8)$$

$$l(t) = \frac{\sin(\varphi \cdot (1-t))}{\sin \varphi} \cdot l^{(1)} + \frac{\sin(\varphi \cdot t)}{\sin \varphi} \cdot l^{(2)} \quad (7)$$

angegeben werden [21]. Falls die beiden Erzeugenden $l^{(1)} = r^{(1)} + \epsilon \cdot m^{(1)}$ und $l^{(2)} = r^{(2)} + \epsilon \cdot m^{(2)}$ parallel sind, ist die Regelfläche eine Ebene. Das ist eine triviale Minimalfläche. Für windschiefe Erzeugende ergibt sich die Wendelfläche zu:

$$l(t) = \frac{\sin((1-t) \cdot \theta) + \epsilon \cdot (1-t) \cdot \delta \cdot \cos((1-t) \cdot \theta)}{\sin(\theta) + \epsilon \cdot \delta \cdot \cos(\theta)} \cdot (r^{(1)} + \epsilon \cdot m^{(1)}) + \frac{\sin(t \cdot \theta) + \epsilon \cdot t \cdot \delta \cdot \cos(t \cdot \theta)}{\sin(\theta) + \epsilon \cdot \delta \cdot \cos(\theta)} \cdot (r^{(2)} + \epsilon \cdot m^{(2)}) \quad (8)$$

Indem man stückweise Kontrollerzeugende verbindet, erhält man Wendelflächenstücke und damit eine Komposition von Minimalflächen. Jedoch sind die Verbindungen nur stetig und im Allgemeinen nicht differenzierbar. In vielen Anwendungen werden jedoch krümmungsstetige, das heißt (C^2) -stetige Übergänge gefordert, im Karosseriebau sogar global dreimal stetig differenzierbare Oberflächen. Insofern war wünschenswert, glättende Algorithmen auf die Dualsphäre zu übertragen, die die Minimaleigenschaft möglichst wenig verletzen. Bereits in der ersten Phase des SPP wurden dazu Vorschläge gemacht, ohne aber die Minimaleigenschaften explizit zu berücksichtigen [8].

By a piecewise connection of control lines, one obtains a set of helical surface patches and thus a composition of minimal surfaces. Unfortunately, the connections are only continuous and in general not differentiable. In many applications, however, curvature-continuous, i.e. (C^2) -continuous, connections are required, in car design even globally three times continuously differentiable surfaces. In this respect, it was desirable to transfer corresponding smoothing algorithms to the dual sphere, which on the other hand affect the minimal surface property as little as possible. Proposals for this were already made in the first phase of the SPP 1542, but without explicitly considering the minimal properties [8].

5.3 Smoothing spline using an energy minimizer

Starting from the piecewise geodesic interpolation, the goal was to smooth the connections. The smoothing is done with the help of a spline method, which is based on the energy minimizer from the Dirichlet principle [22]. But the transfer of the method into the dual number space is not possible without further ado, since within the dual numbers no ordering relation can be defined and therefore it is not possible to

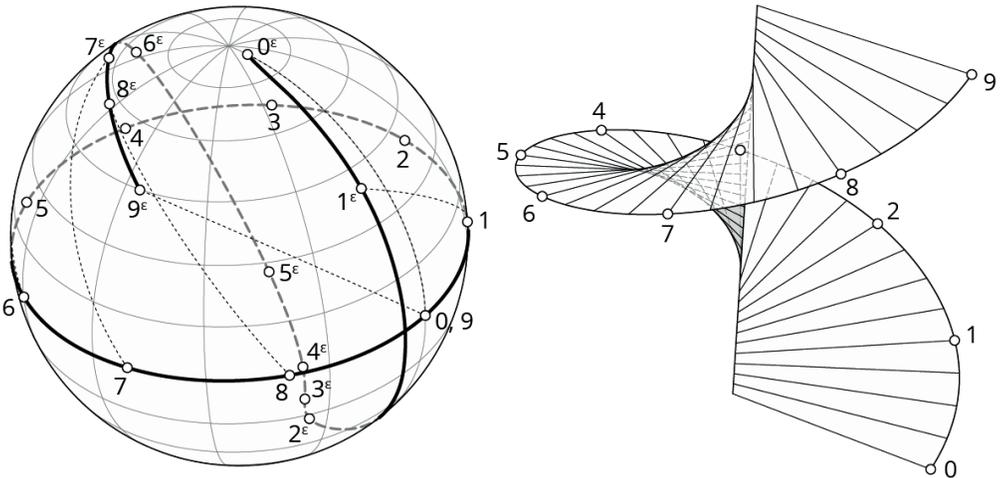


Bild 4: Links: Spezielle Darstellung einer Geodätischen auf der Dualsphäre (Sphäre skaliert, Realteil inzidiert hier mit Äquator; dualer Teil, mit Zeiger ϵ , auf die Sphäre projiziert); rechts: entsprechende Wendelfläche im \mathbb{R}^3 | **Fig. 4:** On the left side: special visualization of a geodesic on the study sphere (real part matches the equator; dual part, projected onto the sphere, marked with ϵ); on the right: corresponding helicoid in the \mathbb{R}^3

5.3 Glättender Spline mithilfe des Energieminimierers

Ausgehend von der stückweisen geodätischen Interpolation war das Ziel, die Übergänge zu glätten. Die Glättung erfolgt mithilfe eines Spline-Verfahrens, welches sich am Energieminimierer des Dirichlet-Prinzips [22] orientiert. Jedoch ist die Übertragung des Verfahrens in den dualen Zahlenraum zunächst nicht ohne Weiteres möglich, da man innerhalb der dualen Zahlen keine Ordnungsrelation definieren und demnach auch nicht hinsichtlich einer Zielfunktion optimieren kann. Um dennoch sinnvolle Ergebnisse zu erzielen, wurde anhand des Randwertproblems

$$S(y) = \sum_{i=1}^m \|y(t_i) - q_i\|^2 + \frac{\lambda_1}{2} \cdot \int_0^1 \|\dot{y}(t)\|^2 dt + \frac{\lambda_2}{2} \cdot \int_0^1 \|\ddot{y}(t)\|^2 dt \quad (9)$$

eine Lösung zu gegebenen Stützpunkten $q_i \in M_{Sg}$ und Zeitpunkten $0 = t_0 < \dots < t_{m+1} = 1$ konstruiert.

Da die Ordnungsprobleme in den dualen Zahlen durch den Dualteil verursacht werden, wurde insbesondere versucht, die Glättung allein unter Berücksichtigung des Realteils durchzuführen. Trotz des offensichtlichen Informationsverlustes lässt sich mit diesem Verfahren tatsächlich eine hinreichend gute Optimierung durchführen. Die Glättung der Regelflächen gelingt überzeugend (Bild 5). Außerdem gestatten die Algorithmen, den Dualteil anteilig zu berücksichtigen. Obwohl nicht anschaulich klar ist, welche geometrische Bedeutung dieses Verfahren hat, kann man es für die Variantenbildung bei der Formfindung einsetzen.

6 Entwicklung eines Softwaremoduls zur Formoptimierung (TU Berlin)

Mit dem Ziel, dünnwandige Betonbauteile mit Regelflächengeometrie unter Verwendung des liniengeometrischen Modells zu optimieren, wurde im Jahr 2016 an der TU Berlin das Softwaremodul *GHtoSOFi* (*Grasshopper to Sofistik*) entwickelt. Dieses Modul dient als Schnittstelle zwischen der liniengeometrischen Geometrie

optimize with respect to an objective function. Nevertheless, in order to nevertheless obtain meaningful results, a solution was developed on the basis of the boundary value problem

$$S(y) = \sum_{i=1}^m \|y(t_i) - q_i\|^2 + \frac{\lambda_1}{2} \cdot \int_0^1 \|\dot{y}(t)\|^2 dt + \frac{\lambda_2}{2} \cdot \int_0^1 \|\ddot{y}(t)\|^2 dt \quad (9)$$

at given interpolation points $q_i \in M_{Sg}$ and time points $0 = t_0 < \dots < t_{m+1} = 1$.

Since the ordering problems in the dual numbers are caused by the dual part, an attempt was made to perform the smoothing, considering only the real part. Despite the obvious loss of information, a sufficiently good optimization can indeed be performed with this method. The smoothing of the ruled surfaces succeeds convincingly (Fig. 5). Furthermore, the algorithms allow to consider the dual part to a certain extent additionally. Although it is not vividly clear what the geometric meaning of this procedure is, it can be used as an extra design parameter to create variants in form finding.

6 Development of a software module for shape optimization (TU Berlin)

The software module *GHtoSOFi* (*Grasshopper to SOFiStiK*) was developed at the TU Berlin in 2016 with the aim of optimizing thin-walled concrete elements with ruled surface geometry using the line-geometric model. This module serves as an interface between the geometry definition (design model), the FE model including the calculation results (analysis model) as well as the eval-

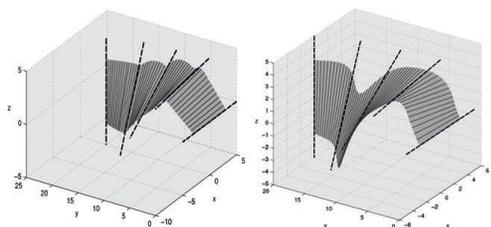


Bild 5: Nicht geglättete (links) sowie mithilfe des Energieminimierers geglättete Wendelflächenpatches (rechts) | **Fig. 5:** Non-smoothed (left) and smoothed helicoidal patches with the help of energy minimization (right)

riedefinition (Entwurfsmodell), dem FE-Modell samt den Berechnungsergebnissen (Analysemodell) sowie der Auswertung der Ergebnisse und Generierung einer neu zu untersuchenden Geometrie (Optimierungsmodell).

Das Softwaremodul wurde so entwickelt, dass der gesamte Optimierungsprozess mit dem Plug-In *Grasshopper 3D* (GH) als Arbeitsumgebung gesteuert wird. Zu Beginn werden innerhalb des Entwurfsmodells die Bauteil- bzw. Tragwerksgeometrie definiert und durch die Festlegung von veränderlichen Größen parametrisiert (wie z. B. Spannweite, Breite usw.). Anschließend wird für die Erzeugung des Analysemodells das Entwurfsmodell in einem ASCII-Input-File an das FE-Programm *SOFiSTiK* übergeben. Im nächsten Schritt definiert der Anwender im Optimierungsmodell die zu optimierenden Parameter, auch Optimierungsvariablen genannt, die erforderlichen Nebenbedingungen $h_i(\mathbf{x})$ und $g_j(\mathbf{x})$ sowie die Zielfunktion(-en) $f(\mathbf{x})$. Beispiele für diese Zielfunktionen sind in Abschnitt 4 aufgeführt. Anschließend werden die Optimierungsvariablen in einem iterativen Prozess variiert, bis innerhalb der festgelegten Nebenbedingungen und bei vorgegebener/n Zielfunktion/en die optimale Bauteilgeometrie ermittelt wird.

GHtoSOFi wurde in *Visual Studio 2015* mit der „*Grasshopper Assembly for v5*“ von McNeel in der Sprache C# entwickelt. Dieses Softwaremodul wurde bei verschiedenen Flächentragwerken mit Regelflächengeometrie angewandt und geprüft [1]. An dem Entwurf einer Schalenbrücke wird nachfolgend das Potential der entwickelten Methode samt Schnittstelle gezeigt.

7 Schalenbrücke mit Regelflächengeometrie (TU Berlin und TU Dresden)

Im Folgenden wird gezeigt, wie die entwickelten Methoden zum Entwurf einer exemplarischen Fußgängerbrücke genutzt wurden. Die als Betonschale geplante, 2 m breite Brücke mit einer konstanten Bauteildicke von 7 cm besitzt abschnittsweise eine Regelflächengeometrie und

uation of the results and generation of a new geometry to be analysed (optimization model).

The software module was developed in such a way that the entire optimization process is controlled by the *Grasshopper 3D* (GH) plug-in. Therefore, it can be considered as a working environment. At the beginning, within the design model the geometry is defined and parameterized by specifying variable sizes (such as span, width, etc.). Then the design model is transferred in an ASCII input file to the FE program *SOFiSTiK* for the generation of the analysis model. In the next step, the user defines in the optimization model the parameters to be optimized (also known as optimization variables), the required constraints $h_i(\mathbf{x})$ and $g_j(\mathbf{x})$ as well as the objective function(s) $f(\mathbf{x})$. Examples of these objective functions are listed in section 4. Subsequently, the optimization variables are varied in an iterative process until the optimum geometry is determined within the specified constraints and with the specified objective function(s).

GHtoSOFi was developed in *Visual Studio 2015* with the "*Grasshopper Assembly for v5*" from McNeel in the C# language. This software module has been used for the optimization of various concrete shells with ruled surface geometry [1]. In the following, the potential of the developed method and the interface is shown with the conceptual design of a shell bridge.

7 Shell bridge with ruled surface geometry (TU Berlin and TU Dresden)

The developed methods were used to design an exemplary pedestrian bridge. The bridge was designed as a concrete shell ruled surface geometry and possesses a span and constant thickness of 20 m and 7 cm respectively. At a later stage of the project a scaled prototype of this bridge was realized as a demonstrator. The first design (Fig. 6) was based on the methodology of the hanging models. In contrast, the spanned mesh used in the model does not only get its shape from the self-weight but also from the tension of the mesh against a wooden arch.

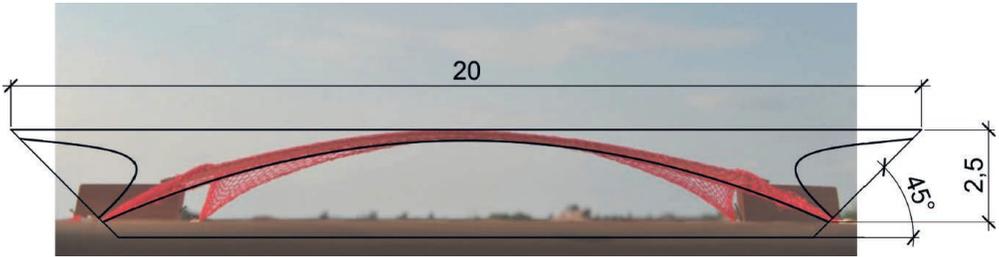


Bild 6: Mit Orangennetz überspannter Holzbogen als Formfindungsmodell der Schalenbrücke (Seitenansicht) (geplante Dimensionen in m) | **Fig. 6:** Shell bridge form finding model by using a spanned mesh against a wooden arch (side view) (dimensions in m)

überspannt 20 m. Zu einem späteren Zeitpunkt des Projektes wurde ein skalierter Prototyp dieser Brücke als Demonstrator realisiert. Der erste Entwurf (Bild 6) orientierte sich an der Methodik der Hängemodelle. Im Gegensatz dazu erhält das im Modell verwendete Orangennetz jedoch seine Form nicht allein durch die Gewichtskraft, sondern durch die Vorspannung des Netzes gegen einen Bogen aus Holz.

Die Beschreibung der Form und ihre Parametrisierung erfolgten auf Grundlage dieses physikalischen Modells, wobei die Methoden der Liniengeometrie verwendet wurden. Dabei wurde die durchgängige Regelfläche, die wesentliche Teile der Brücke beschreibt, durch Interpolation über fünf Kontrollgeraden erzeugt (Bild 7, oben). Unten in Bild 7 sind die verschiedenen Punkte dargestellt, deren Lage parametrisiert und im Optimierungsprozess variiert werden konnte.

Nachfolgend wird ein Beispiel für eine Optimierung einer Regelfläche exemplarisch aufgezeigt, bei welchem die Lage der Auflagerpunkte sowie die Form der Brücke in der Seitenansicht unverändert bleiben. Während der Optimierung wurde die Krümmung der Regelfläche nur durch den Winkel γ (s. Bild 8, links) der Kontrolllinie in der Brückenmitte variiert. Die ersten drei Beulastfaktoren λ_i für eine Last von 5 kN/m² auf dem Brückendeck wurden als Zielfunktionen festgelegt. Aufgrund geometrischer Randbedingungen wurde der Winkel γ auf den Bereich von 0 bis $0,425 \cdot \pi$ beschränkt. Das Optimierungsproblem lautet dann:

The description of the shape and its parameterization was based on this physical model, using the methods of line geometry. The continuous ruled surface, which describes doubly curved parts of the bridge geometry, was generated by interpolation over five control lines (Fig. 7, top). Fig. 7 below shows the various points whose position was parameterised and varied in the optimisation process.

Following is an example of optimization of a ruled surface, where the position of the support points as well as the shape of the bridge remain unchanged in the side view. During the optimization the curvature of the control surface was only varied by the angle γ (see Fig. 8, left) of the control line in the centre of the bridge. The first three buckling load factors λ_i for a load of 5 kN/m² on the bridge deck were defined as ob-

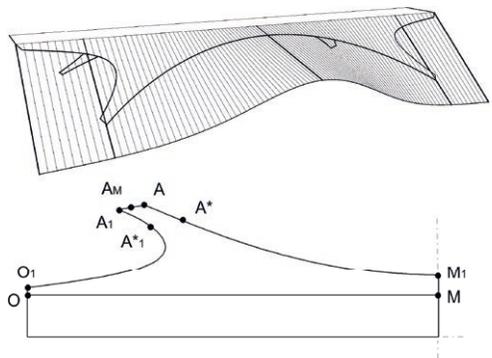


Bild 7: Parametrisierung der Brücke; oben: Erstellung der Regelfläche durch Verwendung der Liniengeometrie, unten: Lage der parametrisierten Punkte in der Draufsicht der Brücke | **Fig. 7:** Parameterization of the bridge geometry; top: creation of the ruled surface through line geometry, below: position of parameterised points viewed from above

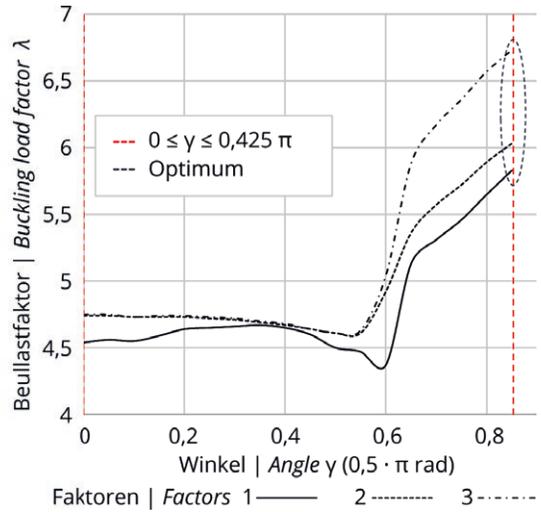
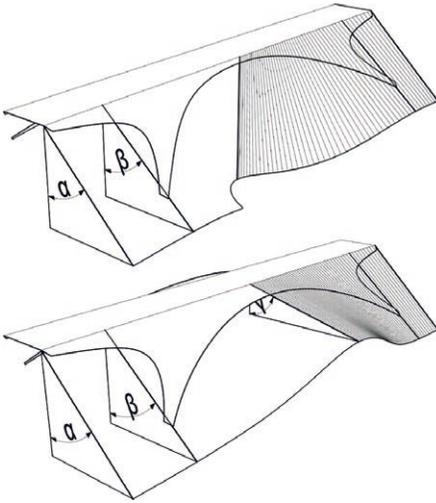


Bild 8: Brückengeometrie für $\gamma = 0$ (links oben) und $\gamma = 0,425 \cdot \pi$ (links unten) sowie Optimierung der Beullastfaktoren (rechts) | **Fig. 8:** Bridge geometry for $\gamma = 0$ (top left) and $\gamma = 0.425 \cdot \pi$ (bottom left) and optimisation regarding the buckling load factor (on the right)

minimiere $f_i = -\lambda_i(\gamma); i = 1, 2, 3$ (10)
 unter der Nebenbedingung

$$0 \leq \gamma \leq 0,425 \pi; \gamma \in \mathbb{R} \quad (11)$$

Rechts in Bild 8 sind die Werte der ersten drei Beullastfaktoren in Abhängigkeit vom Winkel γ dargestellt. Die optimalen Werte für alle drei Beullastfaktoren ergeben sich eindeutig für den maximalen Winkel γ . Diese Form bildet die Entwurfsbasis des Demonstrators.

Die Untersuchungen an der Schalenbrücke verdeutlichen, wie stark das Tragverhalten von Flächentragwerken mit der Form verbunden ist. Leichte Änderungen der Form zeigen bereits einen großen Einfluss auf die Weg- und Kraftgrößen (Verformungen bzw. Schnittgrößen) sowie auf das Stabilitätsverhalten (Beullastfaktor).

8 Konzeption und Herstellung von Schalungen mit Regelflächengeometrie (TU Berlin und TU Dresden)

Wie bereits in der Einführung beschrieben, liegt eine maßgebende Schwierigkeit bei doppelt gekrümmten Tragwerken in der aufwändigen,

jektive functions. Due to geometric constraints, the angle γ was limited to the range from 0 to $0.425 \cdot \pi$. The optimization problem is then:

minimize $f_i = -\lambda_i(\gamma); i = 1, 2, 3$ (10)

subject to $0 \leq \gamma \leq 0,425 \pi; \gamma \in \mathbb{R}$ (11)

On the right side of Fig. 8 the values of the first three buckling load factors are shown as a function of the angle γ . The optimum values for all three buckling load factors are clearly given for the maximum angle γ . This geometry is the basis for the design of the demonstrator.

The investigations on the shell bridge illustrate how strongly the structural behaviour of shell structures can be related to the shape. Slight changes in the shape already show a significant difference in the buckling load factors.

8 Design and fabrication of formwork with ruled surface geometry (TU Berlin and TU Dresden)

As already described in the introduction, a significant difficulty with double-curved structures

folglich kostenintensiven Herstellung der Schalung. Der Ansatz der Regelflächengeometrie ermöglicht es, geradlinige Schalungselemente zu verwenden und somit den Herstellungsaufwand zu verringern. Die im Antrag aufgeführte Herstellung aus Polystyrolschaum durch Heißdrahtschneiden und die damit verbundenen Fragen hinsichtlich der Schalungskonzeption wurden im Zuge des Forschungsprojektes untersucht. Im Folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse sowie einige offen gebliebene Fragen dargestellt.

Zunächst wird auf die verwendete Schneidemaschine und das verwendete Schalungsmaterial eingegangen. Zum Einsatz kam eine CNC-Portal-schneidemaschine, welche mit einem erhitzten Draht Hartschäume kraftlos schneidet. Dabei können die Drahtenden voneinander unabhängig in zwei parallelen Ebenen orthogonal zur Arbeitsfläche bewegt werden. Eine Drahtvorspannungsvorrichtung ermöglicht das Verändern der Drahtlänge während des Schnittvorganges und dadurch differierende Schnittwinkel. Als Schalungsmaterial kam extrudierter Polystyrol-Hartschaum (XPS) zum Einsatz. Erste Erfahrungen bei der Verwendung von XPS lagen aus einem zuvor an der TU Berlin durchgeführten Forschungsvorhaben zu Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG) [18] vor. In diesem Projekt wurden einfache Betonbauteile unter Verwendung von Schalungen aus Polystyrol hergestellt.

Bei der Konzeption der Schalung war das Ziel eine hohe Oberflächengüte der Schalungshaut bei möglichst geringem Arbeitsaufwand und Materialverbrauch. Im weiteren Verlauf stellten sich jedoch die Abmessungen der handelsüblichen XPS-Blöcke, die Anzahl der Elemente und die Anzahl der je Element benötigten Schnitte als entscheidende Faktoren für die Konzeption heraus. Aufgrund der praktischen Begrenzungen des Arbeitsbereiches sowie der Größe der XPS-Blöcke ergaben sich im Vergleich zum anfänglichen Schalungsentwurf zusätzliche Schalungsstöße, welche leider deutlich sichtbare Schalungsfugen auf der Betonoberfläche verursachten. Heißdrahtschneiden ermöglicht es im Gegensatz zu einer CNC-Fräse, größere Menge

is the complex and consequently cost-intensive production of the formwork. The ruled surface geometry approach makes it possible to use rectilinear formwork elements and thus reduce the manufacturing effort. The production from polystyrene foam by hot wire cutting as listed in the application and the associated questions regarding the formwork design have been investigated in the course of this research project. The obtained findings and questions that remained unanswered are presented below.

First, the cutting machine and the formwork material will be described. A CNC portal cutting machine was used, which cuts rigid foams without force using a heated wire. The wire ends can be moved independently of each other in two parallel planes, which are orthogonal to the worktop. A wire pretensioning device allows the wire length to be changed during the cutting process and thus allows for different cutting angles. Extruded polystyrene rigid foam (XPS) was used as formwork material. Initial experience with the use of XPS was gained from the research activities, previously carried out at the Technical University of Berlin on infra-light-weight concrete in multi-storey residential construction (INBIG) [18]. In this project, simple concrete components were produced using polystyrene formwork.

When designing the formwork, the aim was to achieve a high surface quality of the formwork with the lowest possible labour input and material consumption. In the further course, however, the dimensions of the commercially available XPS blocks, the number of elements and the number of cuts required per element turned out to be decisive factors for the design. Due to the practical limitations of the working area as well as the size of the XPS blocks, additional formwork joints compared to the initial formwork design had to be inserted, which unfortunately resulted in clearly visible formwork joints on the concrete surface. Hot wire cutting, in contrast to a CNC milling machine, allows larger amounts of material to be cut into the desired shape in less time. However, the disadvantage lies in the preparation of the cuts. In the setup used, the

an Material in kürzerer Zeit in die gewünschte Form zu bringen. Der Nachteil liegt allerdings in der Vorbereitung der Schnitte. Im genutzten Setup benötigte die korrekte Positionierung und Ausrichtung des Schnittgutes auf dem Arbeitstisch meist mehr Zeit als der tatsächliche Schnitt. Des Weiteren übertrugen sich prozessbedingt beim gleichen Element Fehler aus dem vorigen Schnitt in den folgenden. Damit bestimmt die Anzahl an Schnitten an einem Element maßgeblich die Genauigkeit sowie den Herstellungsaufwand. Die Abmessungen der XPS-Blöcke stellten sich als entscheidender Faktor für den Materialverbrauch heraus, da die Blöcke zunächst in die für die Bearbeitung benötigten Abmessungen gebracht werden mussten. Dadurch entstand bereits vor der eigentlichen Herstellung der Form ein hoher Verschnitt, welcher nur bedingt weiterverwendet werden konnte.

Während des Zusammensetzens der Schalung wurde beobachtet, dass aufgrund unzureichender Genauigkeit der Schnitte und daraus resultierender Höhensprünge und Lücken im Bereich der Schalungsstöße keine zufriedenstellende Betonoberfläche erreichbar war. Die Ursachen dafür können in der bereits erwähnten unpräzisen Positionierung und Ausrichtung des Materials auf dem Arbeitstisch sowie in der Übersetzung des CAD-Modells in Maschinensprache und der Kalibrierung der Schneidemaschine liegen. Zusätzlich wurde festgestellt, dass sich schmale Elemente durch den Schnitt verzogen haben und daher nicht mehr passgenau waren. Die Gründe dafür werden entweder in der Hitzeeinwirkung während des Schnittvorganges oder in möglichen, während der Herstellung in das Material eingebrachten Eigenspannungen vermutet.

Zusätzlich wurde eine nachträgliche Oberflächenbehandlung der Schalungshaut mit Zweikomponenten-Epoxidharz erprobt. Da sowohl der Arbeitsaufwand (v. a. wegen des Arbeitsschutzes) als auch der Zeitaufwand (lange Trockenzeit) zu groß für das nicht zufriedenstellende Ergebnis waren (Luftblasen in der Betonoberfläche), wurde für den letztendlichen Demonstrator eine Schalungsbahn aus Polypropylenfasern (FORMTEX®-SK) verwendet. Das Faservlies leitet

correct positioning and alignment of the material on the work table usually took more time than the actual cut. In addition, errors from the previous cut were propagated to the next cut on the same element due to the process. Thus, the number of cuts on an element significantly determines the accuracy as well as the manufacturing effort. The dimensions of the XPS blocks turned out to be a decisive factor for the material consumption, since the blocks first had to be brought to the dimensions required for processing. This resulted in a large amount of waste material before the actual production of the mould, waste which could only be reused to a limited extent.

During the assembly of the formwork, it was observed that a satisfactory concrete surface could not be achieved due to insufficient accuracy of the cuts and resulting height jumps and gaps in the area of the formwork joints. The reasons for this may be the aforementioned imprecise positioning and alignment of the material on the worktable, as well as the translation of the CAD model into machine language and the calibration of the cutting machine. In addition, narrow elements were found to be deformed by the cut and therefore no longer fit accurately. The reasons for this are suspected to be either the effect of heat impact during the cutting process or possible residual stresses introduced into the material during production.

In addition, a subsequent surface treatment of the formwork with two-component epoxy resin was tested. Since both, the amount of work (mainly due to occupational safety) and the time required (long drying time) were too great for the unsatisfactory result (air bubbles in the concrete surface), a formwork sheet made of polypropylene fibres (FORMTEX®-SK) was used for the final demonstrator. The fibre fleece drains excess water and air from the fresh concrete surface, thus ensuring a dense and uniform concrete surface [23].

Considering the above-mentioned advantages and disadvantages, the formwork production from extruded polystyrene foam proved to be

überschüssiges Wasser und Luft aus der Frischbetonoberfläche ab und sorgt somit für eine dichte und gleichmäßige Betonoberfläche [23].

Unter Betrachtung der genannten Vor- und Nachteile erwies sich die Schalungsherstellung aus Polystyrol-Extruderschaum als zweckmäßig, aber nicht zufriedenstellend. Hauptkriterien hierfür sind die Ungenauigkeiten im Schnittvorgang und die aufwändige Vorbereitung der Schnitte zum derzeitigen Zeitpunkt. Es ist durchaus möglich, dass der Einsatz eines Industriearms einen Teil der Probleme, etwa durch das mühsame Positionieren des Materials, reduziert hätte.

9 Demonstrator (TU Berlin und TU Dresden)

Aus den in Dresden gefertigten Schalungsteilen wurde eine formoptimierte Schalenbrücke aus Textilbeton im Labor der TU Berlin gebaut. Der Demonstrator verwendet an den Flanken windschiefe Regelfläche. Die Textilbetonschale überspannt 3 m bei Wanddicken von 5 bis 7 mm. Mit Hilfe dieses Demonstrators konnte das baupraktische Potential von Regelflächen für Schalentragwerke aus Beton verdeutlicht werden.

Für die Brücke wurde eine Feinbetonmischung aus Portlandzement und Quarzsanden (PAGEL®/TUDALIT®-Feinbeton TF10 [24]) mit Zu-

suitable, but not satisfactory. The main criteria for this are the inaccuracies in the cutting process and the time-consuming preparation of the cuts. It is quite possible that the use of an industrial robot can reduce some of the problems, such as the laborious positioning of the material.

9 Demonstrator (TU Berlin and TU Dresden)

A form-optimized shell bridge made of textile reinforced concrete was built in the laboratory of the TU Berlin from the formwork components manufactured in Dresden. The demonstrator uses skew ruled surfaces on the flanks. The concrete shell spans a length of 3 m with wall thicknesses of 5 to 7 mm. With this demonstrator, the practical construction potential of ruled surfaces for concrete shell structures could be illustrated.

A fine concrete mix of Portland cement and quartz sands (PAGEL®/TUDALIT®-Feinbeton TF10 [24]) with the addition of 14% water by weight was used for the bridge. The ready-mix contains a grain size of 0–1 mm, which is suitable for the used carbon fibre fabric (V.FRAAS SITgrid017 [25]). The fabric was easily adapted to the desired shape of the formwork, which was produced by hot wire cutting from extruded



Bild 9: Schalungselemente und Schalung für den Demonstrator | Fig. 9: Formwork for the shell bridge

gabe von 14 % Gewichtsanteilen Wasser verwendet. In der Fertigmischung ist eine Körnung von 0–1 mm enthalten, die für das verwendete Textilgelege aus Carbon (V.FRAAS SITgrid017 [25]) geeignet ist. Das textile Gelege ließ sich problemlos der gewünschten Form der Schalung anpassen. Die formgebende Schalung (Bild 9) wurde durch Heißdrahtschneiden aus Polystyrol-Extruderschäum (XPS) hergestellt (vgl. Abschnitt 8). Von einer Verarbeitung des Betons im Nassspritzverfahren wurde abgesehen, da Schäden auf der Schalungsoberfläche wegen der hohen Aufpralllast des Betons erwartet wurden. Deshalb wurde der Beton händisch im Laminierverfahren aufgebracht. Es wurden zwei Schichten Feinbeton verwendet, welche das zentrisch eingelegte textile Gelege umschlossen.

Der Demonstrator (Bild 10) ist zweifach symmetrisch und entlang der Flanken doppelt gekrümmt. An seinen vier Fußpunkten wird er auf Stahlkugeln gelenkig gelagert. Zusätzlich wird die Wanddicke des Querschnittes im Bereich der Auflagerpunkte vergrößert, um Spannungsspitzen zu vermindern. Um den Bogenschub der Brücke kurzzuschließen, wurde ein kleiner Rahmen aus Stahl gebaut.

10 Form- und Materialoptimierung von vorgespannten Schalen mit Regelflächengeometrie (TU Berlin)

Im Rahmen dieses Projektes wurde des Weiteren die Möglichkeit der Formoptimierung von Betonschalen mit Regelflächengeometrie für den Einsatz von Spanngliedern entlang der Erzeugenden untersucht [26]. Zuerst musste dafür die Zielfunktion, welche die gewünschte Optimierung bestmöglich erreicht, mathematisch definiert werden. Den größtmöglichen Effekt erreicht ein Spannglied, wenn die Zugspannungstrajektorien, welche überdrückt werden sollen, parallel zur Spanngliedachse verlaufen [27]. Mathematisch kann dies erreicht werden, wenn die Trajektorien der Hauptspannungen als stetige Funktionen entlang der betrachteten Regelfläche beschrieben werden können. An jedem Punkt entlang dieser Funktion können die

polystyrene foam (XPS) (cf. section 8 and Fig. 9). The concrete was not processed by wet spraying because damage to the formwork surface was expected due to the high impact load of the concrete. Therefore, the concrete was applied by hand using the lamination method. Two layers of fine concrete were used, which enclose the centrally positioned textile grid.

The demonstrator (Fig. 10) has two symmetry planes and is doubly curved along the flanks. At its four base points, it is supported on steel balls, which work as hinges. In addition, the wall thickness of the cross-section is increased in the area of the supports to reduce stress concentrations. To absorb the lateral thrust of the bridge, a small steel frame was built.

10 Shape and material optimization of prestressed shells with ruled surface geometry (TU Berlin)

This project also investigated the possibility of optimizing the shape of concrete shells with ruled surface geometry for the use of tendons along the generators [26]. First, the objective function, that best achieves the desired optimization had to be defined mathematically. A tendon achieves the greatest possible effect if the tensile stress trajectories, which are to be compressed, run parallel to the tendon axis



Bild 10: Fertiger Demonstrator, der auch bei der Konferenz Footbridge 2017 in Berlin präsentiert wurde | **Fig. 10:** Finished demonstrator, which was also presented at the Footbridge 2017 Conference in Berlin

Tangenten genommen und der Winkel dieser Tangenten zur nächsten Spanngliedachse bestimmt werden. Falls die Zielfunktion I definiert ist als Aufsummierung dieser berechneten Winkel, würde das Minimieren von I die optimale Form für die Vorspannung entlang der Erzeugenden wiedergeben. Dieses Prinzip zeigt Bild 11. Hier wird eine beliebige Regelfläche dargestellt, welche durch eine Leitkurve $\mathbf{c}(u)$ und eine Funktion $\mathbf{d}(u)$ für die Erzeugende erstellt wurde. Die Regelfläche kann durch eine lineare Kombination dieser beiden Funktionen beschrieben werden:

$$\mathbf{x}(u,v) = \mathbf{c}(u) + v\mathbf{d}(u) \tag{12}$$

Die Zugspannungstrajektorien werden im Bild 11 als blaue Kurven gekennzeichnet. Zur Berechnung der Richtungsabweichungen zwischen den Zugspannungstrajektorien und der dazugehörigen Erzeugenden muss der Hauptzugspannungsvektor $\Gamma(\mathbf{x}(u, v))$ bezüglich der Achse, welche durch $\mathbf{d}(u)$ definiert wird, bestimmt werden. Der resultierende Winkel $\Theta(u,v)$ kann darauffolgend durch den Arkuscosinus des Skalarproduktes der zwei Vektoren dividiert durch deren jeweilige Länge bestimmt werden (vgl. Bild 11).

Als Zielfunktion wird das Integral über die gesamte Regelfläche des Winkels θ definiert. Dadurch erlaubt die Minimierung dieser Zielfunktion das Erreichen der optimalen Form. Das Optimierungsproblem wird wie folgt definiert:

$$\text{minimiere } I = \iint_R \Theta(u,v) dR \tag{13}$$

wobei

$$\Theta(u,v) = \cos^{-1} \left(\frac{\Gamma(\mathbf{x}(u,v)) \cdot \mathbf{d}(u)}{\|\Gamma(\mathbf{x}(u,v))\| \|\mathbf{d}(u)\|} \right) \tag{14}$$

unter den Nebenbedingungen

$$u_0 \leq u \leq u_1 \tag{15}$$

$$v_0 \leq v \leq v_1; (u,v) \in \mathbb{R}^2 \tag{16}$$

[27]. Mathematically, this can be achieved if the trajectories of the principal stresses can be described as continuous functions along the ruled surface under consideration. At any point along this function, the tangents can be taken and the angle of these tangents to the nearest tendon axis can be determined. If the objective function I is defined as the summation of these calculated angles, minimizing I would return the optimal shape for the prestress along the generatrixes. This principle is shown in Fig. 11, where an arbitrary ruled surface is shown, which was created by a directrix $\mathbf{c}(u)$ and a function $\mathbf{d}(u)$ for the generatrix. The ruled surface can be described by a linear combination of these two functions:

$$\mathbf{x}(u,v) = \mathbf{c}(u) + v\mathbf{d}(u) \tag{12}$$

The tensile stress trajectories are shown in Fig. 11 as blue curves. To calculate the directional deviations between the tensile stress trajectories and the associated generatrix, the tangent of the stress function $\Gamma(\mathbf{x}(u, v))$ must be determined as the derivative with respect to the axis defined by $\mathbf{d}(u)$. The resulting angle $\Theta(u,v)$ can then be determined by the arc cosine of the scalar product of the two vectors divided by their respective lengths (see Fig. 11).

The integral over the entire control surface of the angle Θ is defined as the objective function. Thus, the minimization of this objective function allows the optimal shape to be obtained. The optimization problem is defined as follows:

$$\text{minimize } I = \iint_R \Theta(u,v) dR \tag{13}$$

with

$$\Theta(u,v) = \cos^{-1} \left(\frac{\Gamma(\mathbf{x}(u,v)) \cdot \mathbf{d}(u)}{\|\Gamma(\mathbf{x}(u,v))\| \|\mathbf{d}(u)\|} \right) \tag{14}$$

$$\text{subject to } u_0 \leq u \leq u_1 \tag{15}$$

$$v_0 \leq v \leq v_1; (u,v) \in \mathbb{R}^2 \tag{16}$$

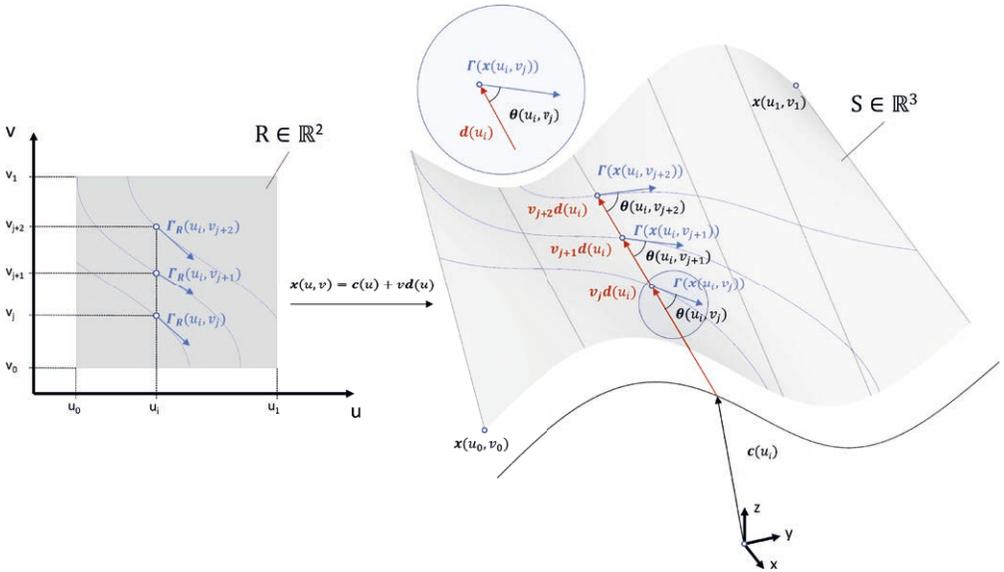


Bild 11: Herleitung des Winkels zwischen den Hauptspannungstrajektorien und den Erzeugenden der Regelfläche | **Fig. 11:** Derivation of angle between principal tensile stress trajectory and generatrix of an arbitrary ruled surface

Das Problem dieses Konzeptes liegt in der Schwierigkeit, die resultierenden Hauptspannungsvektoren bei einer gegebenen Last in der Schale analytisch zu beschreiben. Der im Folgenden vorgeschlagene Lösungsansatz für dieses Problem ist die Anwendung diskretisierter Analyse anstatt der Integration einer stetigen Funktion. Die diskretisierte Zielfunktion, welche den Winkel zwischen den Hauptzugspannungsvektoren und der Erzeugenden minimiert, kann dann wie folgt beschrieben werden:

The problem with this concept resides in the difficulty of analytically describing the principal tensile stress trajectories for a given load in the shell. The approach proposed below to solve this problem is to use a discretized analysis instead of integrating a continuous function. The discretized objective function, which minimizes the angle between the principal tensile stresses and the generatrix, can then be described as follows:

$$I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \cos^{-1} \left(\frac{\Gamma(\mathbf{x}(u_i, v_j)) \cdot \mathbf{d}(u_i)}{\|\Gamma(\mathbf{x}(u_i, v_j))\| \|\mathbf{d}(u_i)\|} \right) \Delta u \Delta v$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Theta_{i,j} \Delta u \Delta v \tag{17}$$

$$I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \cos^{-1} \left(\frac{\Gamma(\mathbf{x}(u_i, v_j)) \cdot \mathbf{d}(u_i)}{\|\Gamma(\mathbf{x}(u_i, v_j))\| \|\mathbf{d}(u_i)\|} \right) \Delta u \Delta v$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Theta_{i,j} \Delta u \Delta v \tag{17}$$

- Mit:
- $\Theta_{i,j}$ Winkel zwischen Hauptzugspannungsvektor $\Gamma(\mathbf{x}(u_i, v_j))$ und dazugehörige Richtungsvektoren der Erzeugenden $\mathbf{d}(u_i)$
 - Δu Diskrete Variation von u
 - Δv Diskrete Variation von v

- With:
- $\Theta_{i,j}$ Angle between principal tensile stress vector $\Gamma(\mathbf{x}(u_i, v_j))$ and corresponding direction vectors of the generatrix $\mathbf{d}(u_i)$
 - Δu Discrete variation of u
 - Δv Discrete variation of v

Um dieses Konzept zu verdeutlichen, wurde eine Reihe von Beispielen mit unterschiedlicher geometrischer Parametrisierung und Strukturmechanik untersucht. Eines dieser Beispiele basiert auf dem von Eduardo Torroja 1941 entworfenen Zarzuela Hippodrome [28]. Das globale System fungiert als Kragarm, allerdings ermöglicht es die Form der Schale, die Biegemomente in Membrankräfte umzuwandeln. Die Regelfläche des Beispiels fungiert als Kragarm mit ähnlichen Randbedingungen wie in [28]. Die in der Optimierung verwendete Geometrieparametrisierung ist in Bild 12 links dargestellt. Die Regelfläche ist definiert durch zwei Leitkurven c_1 und c_2 . Beide Kurven sind als Cosinus-Funktionen definiert. Diese sind in ihrer Länge, Höhe und Periode veränderlich. Damit wird eine Vielzahl an Formen ermöglicht. Die Auflager werden anschließend automatisch an den Punkten der maximalen und minimalen Höhenlage entlang c_1 generiert. Anschließend wurde eine Mehrzieloptimierung durchgeführt, in der Verformungsenergie, Beullastfaktoren und Abweichungswinkel als Zielfunktionen definiert wurden. Bild 12 rechts zeigt ein exemplarisches Ergebnis aus der Pareto-Front. Abschließend wurde eine Optimierungsroutine implementiert, welche die optimale Verteilung der Spannlieder für jede Lösung bestimmt.

To illustrate this concept, a number of examples with different geometric parameterization and structural mechanics were studied. One of these examples is based on the Zarzuela Hippodrome designed by Eduardo Torroja in 1941 [28]. The global system acts as a cantilever, however the shape of the shell allows the bending moment to be converted into membrane stresses. The ruled surface of the example (Fig. 12) has similar boundary conditions and acts also as a cantilever. The geometry parameterization used in the optimization is shown in Fig. 12 on the left. The ruled surface is defined by two directrix curves c_1 and c_2 . Both curves are defined as cosine functions. These are variable in their length, height and period. This allows for a wide variety of shapes. The supports are then automatically generated at the maximum and minimum height points along c_1 . Subsequently, a multi-objective optimization was performed in which deformation energy, buckling load factors and deviation angle were defined as objective functions. Fig. 12 on the right shows an exemplary result from the Pareto front. Finally, an optimization routine was implemented to determine the optimal distribution of tendons for each solution.

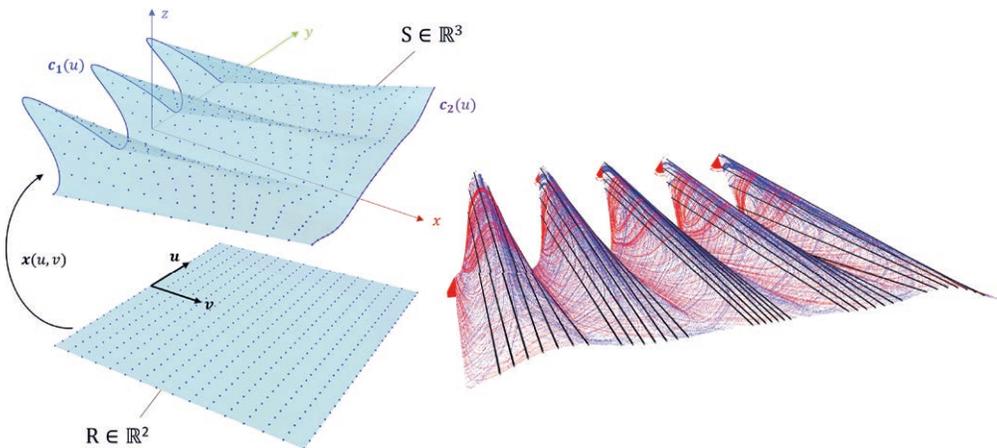


Bild 12: Geometrieerzeugung des Modells (links) und optimale Lösung mit Anordnung der geradlinigen Spannlieder (rechts) | **Fig. 12:** Generation of the model geometry (on the left) and optimal solution disposition of the linear tendons (on the right)

11 Fazit und Ausblick

Windschiefe Regelflächen weisen trotz ihrer Erzeugung aus Geraden eine doppelte Krümmung auf und ermöglichen eine vergleichsweise einfache Schalungsherstellung. Dadurch lassen sich die statischen Vorteile einer Schalentragwirkung mit einem relativ geringen Herstellungsaufwand verbinden.

Im Mittelpunkt des Entwurfs von dünnen Bauteilen aus Beton und insbesondere von Schalentragwerken steht die Formfindung. Klassische Formfindungsmethoden sind üblicherweise auf Tragwerke mit reiner Membranwirkung beschränkt. Da Bauteile mit Regelflächengeometrie i. d. R. keinen reinen Membranzustand aufweisen, ist für ihren Entwurf eine Ergänzung mittels der Methoden der Strukturoptimierung, insbesondere der Formoptimierung, vielversprechend.

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Verwendung eines liniengeometrischen Modells zur Formoptimierung von Betonbauteilen mit Regelflächengeometrie untersucht. Bei der Verwendung eines liniengeometrischen Modells kann der Vorteil genutzt werden, dass der Entwurfsraum auf Regelflächen eingeschränkt wird. Allerdings ist die Identifikation einzelner Punkte der Erzeugenden mit dem liniengeometrischen Modell nicht unmittelbar möglich. Deshalb muss die erzeugte Form in den euklidischen Raum übersetzt werden, um eine Tragwerksanalyse durchzuführen zu können. Somit wird klar, dass das liniengeometrische Modell nicht für den gesamten Optimierungsprozess verwendet werden kann.

Mit dem Ziel, dünnwandige Betonbauteile mit Regelflächengeometrie dennoch mittels der Verwendung des liniengeometrischen Modells zu optimieren, wurde im Jahr 2016 an der TU Berlin das Softwaremodul *GHtoSOFi* entwickelt. Anhand der Formoptimierung einer Schalenbrücke mit Regelflächengeometrie wurde das Potential des entwickelten Softwaremoduls gezeigt und eine kleine Schalenbrücke im Maßstab 1 : 6,7 aus Textilbeton als Demonstrator

11 Conclusion and outlook

Despite being generated from straight lines, skew ruled surfaces can exhibit a double curvature and allow comparatively simple formwork fabrication for concrete shells. This allows the combination of structural advantages of a shell structure with a relatively low manufacturing cost.

Form finding is the crux of the design of shell structures. Classical form-finding methods are usually limited to structures exhibiting a pure membrane state. Since structural elements with ruled surface geometry usually do not exhibit a pure membrane state, a supplementation to this method is necessary. Structural optimization methods, in particular shape optimization, is highly promising for the conceptual and structural design.

In this project, the use of a line geometric model for shape optimization of concrete components with ruled surface geometry was investigated. While using a line geometric model, the advantage can be used that the design space is restricted to ruled surfaces. However, the identification of individual points of the generators with the line geometric model is not possible directly. Therefore, the generated shape must be transformed into Euclidean space in order to perform structural analysis. Thus, it becomes clear that the line geometric model cannot be used for the entire optimization process.

With the aim of optimizing thin-walled concrete components with ruled surface geometry by using the line geometric model, the software module *GHtoSOFi* was developed at the TU Berlin in 2016. The potential of the developed software module was shown by shape optimizing a shell bridge with ruled surface geometry and then realizing a shell bridge prototype on a scale of 1 : 6.7 made of textile concrete as a demonstrator. Here, the formwork fabrication from polystyrene foam by hot wire cutting and the related issues regarding the formwork design were investigated. Although the formwork production for the demonstrator was successful,

realisiert. Hieran wurden die Schalungsherstellung aus Polystyrol-Schaum durch Heißdrahtschneiden und die damit verbundenen Fragen hinsichtlich der Schalungskonzeption untersucht. Obwohl die Schalungsherstellung für den Demonstrator erfolgreich war, haben sich einige Punkte ergeben, bei denen noch Verbesserungspotential besteht.

Die Untersuchungen in diesem Projekt zeigen, dass das liniengeometrische Modell für die Formoptimierung von Betonbauteilen mit Regelflächengeometrie geeignet ist und sich als gute Alternative zu konventionellen Ansätzen (z. B. CAGD- und FE-basierte) darstellt. Allerdings kann sich das liniengeometrische Modell gegenüber aktuellen Ansätzen (z. B. das isogeometrische Verfahren) als ineffizienter aufgrund des oben genannten Nachteils erweisen. Ein Vergleich beider Ansätze sollte im Rahmen zukünftiger Forschung untersucht werden.

Bei Betonbauteilen bringt eine Vorspannung durch eine Reduzierung der Rissbildung in den Zugzonen bedeutsame konstruktive und wirtschaftliche Vorteile. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Möglichkeit der Formoptimierung von Betonschalen mit Regelflächengeometrie für den Einsatz von Spanngliedern entlang der Erzeugenden untersucht. Ein mathematisches Modell wurde entwickelt, das als Zielfunktion verwendet werden kann. Exemplarische Bauteile wurden untersucht und nach dem entwickelten Ansatz optimiert. Die Ergebnisse zeigen ein großes Potential für den hier dargestellten und mögliche weitere Anwendungsbereiche, allerdings stellt der aktuelle Stand nur einen ersten Ansatz dar. Zukünftige Forschung sollte betrieben werden, um diesen weiterzuentwickeln.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198226551 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

few areas were identified where there is still potential for further improvement.

The investigations in this project show that the line geometric model is suitable for shape optimization of concrete members with ruled surface geometry and is a good alternative to conventional approaches (e.g. CAGD and FE-based). However, the line geometric model may prove to be inefficient compared to current approaches (e.g., the isogeometric method) due to the disadvantage mentioned above. A comparison of the two approaches should be carried out as part of future research.

In concrete shell structures, prestressing can lead to significant structural advantages by reducing cracking in the zones with tensile stresses. In this project, the possibility of optimizing the shape of concrete shells with ruled surface geometry for the use of tendons along the generatrices was investigated. A mathematical model was developed that can be used as an objective function. Exemplary structures were studied and optimized using the developed approach. The results show great potential for the application presented here and possible further applications, however, the current status represents only a preliminary approach. Future research has to be carried out in order to develop it further.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding project no. 198226551 within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Cassinello, P.; Schlaich, M.; Torroja, J. A.: Félix Candela. In memoriam (1910–1997). From thin concrete shells to the 21st century's lightweight structures. *Informes de la Construcción* 62 (2010), S. 5–26
- [2] Schlaich, M.: Von den dünnen Betonschalen Félix Candelas zu den leichten Flächentragwerke von heute. *Der Bauingenieur – VDI-Bautechnik-Jahresausgabe* 2011/2012 84 (2011) 9, S. 139–146
- [3] Franz, G.; Schäfer, K.: Kapitel 7: Schalen. in: *Konstruktionslehre des Stahlbetons, Band II: Tragwerke, Teil A: Typische Tragwerke*, Berlin et al.: Springer, 1988, S. 340–448
- [4] Osman-Letelier, J. P.; Goldack, A.; Schlaich, M.; Lordick, D.; Grave, J.: Shape optimization of concrete shells with ruled surface geometry using line geometry. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): *Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017*, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Book of Abstracts: S. 128, Langfassung auf USB-Stick: Beitrag Nr. 9199, 10 S.
- [5] Lordick, D.: Intuitive Design and Meshing of Non-Developable Ruled Surfaces. In: Gengnagel, C. (Hrsg.): *Proc. of the Design Modelling Symp. Berlin, 05.–07.10.2009* in Berlin, Berlin: Universität der Künste, 2009, S. 248–261
- [6] Pottmann, H.; Asper, A.; Hofer, M.; Kilian, A.: *Architekturgeometrie*. Wien · New York: Springer, 2010
- [7] Pottmann, H.; Wallner, J.: *Computational Line Geometry*. Berlin · Heidelberg: Springer, 2010
- [8] Lordick, D.; Klawitter, D.; Hagemann, M.: Liniengeometrie für den Leichtbau.“. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): *Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1*, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 224–235 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171646>.
- [9] Hennicke, J.: Vom Umgang mit leichten und weitspannbaren Flächentragwerken. In: Brinkmann, G. (Hrsg.): *Leicht und Weit. Zur Konstruktion weitgespannter Flächentragwerke*, DFG Sonderforschungsbereich, Stuttgart: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1990, S. 9–60
- [10] Bletzinger, K.-U.; Wüchner, R.; Daoud, F.; Camprubí, N.: Computational methods for form finding and optimization. *Computer methods in applied mechanics and engineering. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 194 (2005) 30–32, S. 3438–3452 – DOI: 10.1016/j.cma.2004.12.026
- [11] Kemmler, R.: Formfindung: Die Interaktion von Kraft und Geometrie. *Stahlbau* 81 (2012) 6, S. 476–480 – DOI: 10.1002/stab.201201564
- [12] Gebreiter, D.: Holistic "form finding" using shape optimisation. In: Schober, H. (Hrsg.): *Transparent Shells Form Topology Structure*, Berlin: Ernst & Sohn, 2015, S. 175–184
- [13] Bletzinger, K.-U.; Ramm, E.: Form Finding of Shells by Structural Optimization. *Engineering with Computers* 9 (1993), S. 27–35
- [14] Bletzinger, K.-U.; Ramm, E.: Computational form finding and optimization. In: Adriaenssens, S.; Block, P.; Veenendaal, D.; Williams, C. (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture. Form Finding and Optimization*, Kap. 5, Oxon · New York: Routledge, 2014, S. 45–55
- [15] Adriaenssens, S.; Block, P.; Veenendaal, D.; Williams, C. (Hrsg.): *Shell Structures for Architecture. Form Finding and Optimization*. Oxon · New York: Routledge, 2014
- [16] Kemmler, R.: *Stabilität und große Verschiebungen in der Topologie- und Formoptimierung*. Diss., Universität Stuttgart, 2004
- [17] Firl, M.: *Optimal Shape Design of Shell Structures*. Diss., TU München, 2010
- [18] Leibinger, R.; Schlaich, M.; Lösch, C.; Rieseberg, S.; Ballestrem, M.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG), gefördert von der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, TU Berlin, Berlin 2016
- [19] Spratt, K.; Ravani, B.: Kinematic Generation of Ruled Surfaces. *Adv. Comput. Math.* 17 (2002), S. 115–133 – DOI: 10.1023/A:1015211729988
- [20] Bottema, O.; Roth, B.: *Theoretical kinematics*. New York: Dover Publ., 1990
- [21] Noack, K.; Lordick, D.: Optimized Ruled Surfaces with an Application to Thin-Walled Concrete Shells. In: Cocchiarella, L. (Hrsg.): *ICGG 2018 – Proc. of the 18th Int. Conf. on Geometry and Graphics – 40th Anniversary*, 03.–07.08.2018 in Milan (Italy), *Advances in Intelligent Systems and Computing book series*, Springer Int. Publ., 2018, S. 338–349 – DOI: 10.1007/978-3-319-95588-9_27.
- [22] Weisstein, E. W.: "Dirichlet's Principle." From MathWorld, A Wolfram Web Resource: <https://mathworld.wolfram.com/DirichletsPrinciple.html> [Zugriff am | accessed on: 01.10.2020]
- [23] Schalvlies FORMTEX®-SK: <https://www.betomax.com/de/produkte/schalssystemtechnik/schalvlies/formtex-r-sk.html> [Zugriff am | accessed on: 01.10.2020]
- [24] P. S. B. G. & C. KG, „Technisches Merkblatt 0606 QS-Formblatt 09/16 Rev. 03“.
- [25] Datenblatt SITgrid017: <https://solutions-in-textile.com/file/sitgrid017-d.pdf> [Zugriff am | accessed on: 01.10.2017]
- [26] Osman-Letelier, J. P.; Goldack, A.; Schlaich, M.; Serrano, M.: Conceptual design of concrete shell bridges with ruled surface geometry. In: Adriaenssens S.; Mueller, C. (Hrsg.): *Creativity in Structural Design – Proc. of the IASS Symp. 2018*, 16.–20.07.2018 am MIT, Boston (USA), *Book of Abstracts*: S. 302, Langfassung auf USB-Stick: Beitrag Nr. 356, 8 S.
- [27] Leonhardt, F.: *Spannbeton für die Praxis*. Berlin: Wilhelm Ernst und Sohn, 1962

[28] Moragues, J. J.; Paya-Zaforteza, I.; Medina, O.; Adam, J. A.: Eduardo Torroja's Zarzuela Racecourse grandstand: Design, construction, evolution and critical assessment from the Structural Art. Engineering Structures 105 (2015), S. 186–196 – DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.10.008

[29] Pott, M.; Lordick, D.: Dual Spherical Energy Minimizer With Application To Smoothing Splines. In: Han, B.; Fan, H.; Lin, J.; Luo, X. (Hrsg.): Proc. of the 17th Int. Conf. on Geometry and Graphics, 04.–08.08.2016 in Beijing (China), Beijing Institute of Technology, 2016, Paper #131, S. 85–87 (book of abstracts), full paper: 9 S. (published digitally on a USB flash drive)

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1, 2, 7–12: TU Berlin
- Tabelle | Table 1: TU Berlin
- Bild | Picture 6 (Foto): Mike Schlaich
- Bilder | Pictures 3–5: TU Dresden; 3, 5: [29]

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Methoden und Werkzeuge für Entwurf und Herstellung schalenartiger und dünnwandiger Betonbauteile mit Regelflächengeometrie. Kurz: Dünnwandige Betonbauteile mit Regelflächengeometrie

Methods and tools for design and fabrication of shell-like and thin-walled concrete structures with line geometry. Short title: Thin-walled concrete structures with line geometry

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Daniel Lordick Leiter der Arbeitsgruppe Geometrische Modellierung und Visualisierung Head of the working group Geometric Modeling and Visualization
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	LO 1755/1-2 (Projektnummer Project number: 198226551)
Adresse Address:	Technische Universität Dresden, Institut für Geometrie, 01062 Dresden
Kontakt Contact:	+49 351 463 34193 daniel.lordick@tu-dresden.de https://tu-dresden.de/mn/math/geometrie/lordick
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.02.2015–31.01.2018 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 31.12.2019
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich Professor und Fachgebietsleiter Professor and head of department
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	SCHL 1901/9-2 (Projektnummer Project number: 198226551)
Adresse Address:	TU Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin
Kontakt Contact:	+49 30 314 72130 ek-massivbau@tu-berlin.de https://www.ek-massivbau.tu-berlin.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.07.2015–30.06.2018 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 31.12.2018
Team Team:	Juan Pablo Osman-Letelier (TU Berlin) Michael Pott (TU Dresden, 02/2015–06/2016) Kevin Noack (TU Dresden, 04/2017–09/2017) Martin Friedrich Eichenauer (TU Dresden, 10/2017–03/2019) Robert Päßler (TU Dresden, 10/2017–03/2019) Arndt Goldack (TU Berlin)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Pott, M.; Lordick, D.: Dual Spherical Energy Minimizer With Application To Smoothing Splines. In: Han, B.; Fan, H.; Lin, J.; Luo, X. (Hrsg.): Proc. of the 17th Int. Conf. on Geometry and Graphics, 04.–08.08.2016 in Beijing (China), 2016. Paper #131, 9 S. (published on USB flash drive), book of abstracts: S. 85–87
- Osman-Letelier, J. P.; Goldack, A.; Schlaich, M.; Lordick, D.; Grave., J.: Shape optimization of concrete shells with ruled surface geometry using line geometry. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Eds.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017, 25.–28.9.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, book of abstracts: p. 128, full paper published digitally: paper no. 9199, 10 S.
- Noack, K.; Eichenauer, M. F.; Lordick, D.: Geometrical Optimization of Interconnected Voids in Concrete Ceilings. In: Stojaković, V. (Hrsg.): Conf. Proc. of moNGeometrija 2018, 07.–09.06.2016 in Novi Sad (Serbien), 2018, S. 104–116
- Noack, K.; Lordick, D.: Optimized Ruled Surfaces with an Application to Thin-Walled Concrete Shells. In: Cocchiarella, L. (Hrsg.): ICGG 2018 – Proc. of the 18th Int. Conf. on Geometry and Graphics / 40th Anniversary, 03.–07.08.2018 in Mailand (Italien), Springer International Publ., 2018, S. 338–349
- Osman-Letelier, J. P.; Goldack, A.; Schlaich, M.; Serrano, M.: Conceptual design of concrete shell bridges with ruled surface geometry. In: Mueller, C.; Adriaenssens, S. (Hrsg.): Creativity in Structural Design – Proc. of the IASS Annual Symp. 2019, 16.–20.07.2018 am MIT, Boston (USA), 2018, paper no. 356, 8 S.
- Päßler, R.; Lordick, D.: Material Models of Ruled Surfaces as Witnesses to the Development of Mathematical Teaching. In: Cocchiarella, L. (Hrsg.): ICGG 2018 – Proc. of the 18th Int. Conf. on Geometry and Graphics / 40th Anniversary, 03.–07.08.2018 in Mailand (Italien), Springer International Publ., 2018, S. 2041–2050
- Lehrecke, J.; Osman-Letelier, J. P.; Schlaich, M.: Tendon Geometry Optimization Using Path Integrals. In: Lázaro, C.; Bletzinger, K.-U.; Oñate, E. (Hrsg.): Form and Force – Proc. of the IASS Annual Symp. 2019 / Structural Membranes 2019, 07.–10.10.2019 in Barcelona (Spanien), 2019, S. 2076–2083
- Osman-Letelier, J. P.; Hückler, A.; Schlaich, M.: Application of Prestressed CFRP Textiles for the Development of Thin-Walled Concrete Structural Elements. In: The Evolving Metropolis – Proc. of the 2019 IABSE Congress, 04.–06.09.2019 in New York City (USA), 2019, S. 102–109 – DOI: 10.2749/newyork.2019.0102
- Osman-Letelier, J. P.; Lehrecke, J.; Schlaich, M.: Structural Optimization of Prestressed Concrete Shells with Ruled Surface Geometry. In: Lázaro, C.; Bletzinger, K.-U.; Oñate, E. (Hrsg.): Form and Force – Proc. of the IASS Annual Symp. 2019 / Structural Membranes 2019, 07.–10.10.2019 in Barcelona (Spanien), 2019, S. 2622–2629

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Masterarbeiten | Master's Theses (TU Berlin)

- Grave, J.: Entwurf, Formoptimierung und Berechnung von Schalenträgerwerken mit Regelflächengeometrie. 2016
- Schämamm, A.: Untersuchung von vorgespannten Flächentragwerken aus Carbonbeton. 2016
- Freymann, K.: Optimierung der Form und Vorspannung von Flächentragwerken aus Carbonbeton. 2017
- Serrano, M.: Conceptual Design of a Concrete Shell Bridge with Ruled Surface Geometry. 2018
- Dombrowski, M.: Optimierung der Form und Vorspannung von doppelt gekrümmten Carbonbetondachschalen mit Regelflächengeometrie. 2019
- Lehrecke, J.: Structural Optimization of Prestressed Concrete Shells with Ruled Surface Geometry. 2019

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Die Forschung im SPP 1542 war ein Motor für die Beantragung eines weiteren Schwerpunktprogramms. Unter der Federführung von Prof. Mark (RUB) haben die Projektpartner Prof. Schlaich und Prof. Lordick am Einrichtungsantrag für das SPP „Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsverfahren – Präzisionsschnellbau der Zukunft“ mitgewirkt, der schließlich 2018 zur Einrichtung des SPP 2187 geführt hat. | The research in SPP 1542 was a driver for the application for another priority programme. Under the leadership of Prof. Mark (RUB), the project partners Prof. Schlaich and Prof. Lordick collaborated on the application for the establishment of the

SPP "Adaptive modular construction methods with flow manufacturing methods – precision rapid construction of the future", which finally led to the establishment of SPP 2187 in 2018.

- C3-V4.2: Vorgespannter Carbonbeton für Straßenbrücken und Flächentragwerke | Pre-stressed carbon concrete for road bridges and shell structures

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich (Verbundkoordinator)
Förderer Funding:	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) / Zwanzig20-Projekt Carbon Concrete Composite – C ³
Laufzeit Period:	01.05.2016–31.10.2019
Partner Partners:	7 Firmen und 1 Forschungseinrichtung
Webseite Website:	https://www.bauen-neu-denken.de/vorhaben/v4-2-vorgespannter-carbonbeton-fuer-strassenbruecken-und-flaechentragwerke/

- Schalungsfreie Fließfertigung adaptiver Tragstrukturen aus variablen Rahmenelementen | Adaptive concrete diamond construction (ACDC)

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Daniel Lordick, Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine (TU Dresden)
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 2187
Laufzeit Period:	01.01.2020–31.12.2022

- Untersuchungen zum Tragverhalten modularisierter Tragstrukturen aus nachträglich vorgespannten individuellen Carbonbetonbauteilen auf Basis von Trockenfugen und Computertomographie | Investigations on the bearing behavior of modularized structures of post-tensioned individual carbon concrete elements on the basis of dry joints and computeromography

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich, Prof. Dr.-Ing. Sven Simon (Universität Stuttgart)
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 2187
Laufzeit Period:	02/2021–02/2023

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation des SPP-Arbeitsgruppentreffens am 07./08.04.2016 am FG Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, TU Berlin | Organisation of the SPP working group meeting in April 2016 at TU Berlin
- Ausstellung der Demonstratorbrücke mit Regelflächengeometrie auf der internationalen Konferenz „Footbridge 2017“ in Berlin | Exhibition of the demonstrator bridge with ruled surface geometry at the international conference "Footbridge 2017" in Berlin
- Preis für den besten Beitrag im Bereich der Anwendung von Geometrie und Grafik auf der 6th Int. Conf. on Geometry and Graphics MONGEOMETRIJA 2018 für den Beitrag „Geometrical optimization of interconnected voids in concrete ceilings“, Juni 2018, Novi Sad (Serbien) | Best paper award in the field of application of geometry and graphics at the 6th Int. Conf. on Geometry and Graphics MONGEOMETRIJA 2018 for the paper entitled "Geometrical optimization of interconnected voids in concrete ceilings", June 2018, Novi Sad (Serbia)
- 2. Platz bei „Auf IT gebaut – Bauberufe mit Zukunft“ im Bereich Bauingenieurwesen für ein im Rahmen des SPP-Projekts entwickeltes Softwaremodul zur Optimierung vorgespannter Flächentragwerke aus Carbonbeton | 2nd place in "Built on IT – construction professions with a future" in the field of civil engineering for a software module developed within the framework of the SPP project for the optimisation of prestressed carbon reinforced concrete structures
- Int. Sommerschule "Line Geometry for Lightweight Structures", 10.-28.09.2019 an der TU Dresden mit 24 Teilnehmer*innen aus 10 Ländern, Abschlussausstellung der Ergebnisse und Videodokumentation | International Summer School "Line Geometry for Lightweight Structures", TU Dresden, 10.-28.09.2019 with 24 participants from 10 countries, final exhibition of the results and video documentation

Liniengeometrie für den Leichtbau | Line geometry for lightweight structures

- ▶ Daniel Lordick, Daniel Klawitter, Markus Hagemann
- ▶ Institut für Geometrie, TU Dresden

1 Einführung

Regelflächen, das sind durch die Bewegung von Geraden erzeugte Flächen, haben für den Betonleichtbau unter den Gesichtspunkten Statik und Herstellung herausragende Eigenschaften: Auch wenn sie doppelt gekrümmt sind, können sie geradlinig bewehrt oder vorgespannt werden. Außerdem kann die Schalung beispielsweise durch Heißdrahtschneiden aus Polystyrol-Hartschaum gewonnen werden. In gängigen CAD-Systemen ist die Klasse der Regelflächen bislang nicht angemessen repräsentiert und steht deshalb für die Bauteilgestaltung nur eingeschränkt zur Verfügung. *Liniengeometrie für den Leichtbau* liefert nun ein mathematisches Modell, das Regelflächen und auf sie wirkende Kräfte abbildet, und entwickelt daraus Formfindungswerkzeuge, die in einer vertrauten Entwurfsumgebung das Prinzip *form follows force* unterstützen.

Liniengeometrie für den Leichtbau führt zwei sehr gegensätzliche Themenfelder zusammen. Auf der einen Seite steht eine weit verzweigte, mathematische Theorie und auf der anderen Seite die Praxis des Bauens mit ihren konkreten Anforderungen.

Die Liniengeometrie ist ein Teilgebiet der Mathematik mit zahlreichen Anwendungen, beispielsweise in Optik und Robotik. Die Grundelemente der Liniengeometrie sind die Geraden. Das ist durchaus besonders, weil wir eigentlich gewohnt sind, unseren Anschauungsraum mithilfe des kartesischen Koordinatensystems als dreidimensionalen Punktraum zu begreifen. In

1 Introduction

Ruled surfaces, which are surfaces created by the movement of straight lines, have outstanding properties for lightweight concrete construction from the viewpoints of statics and production: even if they are double-curved, they can be reinforced or prestressed in a rectilinear fashion. In addition, the formwork can be obtained efficiently from rigid polystyrene foam by hot wire cutting, for example. In current CAD systems, the class of ruled surfaces has not yet been adequately implemented and is therefore only available to a limited extent for component design. This project *Line Geometry for Lightweight Structures* provides a mathematical model that represents ruled surfaces and the forces acting on them, and uses this to develop form finding tools that support the principle of *form follows force* in a familiar design environment.

Line Geometry for Lightweight Structures brings together two quite contrasting topics. On the one hand, there is a widely ramified mathematical theory and, on the other, the practice of building with its hands-on requirements.

Line geometry is a branch of mathematics with numerous applications, for example in optics and robotics. The basic elements of line geometry are straight lines. This is quite special because we are actually used to conceive our environment as a three-dimensional point space, which we can master with the help of Cartesian coordinates. In this familiar model, curves are created by the movement of points

diesem vertrauten Modell entstehen Kurven durch die Bewegung von Punkten und sind insofern eine einparametrische Schar der Grundelemente. Betrachtet man nun aber die Geraden als Grundelemente, so stellt man zunächst fest, dass die Mannigfaltigkeit aller Geraden des Anschauungsraumes nicht drei-, sondern vierdimensional ist. Das macht den Umgang mit Geraden ungleich schwerer und insbesondere das Entwerfen mit Regelflächen fordert die Vorstellungskraft stark heraus. Vierdimensional bedeutet: Um eine Gerade im Raum festlegen zu können, sind vier Werte nötig. Legt man zunächst mit zwei Koordinaten einen Punkt in der Grundrissebene fest, so braucht man darüber hinaus noch zwei Winkel. Anschaulich gesprochen sind das die Richtung im Grundriss (Azimut) und der Neigungswinkel (Elevation). Alternativ kann man auch den Schnitt der Geraden mit einer weiteren Ebene angeben, wofür aber ebenfalls zwei Werte benötigt werden.

Damit die Geraden einem eleganten Kalkül zugänglich werden, gibt es verschiedene Methoden, die Geraden als Elemente in einem höherdimensionalen Modellraum zu interpretieren. Jeder Punkt im höherdimensionalen Modell repräsentiert dann eine Gerade und jede Kurve entspricht einer Regelfläche. Auf diesem theoretischen Fundament behandeln wir in *Liniengeometrie für den Leichtbau* Regelflächen so ähnlich wie NURBS-Kurven in CAD-Programmen: Es greifen nun Interpolations- und Relaxationsalgorithmen.

Ein ökonomischer Leichtbau, und hier insbesondere der Leichtbau mit Beton, erfordert geschickte Bauteilformen, um Lasten mit einem effektiven Materialeinsatz abzutragen. Soll nun die Liniengeometrie dem Leichtbau dienen und somit die Vorteile der Regelflächen bei der Herstellung von Bauteilen verfügbar machen, muss die Liniengeometrie auch Kräfte und Lastfälle in den Modellraum übertragen und dort behandeln. Die Verknüpfung gewährleistet, dass während des Formfindungsprozesses die Klasse der Regelflächen nicht verlassen wird. In diesem Zusammenhang ist eine hilfreiche Eigenschaft unserer Herangehensweise, dass nicht nur ein-

and are therefore a one-parametric set of basic elements. But if we now consider the straight lines as basic elements, we first notice that the manifold of all straight lines of the Euclidean space is not three-dimensional, but four-dimensional. This makes the handling of straight lines much more difficult and especially the design with ruled surfaces challenges the imagination. Four-dimensional means: In order to define a straight line in space, four values are necessary. To give an example, if you first define a point in the floor plan with two coordinates, you also need two angles. These are the horizontal direction (azimuth) and the angle of inclination (altitude). Alternatively, you can also specify the intersection of the line with another plane, which still requires two values.

In order to make the lines accessible to an elegant calculus, there are different methods to interpret the lines as elements in a higher dimensional model space. Each point in the higher dimensional model then represents a straight line and each curve corresponds to a ruled surface. On this theoretical foundation, in *Line Geometry for Lightweight Structures* we treat ruled surfaces much like NURBS curves in CAD programs: interpolation and relaxation algorithms can now be used.

Economical lightweight construction, and in particular lightweight construction with concrete, requires sophisticated component shapes in order to transfer loads with an effective use of materials. If the line geometry is to serve lightweight construction and thus make the advantages of ruled surfaces available in the manufacture of components, the line geometry must also transfer forces and load cases to the model space and treat them there. The coupling ensures that the class of ruled surfaces is not left during the form finding process. In this context, a helpful feature of our approach is that not only simple forces but also moments can be covered in a natural way.

We report, after a short summary of examples of ruled surfaces in civil engineering and their implementation in CAD software, which strat-

fache Kräfte, sondern auch Momente auf natürliche Weise mit erfasst werden können.

Wir berichten, nach einem kurzen Abriss zur Anwendung von Regelflächen im Bauwesen und deren Implementierung in CAD-Software, welche Strategien wir verfolgt haben, um die Liniengeometrie im Sinne des Leichtbaus nutzbar zu machen. Wir geben einen Überblick über die bisherigen Resultate und skizzieren, in welche Richtung die ausgebreiteten Konzepte weiterentwickelt werden sollen. Außerdem geben exemplarische Ergebnisse aus einem Modellierungskurs mit Studierenden der Architektur einen Einblick in die grundsätzlichen Herausforderungen beim Transfer des hier akkumulierten Wissens und regen insofern künftige Aufgaben an.

2 Regelflächen im Bauwesen

Unter dem Blickwinkel Herstellung und Statik zerfällt die Klasse der Regelflächen in zwei wesentliche Arten. Zur einen Art, den abwickelbaren Regelflächen, gehören die Zylinder, Kegel und Torsen. Das sind Flächen mit durchgängig verschwindender Gaußscher Krümmung (einfach gekrümmte Flächen), die aus ebenem Baumaterial, z. B. Blech, durch einfaches Biegen hergestellt werden können. Die andere Art sind die windschiefen Regelflächen mit im Wesentlichen negativer Gaußscher Krümmung (gegenständig doppelt gekrümmte Flächen), die durch ihre Krümmung günstige statische Eigenschaften aufweisen. *Liniengeometrie für den Leichtbau* befasst sich mit letzteren, weil Beton für das Herstellen doppelt gekrümmter Bauteile in besonderer Weise geeignet ist und derartige Konstruktionen auch bei geringer Materialstärke überdurchschnittlich leistungsfähig sind.

Die gebräuchlichsten windschiefen Regelflächen im Bauwesen sind die algebraischen Regelflächen 2. Ordnung, die sogenannten Reguli, namentlich das hyperbolische Paraboloid (HP-Fläche) und das einschalige Hyperboloid. Die Besonderheit der Reguli ist, dass auf ihnen zwei Scharen von Geraden liegen, sie also in dop-

gies we have followed to make line geometry usable in the sense of lightweight construction. We give an overview of the results obtained so far and outline the direction in which the presented concepts will be further developed. In addition, exemplary results from a modeling course with students of architecture give an insight into the fundamental challenges in transferring the knowledge accumulated here and in this respect stimulate future tasks.

2 Ruled surfaces in construction

From the viewpoint of production and statics, the class of ruled surfaces is divided into two main types. The cylinders, cones and torsos belong to the first type, the developable surfaces. These are surfaces with zero Gaussian curvature, which can be produced from flat building material, e.g. sheet metal, by simple bending. The other type are the skew ruled surfaces with essentially negative Gaussian curvature (doubly curved surfaces with hyperbolic points), which have favorable static properties due to their curvature. *Line Geometry for Lightweight Structures* deals with the latter, because concrete is particularly suitable for the production of doubly curved components and such structures have above-average performance even with low material thickness.

The most common skew ruled surfaces in civil engineering are the algebraic ruled surfaces of 2nd order, the so-called reguli, namely the hyperbolic paraboloid and the one-sheet hyperboloid. The peculiarity of the reguli is that they contain two sets of mutually skew lines, which makes them doubly ruled surfaces. One-sheet hyperboloids of revolution have been known since the designs of the Russian engineer Vladimir Shukhov (1853–1939) as extremely efficient forms for large structures and often serve as the basic form for cooling towers, e.g. Beckh [1]. Antoni Gaudí (1852–1926) used reguli extensively as a design feature in the Sagrada Família, Burry [2] (Fig. 1). As thin concrete shells, hyperbolic paraboloids in particular were made famous by Félix Candela (1910–1997). Likewise,



Bild 1: Durch Geraden erzeugte Regelflächen im Modell, Museum in der Sagrada Família, Barcelona | **Fig. 1:** Examples of ruled surfaces as scale models, museum in the Sagrada Família, Barcelona

pelter Hinsicht Regelflächen sind. Einschlige Drehhyperboloide sind seit den Konstruktionen des russischen Ingenieurs Wladimir Schuchow (1853–1939) als extrem wirtschaftliche Bauformen für große Bauwerke bekannt und dienen vielfach als Grundform für Kühltürme, z. B. Beckh [1]. Antoni Gaudí (1852–1926) hat Reguli als Gestaltungsmittel umfangreich in der Sagrada Família eingesetzt, Burry [2] (Bild 1). Als dünne Betonschalen wurden insbesondere die HP-Flächen durch Félix Candela (1910–1997) berühmt. Ebenso haben aber auch Anton Tedesko (1903–1994), Eduardo Catalono (1917–2010), Ulrich Müther (1934–2007) und viele andere HP-Flächen verwendet, siehe z. B. Heinle/Schlaich [3] oder Dechau [4]. Als vorgefertigte Bauteile sind die Hyperboloidschalen von Wilhelm Silberkuhl (1912–1984) bekannt geworden, bei denen Vorspannung zur Anwendung kam, Rupper et al. [5]. Ein besonderes Beispiel für die Anwendung von Reguli ist das Panorama-Bauwerk Bad Frankenhausen, bei dem sowohl die Wände als auch das Dach aus HP-Schalensegmenten errichtet wurden, Müller/Kokott [6].

Das internationale Symposium Shell Pioneers, 2012 durchgeführt am Fachgebiet von Prof. Mike Schlaich (TU Berlin), förderte weitere, kaum populäre, doch nicht minder spektakuläre Beispiele aus dem europäischen Ausland zu Tage [7]. Auch jenseits von HP-Fläche und Drehhyperboloid sind die Vielseitigkeit der Betonschalenskonstruktionen und ihr verhältnismäßig geringer Baustoffverbrauch unbestritten. Jedoch führt insbesondere der hohe Arbeitsaufwand bei der

Anton Tedesko (1903–1994), Eduardo Catalono (1917–2010), Ulrich Müther (1934–2007) and many others have used hyperbolic paraboloids, see e.g. Heinle & Schlaich [3] or Dechau [4]. The hyperboloid shells of Wilhelm Silberkuhl (1912–1984) have become known as prefabricated components, where prestressing was applied, Rupper et al. [5]. A special example for the application of reguli is the panorama structure Bad Frankenhausen, where both the walls and the roof were built of shell segments from hyperbolic paraboloids, Müller & Kokott [6].

The international symposium Shell Pioneers, organized in 2012 by the department of Prof. Mike Schlaich (TU Berlin), brought to light further hardly popular but no less spectacular examples from other European countries [7]. Even beyond hyperbolic paraboloids and hyperboloids of revolution, the versatility of concrete shell structures and their relatively low consumption of building materials are undisputed. However, especially the high labor input during fabrication leads to the fact that they are hardly built today, Schlaich [8]. Obviously, the challenge is to manufacture the formwork for double-curved shells economically. This is indeed the reason why we restrict ourselves to the class of ruled surfaces: for this surface class the formwork elements can be obtained straightforwardly by hot wire cutting from extruded polystyrene.

Ruled surfaces that are not reguli are relatively rare in civil engineering. Conoids, where the

Herstellung dazu, dass sie heute kaum mehr gebaut werden, Schlaich [8]. Offensichtlich ist eine zentrale Aufgabe, die Schalung für doppelt gekrümmte Schalen wirtschaftlich in den Griff zu bekommen. Das ist auch der Grund, warum wir uns auf die Klasse der Regelflächen beschränken. Schließlich können in diesem Fall die Schalungselemente relativ unkompliziert durch Heißdrahtschneiden aus extrudiertem Polystyrol gewonnen werden.

Regelflächen, die keine Reguli sind, kommen im Bauwesen relativ selten vor. Konoide, bei denen die Erzeugenden zu einer Richtebene parallel sind (das gilt auch für HP-Flächen), treten dabei noch am häufigsten auf. Die Untersicht von massiven Wendeltreppen ist oft als Wendelfläche ausgeführt, obwohl auch schiefe Schraubregelflächen anzutreffen sind. Antoni Gaudí hat darüber hinaus solche Konoide verwendet, die eine Sinuskurve als Leitkurve besitzen. In neuerer Zeit finden sogar allgemeine windschiefe Regelflächen Anwendung, unter anderem im Werk von Zaha Hadid (1950–2016), Flöry/Pottmann [9]. Im Übrigen ist aber das Gestaltungspotential der Regelflächen noch bei weitem nicht ausgeschöpft. Das liegt unter anderem daran, dass Regelflächen in aktuellen CAD-Programmen nicht strukturiert gehandhabt werden können. Wesentliche konstruktive Eigenschaften sind nur auf Umwegen erreichbar, der Einsatz von Regelflächen im Entwurf somit mühsam.

3 Standard-Implementierung von Regelflächen in CAD-Software

Regelflächen treten in CAD-Software als eine Untergruppe der NURBS-Flächen auf. Sind beispielsweise für eine Loft-Fläche nur zwei Profilkurven vorgegeben, so werden diese linear verbunden und man erhält eine NURBS-Fläche, deren Parameterkurven in einer Richtung Geradenstücke sind. Es handelt sich bei einer derartigen NURBS-Fläche somit um einen Ausschnitt einer Regelfläche. Die Erzeugenden der Regelfläche, also die Geraden, verbinden immer einander entsprechende Parameterpunkte auf den Profilkurven. Diese Zuordnung ist aber weitge-

generators are parallel to a common plane (this also applies to hyperbolic paraboloids), still occur most frequently. The soffit of massive spiral staircases is often designed as a helicoid, although oblique helical surfaces are also encountered. Antoni Gaudí also used such conoids, which have a sinusoidal curve as a guiding curve. In more recent times, even general skew ruled surfaces are used, among others in the work of Zaha Hadid (1950–2016), Flöry & Pottmann [9]. In all other respects, however, the design potential of ruled surfaces is far from being explored to the full. This is partly due to the fact that ruled surfaces cannot be handled in a structured way in current CAD programs. Essential design properties can only be achieved by detours, and the use of ruled surfaces in design is therefore laborious.

3 Standard implementation of ruled surfaces in CAD software

In typical CAD software, ruled surfaces appear as a subset of NURBS surfaces. If, for example, only two profile curves are specified for a loft surface, these are connected linearly and a NURBS surface is obtained whose isocurves in one direction are straight line segments. Such a NURBS surface is thus a section of a ruled surface. The generators of the ruled surface, which are the lines, always connect corresponding parameter points on the profile curves. However, this assignment is rather arbitrary, depends only on the parameterization of the profile curves and is usually beyond the control of the user. It typically requires additional processing to obtain the desired ruled surface. In fact, it must be made clear here that a ruled surface is only unambiguously determined by three curves (Fig. 2 and Pottmann/Wallner [10]).

In the case of the Kilden Performing Arts Centre in Kristiansand (Fig. 3), for example, the design goal was to create a conoidal surface. In the front view, the generators, materialized as wooden strips, were to appear parallel to each other. However, the architects' geometric

hend willkürlich, hängt nur von der Parametrisierung der Profilkurven ab und entzieht sich zunächst der Kontrolle der Benutzenden. Es bedarf typischerweise einer zusätzlichen Bearbeitung, um die gewünschte Regelfläche zu erhalten. Allgemein gilt nämlich, dass erst durch drei Kurven eine Regelfläche eindeutig bestimmt ist (Bild 2 und Pottmann/Wallner [10]).

Beim Kilden Theater- und Konzerthaus in Kristiansand (Bild 3) war beispielsweise das Entwurfsziel, eine konoidale Fläche zu erzeugen. In der Frontansicht sollten die Erzeugenden, als Holzleisten materialisiert, zueinander parallel erscheinen. Das leistete aber das geometrische Modell der Architekten zunächst nicht und es wurde erst erreicht, indem nachträglich die Parametrisierung der Randkurven manipuliert wurde (Bild 4). Diese Aufgabe war also dem digitalen Entwurf nachgeordnet und wurde von der auf Geometriemodellierung spezialisierten Firma Design-to-Production durchgeführt, Scheurer [12].

Dieser Ablauf bei der Formfindung und Realisierung ist in gewisser Weise typisch, aber keineswegs zufriedenstellend! Wir wollen die geometrische und statische Optimierung in

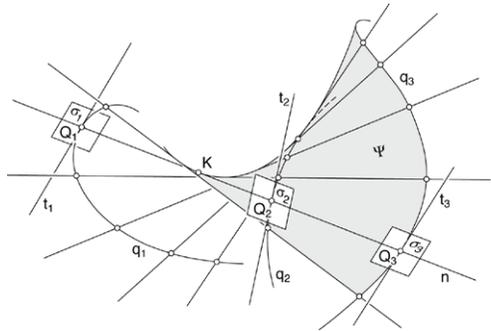


Bild 2: Festlegung einer Regelfläche durch die Treffgeraden zu drei Kurven q_1 , q_2 und q_3 | Fig. 2: Definition of a ruled surface by three curves q_1 , q_2 , and q_3

model did not initially achieve this, and it was only achieved by subsequently manipulating the parameterization of the boundary curves (Fig. 4). This task was thus subordinate to the digital design and was carried out by the company Design-to-Production, Scheurer [12], which specialized in geometric modeling.

This procedure in form finding and realization is typical in a certain way, but by no means satisfactory! We want to integrate the geometric and static optimization in the form finding and thus



Bild 3: Kilden Theater- und Konzerthaus in Kristiansand bei Nacht | Fig. 3: Kilden Performing Arts Centre in Kristiansand at night

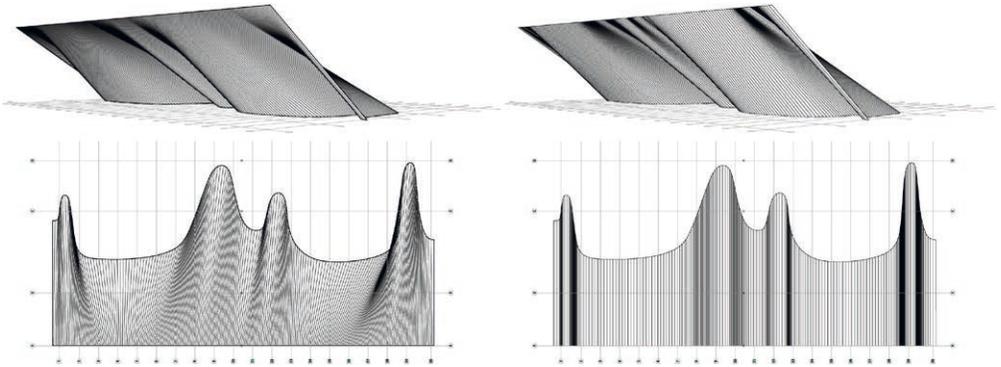


Bild 4: Fassade des Kilden Theater- und Konzerthauses, ALA Architects; links: NURBS-Entwurf, rechts: konoidale Fläche | **Fig. 4:** Kilden Performing Arts Centre facade, ALA Architects; left: NURBS design, right: conoidal surface

die Formfindung einbeziehen und so zu einer grundsätzlichen Verbesserung beim Entwerfen mit Regelflächen beitragen.

contribute to a fundamental improvement in designing with ruled surfaces.

4 Liniengeometrische Modelle

Liniengeometrie für den Leichtbau stellt dem Konzept der NURBS-Flächen eine neue und – in Bezug auf windschiefe Regelflächen – artgerechte Berechnungsmethode zur Seite. Das Grundprinzip ist, die Menge aller Geraden des Anschauungsraums in einem höherdimensionalen Modellraum zu behandeln. Die Projektmitarbeiter Markus Hagemann und Daniel Klawitter haben insbesondere zwei bekannte liniengeometrische Modelle auf ihre Tauglichkeit für die Anwendung im Leichtbau näher untersucht, das *Plückersche Geradenmodell* und die *Dualsphäre*.

Das Plückersche Geradenmodell ist eingebettet in einen projektiven, fünfdimensionalen Raum, in dem alle Geraden des dreidimensionalen Raumes als Punkte auf der sogenannten Klein-Quadrik liegen. Die Besonderheit des Modells liegt in seiner Vollständigkeit. So sind Ferngeraden in dieses Modell in natürlicher Weise integriert. Das Parallelenaxiom ist außer Kraft: Irgend zwei verschiedene Geraden haben entweder einen Schnittpunkt oder sind windschief. Liniengeometrische Zusammenhänge können sehr gut mit Hilfe der durch die Klein-Quadrik

4 Models of line space

Line Geometry for Lightweight Structures expands the concept of NURBS surfaces with a new and – with respect especially to skew ruled surfaces – appropriate computational method. The basic idea is to treat the manifold of all straight lines of the three-dimensional space in a higher-dimensional model space. The project team members Markus Hagemann and Daniel Klawitter have examined in particular two well-known models of line space with respect to their suitability for the application in lightweight construction, the *Klein model* and the *Study sphere*.

Lines can be computed homogeneously with the help of so-called Plücker coordinates. Those coordinates can be interpreted as points in a projective, five-dimensional space, in which then all lines of the three-dimensional space lie as points on the so-called Klein quadric. The special feature of this model is its completeness: thus, objects at infinity are integrated into model in a natural way. The parallel axiom is out of force: any two different straight lines either have an intersection point or are skew. Relations within line space can be explained very well with the help of the polarity induced by the Klein quadric. All this makes the Plücker

induzierten Polarität erklärt werden. All das macht das Plückersche Geradenmodell aus mathematischer Sicht elegant. Für ingenieurspezifische Fragestellungen werden Fernelemente und die projektive Sichtweise im Allgemeinen jedoch nicht benötigt.

Ein weiteres Modell ist die Dualsphäre. Ausgangspunkt sind die dualen Quaternionen zur Beschreibung von Bewegungen im Raum (allgemein: Schraubungen). Durch Einschränkung auf Drehungen um 180° erhält man die sogenannten liniensymmetrischen Bewegungen. Die dualen Quaternionen vereinfachen sich in diesem Fall entscheidend und erfüllen die Dualsphäre, die damit wiederum als eine Einbettung der Geraden des dreidimensionalen Raumes in das Bewegungsmodell angesehen werden kann. Während das Attribut dual auf die zu Grunde liegende algebraische Struktur der dualen Zahlen zurückzuführen ist, ist der Begriff der Sphäre durch eine Normierungsbedingung geprägt. In der Tat können also Geraden als Punkte auf einer zweidimensionalen Sphäre im dreidimensionalen Modul über dem Ring der dualen Zahlen angesehen werden.

Die Dualsphäre hat zwar den Nachteil, Fernelemente nicht erfassen zu können, aber den für das Bauwesen entscheidenden Vorteil, dass eine Norm induziert wird. Diese Norm ist eine duale Zahl und beinhaltet den Abstand und den Winkel zwischen zwei Geraden. Diese Eigenschaft ist vor allem aus Sicht der zu behandelnden Optimierungsaufgaben wichtig. Außerdem bietet die Korrespondenz des Modells mit der Darstellung von Bewegungen als duale Quaternionen die Möglichkeit, bereits bekannte Erkenntnisse aus der Kinematik auf Geraden zu übertragen. Faktisch ist es mit diesem Kalkül sehr einfach möglich, Geraden im Raum gezielt zu bewegen.

Eine willkommene Eigenschaft der Dualsphäre ist, dass jede Geodätische, das heißt die kürzeste Verbindung zweier Punkte im Punktmodell, immer genau einer Wendelfläche im dreidimensionalen Raum entspricht. Nun sind die Wendelflächen bekanntermaßen die einzigen

coordinates elegant from a mathematical point of view. For engineering specific problems, however, objects at infinity and the projective view are generally not needed.

Another model is the dual unit sphere (Study sphere). Starting point are the dual quaternions for the description of movements in space (in general: screw motions). By the restriction to rotations of 180° one obtains the so-called line-symmetric motions. In this case the dual quaternions simplify decisively and fulfill the dual unit sphere, which in turn can be seen as an embedding of the lines of the three-dimensional space into the motion model. While the attribute dual is due to the underlying algebraic structure of the dual numbers, the notion of sphere is characterized by a normalization condition. So, in fact, straight lines can be regarded as points on a two-dimensional sphere in the three-dimensional module over the ring of dual numbers.

Although the Study sphere has the disadvantage of not being able to capture elements at infinity, it has the significant advantage for civil engineering that a norm is induced. This norm is a dual number and contains the distance and the angle between two straight lines. This property is especially relevant for the optimization tasks to be treated. Moreover, the correspondence of the model with the representation of motions as dual quaternions offers the ability to transfer already known knowledge from kinematics to straight lines. In fact, with this calculus it is very easy to control the movement of straight lines in space.

A convenient property of the Study sphere is that every geodesic, i.e. the shortest connection of two points in the point model, always corresponds to a helical surface in three-dimensional space. Now, as is well known, the helical surfaces are the only ruled surfaces that are also minimal surfaces. Obviously, the model of the Study sphere harmonizes with the goals of lightweight construction, because in a quite natural way such surfaces are preferred, which have minimal surface area and thus bring material savings. For the above reasons, we have focused on the line-geometric model of the dual

Regelflächen, die zugleich Minimalflächen sind. Offensichtlich harmoniert also das Modell der Dualsphäre mit den Zielen des Leichtbaus, weil in organischer Weise solche Flächen bevorzugt werden, die minimalen Flächeninhalt haben und damit Materialersparnis bringen. Aus den genannten Gründen haben wir uns auf das liniengeometrische Modell der Dualsphäre konzentriert und es für die Belange des Entwurfs im Leichtbau ausgearbeitet. Im Zuge dieser Arbeit und zum Teil deutlich über die ursprünglichen Intentionen des Projektes hinaus sind mathematische Grundlagen geschaffen worden, die unsere Ergebnisse in einen wesentlich größeren theoretischen Kontext einbetten, Klawitter [13].

4.1 Interpolationsalgorithmen für Regelflächen

Zunächst wurde die Erzeugung von Regelflächen aus einer Schar vorgegebener Geraden untersucht, Hagemann/Klawitter [14]. Die Geraden sind Punkte auf der Dualsphäre und die gesuchte Regelfläche eine Kurve, die diese Punkte interpoliert. Dieser Zugang unterscheidet sich grundsätzlich von der NURBS-Technologie im Euklidischen Modell, kann aber durch eine analoge Betrachtung erschlossen werden. Der große Vorteil ist, dass Regelflächen definierbarer Güte entstehen.

Mit dem Übertragungsprinzip von Bewegungen und im Zusammenspiel mit der Definition eines Teilverhältnisses konnten verschiedene Subdivisionsalgorithmen konstruiert werden, die etablierte Konzepte etwa von Aitken, de Casteljau, und Bézier unter Beachtung der Gruppenstruktur auf der Dualsphäre adaptieren (Bild 5). Die Besonderheit bei diesem Zugang liegt in der direkten Verarbeitung der vorgegebenen diskreten Geradenmenge. Spezifisch liniengeometrische Größen, wie der Drall, können nun direkt in den Algorithmus integriert werden. Der Benutzer kann durch einzelne Geraden den Interpolationsalgorithmus steuern und die Regelfläche letztlich so manipulieren, wie er durch Steuerpunkte einen Spline manipuliert. Übliche Interpolationsalgorithmen basieren auf dem Konzept der Hermite-Interpolation und

unit sphere and elaborated it for the needs of lightweight design. In the course of this work, and in part well beyond the primary intentions of the project, mathematical foundations have been established that embed our results in a much larger theoretical context, Klawitter [13].

4.1 Interpolation algorithms for ruled surfaces

First, the generation of ruled surfaces from a set of given straight lines was investigated, Hagemann/Klawitter [14]. The lines are points on the Study sphere and the ruled surface aimed for is a curve interpolating these points. This approach differs fundamentally from the NURBS technology in the Euclidian model, but can be developed by an analogous consideration. The great advantage is that ruled surfaces of definable quality result.

With the transfer of motions and in combination with the definition of a ratio, several subdivision algorithms could be constructed, which adapt established concepts for example of Aitken, de Casteljau, and Bézier under consideration of the group structure on the Study sphere (Fig. 5). The special characteristic in this approach lies in the direct processing of the given discrete set of lines. Specific line-geometric quantities, such as the torsion, can now be directly integrated into the algorithm. The users can control the interpolation algorithm through single lines and actually manipulate the ruled surface in the same way that they manipulate a spline through control points. Conventional interpolation algorithms are based on the concept of Hermite interpolation and only guarantee C^2 -continuity. In contrast, the new method provides a spline interpolation with arbitrarily high degree and thus corresponds to an adapted B-spline method. Another property of the algorithm is the automatic generation of conoidal surfaces as soon as the given discrete lines are parallel to a common plane.

4.2 Generalization of the kinematic mapping

During our research, we were able to generalize the kinematic mapping which maps the motion

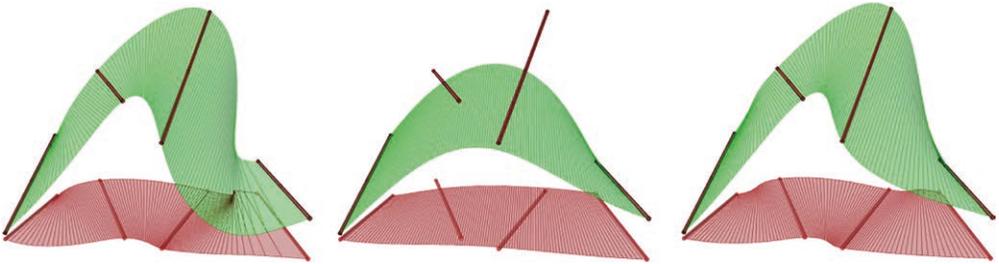


Bild 5: Subdivisionsalgorithmen für vier Geraden; von links nach rechts: Aitken, Bézier, B-Spline | **Fig. 5:** Subdivision algorithms for four lines; from left to right: Aitken, Bézier, B-spline

gewährleisten lediglich C^2 -Stetigkeit. Dagegen bietet das neue Verfahren eine Spline-Interpolation mit beliebig hohem Grad und entspricht damit einem adaptierten B-Spline-Verfahren. Eine weitere Eigenschaft des Algorithmus ist die zwanglose Erzeugung konoidaler Regelflächen, sobald die vorgegebenen diskreten Geraden eine gemeinsame Ferngerade schneiden.

4.2 Verallgemeinerung der kinematischen Abbildung

Im Zuge unserer Forschung konnte die kinematische Abbildung, welche die Bewegungsgruppe $SE(3)$ auf Punkte einer Hyperquadrik im sieben-dimensionalen projektiven Raum abbildet, verallgemeinert werden, Klawitter/Hagemann [15]. Mit Hilfe des Clifford-Algebra-Kalküls wurden Isometriegruppen von Cayley-Klein-Geometrien auf pseudo-algebraische Varietäten als Teilmenge von projektiven Räumen abgebildet. Insbesondere ließen sich mit Hilfe des entwickelten Apparates die bekannten Abbildungen von Blaschke und Grünwald sowie von Study im Clifford-Algebra-Kalkül vereinheitlichen. Außerdem wurden Möglichkeiten bereitgestellt, die Isometriegruppen verschiedener Cayley-Klein-Gruppen als Matrix-Gruppen darzustellen.

4.3 Entwicklung eines liniengeometrischen Clifford-Algebra-Modells

Weiterhin wurde ein homogenes Clifford-Algebra-Modell entwickelt, welches die Klein-Quadrik als Maßquadrik besitzt, siehe Klawitter [16]. In diesem Modell finden Geraden, welche in

group $SE(3)$ to points on a hyperquadric in the seven-dimensional projective space, Klawitter & Hagemann [15]. Using the Clifford algebra calculus, isometry groups of Cayley-Klein geometries were mapped to pseudo-algebraic varieties as subsets of projective spaces. In particular, the developed apparatus made it possible to unify the well-known mappings of Blaschke and Grünwald and of Study in the Clifford algebra calculus. Furthermore, possibilities were provided to represent the isometry groups of different Cayley-Klein groups as matrix groups.

4.3 Development of a line-geometric Clifford algebra model

Furthermore, a homogeneous Clifford algebra model was developed, which has the Klein quadric as a norm, see Klawitter [16]. In this model straight lines, which are represented in Plücker coordinates, find a natural analogon as zero vectors. Geometric objects which occur in the Klein model are transferred to the Clifford algebra model and are described there by certain algebra elements. For example, reguli, linear line congruences and linear complexes can be easily represented as algebra elements. According to Pottmann & Wallner [10], the group of regular projective transformations of the three-dimensional projective space is isomorphic to the group of automorphic collineations of the Klein quadric. This group can be found in the Clifford algebra model as a pin group. A way has been provided to transfer arbitrary projective mappings directly into the model. Advantages arise from the fact that the transformation, when represented in the algebra, can be

Plücker-Koordinaten dargestellt sind, ein natürliches Analogon als Nullvektoren. Geometrische Objekte, die im Klein-Modell vorkommen, werden in das Clifford-Algebra-Modell übertragen und sind dort durch bestimmte Algebraelemente beschrieben. So lassen sich beispielsweise Reguli, lineare Geradenkongruenzen und lineare Geradenkomplexe einfach als Algebraelemente darstellen. Nach Pottmann/Wallner [10] ist die Gruppe der regulären projektiven Transformationen des dreidimensionalen projektiven Raumes isomorph zur Gruppe der automorphen Kollineationen der Klein-Quadrik. Diese Gruppe kann in dem Clifford-Algebra-Modell als Pingruppe gefunden werden. Es wurde eine Möglichkeit bereitgestellt, beliebige projektive Abbildungen direkt in das Modell zu übertragen. Vorteile ergeben sich dadurch, dass die Transformation, wenn sie in der Algebra dargestellt ist, mit einer Algebraoperation auf verschiedene geometrische Objekte, die in der Algebra darstellbar sind, angewendet werden kann.

4.4 Relaxation auf der Dualsphäre

Für Formfindung und Optimierung von Regelflächen haben wir im liniengeometrischen Modell die entsprechenden Grundlagen geschaffen. Abhängig von gewählten Zielgrößen können etwa Evolutionsgleichungen betrachtet werden. Eine der bekanntesten Evolutionsgleichungen ist der *Curve-Shortening Flow*, welcher aus der Wärmeleitungsgleichung resultiert. Die Verallgemeinerung dieser Theorie auf duale Zahlen, vor allem für eine Anwendung auf der Dualsphäre, erforderte eine intensive Einarbeitung in Kurvenflüsse, Hagemann, Klawitter, Odehnal [17].

Die Anwendung des *Curve-Shortening Flow* hat große Gemeinsamkeit mit der Simulation eines Masse-Feder-Dämpfer-Systems. Werden Federn als Kanten eines polygonalen Netzes angenommen, können damit Membranen unter Krafteinfluss simuliert werden. Diese Idee lässt sich für Polygonzüge (eindimensionale polygonale Netze) auf die Dualsphäre übertragen. Der Feder, als Gerade zwischen zwei Punkten, ent-

applied with an algebra operation to various geometric objects representable in the algebra.

4.4 Relaxation on the Study sphere

For form finding and optimization of ruled surfaces, we have created the corresponding foundations in the line geometric model. Depending on the selected target variables, evolution algorithms can be considered. One of the best known evolution equations is the curve-shortening flow, which results from the heat equation. The generalization of this theory to dual numbers, especially for an application on the Study sphere, required an intensive study of curve flows, Hagemann, Klawitter, Odehnal [17].

The application of the curve-shortening flow has much in common with the simulation of a mass-spring-damper system. If springs are assumed to be edges of a polygonal mesh, it can be used to simulate membranes under the influence of forces. This idea can be applied to the Study sphere for polygonal chains (polylines, one-dimensional polygonal meshes). However, the spring, as a straight line between two points, then corresponds to a dual great circle arc and this in turn to the smallest helicoid between two straight lines. The helicoid stands in analogy to the straight line as the shortest connection between two points. Mechanical properties of these dual springs are also to be transferred into the dual sphere model, whereby a dependency from translational and rotational stiffness can be achieved. With the help of this approach, dynamic influences can be applied directly to ruled surfaces, and such can be used for a suitable shape finding within the design space of ruled surfaces – and this is the crucial point! See Fig. 6 and Hagemann, Klawitter, Lordick [18].

4.5 Transfer back into the three-dimensional Euclidean space

In buildings, ruled surfaces always exist only in segments, while by the Study sphere the generators are defined as infinite lines. Nevertheless, the modification of the ruled surfaces in the

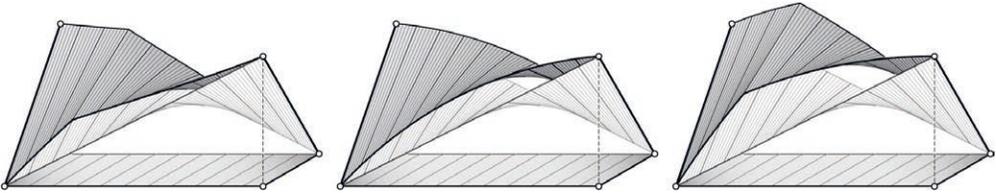


Bild 6: Relaxation unter Einzel- und Flächenlast und deren Kombination bei fixen Randgeraden | **Fig. 6:** Relaxation under point load, uniformly distributed load and their combination, while the boundary lines are fixed

spricht dann jedoch ein dualer Großkreisbogen und dieser wiederum der kleinsten Wendelflächen zwischen zwei Geraden. Die Wendelfläche steht in Analogie zur Geraden als kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten. Mechanische Eigenschaften dieser dualen Federn sind ebenfalls in das duale Modell zu übertragen, wodurch eine Abhängigkeit von translatorischer und rotatorischer Steifigkeit erreicht werden kann. Mit Hilfe dieses Ansatzes lassen sich dynamische Einflüsse auf Regelflächen übertragen, was direkt für eine geeignete Formfindung im Raum der Regelflächen – und das ist das Entscheidende! – Verwendung finden kann, siehe Bild 6 und Hagemann, Klawitter, Lordick [18].

4.5 Rückübertragung in den Anschauungsraum

Im Bauwesen liegen Regelflächen immer nur ausschnittsweise vor, während die Erzeugenden auf der Dualsphäre als unendlich lange Geraden definiert sind. Die Modifikation der Regelflächen im Anschauungsraum gelingt dennoch über einen Zusammenhang mit der Kinematik: Da Wendelflächen Schraubbewegungen von Geraden entsprechen, lassen sich die Bewegungsvorgänge auch auf andere Objekte, speziell auf die Endpunkte der Geradensegmente, übertragen. Es werden also zunächst im liniengeometrischen Modell nur die Geraden manipuliert und erst nach der Optimierung die Endpunkte der Geradenstücke durch die Anwendung der gefundenen Transformationsmatrix zurückübertragen und dargestellt. Der Gesamtvorgang dieser Regelflächenmanipulation mag im Detail aufwändig erscheinen (Bild 7), ist aber in nahe Echtzeit durchführbar.

Euclidean space can be achieved by a connection of the Study sphere with kinematics: Since helicoids correspond to helical movements of straight lines, the processed movement of the lines can also be transferred to other objects, especially to the end points of line segments. So, at first only the infinite lines are manipulated in the line-geometric model and only after the optimization of the shape the end points of the original line segments are processed by the found transformation matrix and then transferred back to the ruled surface. The overall process of this ruled surface manipulation may seem complex in detail (Fig. 7), but it can be performed in near real time.

5 Software for the design of ruled surfaces

The results were implemented as an add-on for the plug-in Grasshopper of the CAD software Rhinoceros 3D [19]. Furthermore, basic functionalities were realized cross-platform in Matlab and Python. This includes a calculus for different models of line space and a simulation tool for ruled surface relaxation.

The Grasshopper add-on called LineGeometry is a freely available toolkit for the line-based design of ruled surfaces [20], [21]. Four components (*Generators*) are used to generate ruled surfaces and four additional components (*Util*) provide auxiliary tools (Fig. 8, top). Ruled surfaces can be generated with LineGeometry, for example, by steering the surface with so-called control lines – just as control points determine a Bézier curve. Or the ruled surface interpolates the control lines (Fig. 8, down).

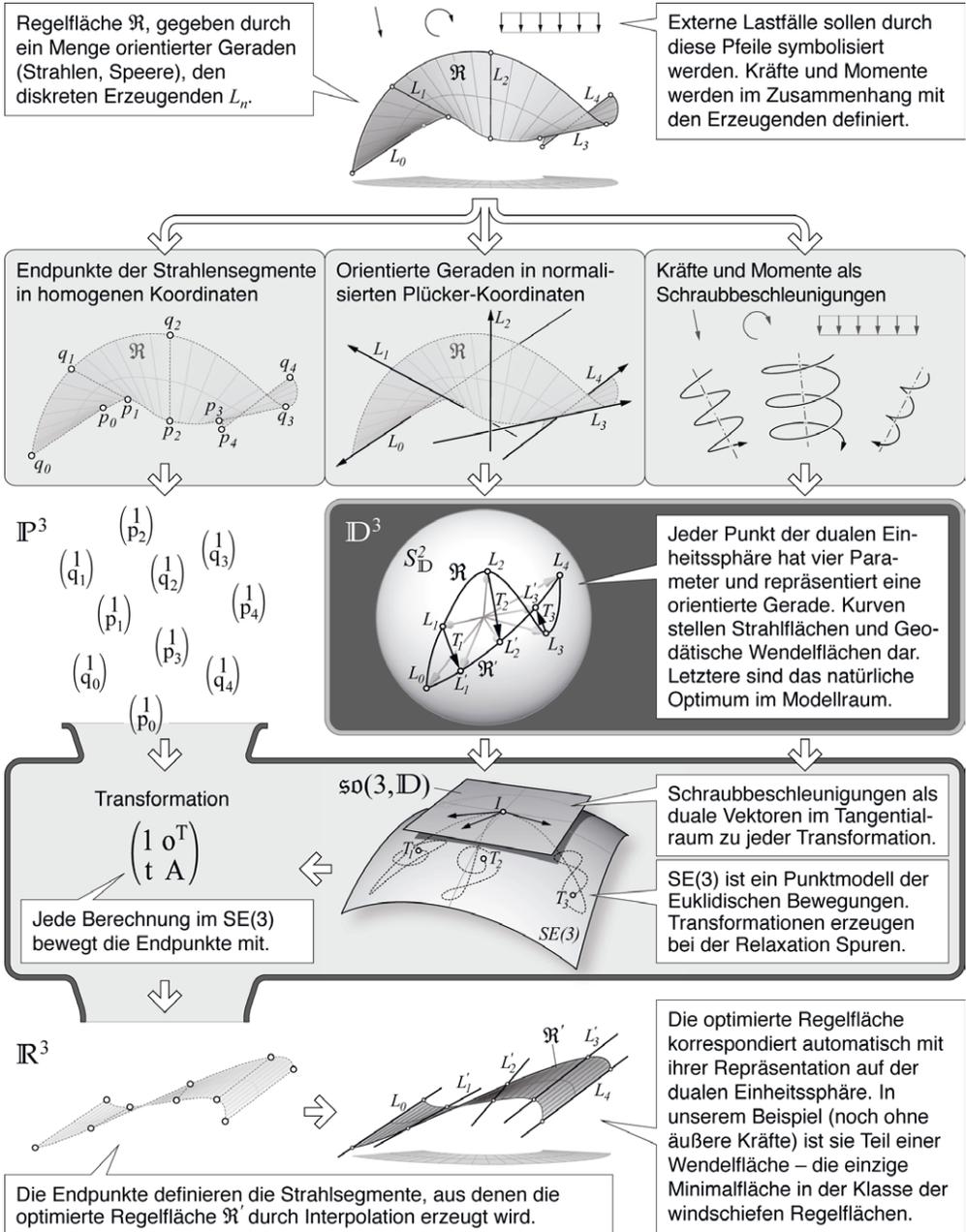
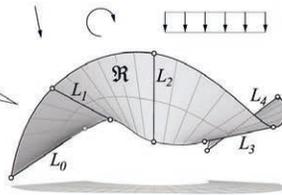


Bild 7: Diagramm des Prozesses

The ruled surface \mathfrak{R} is given by a set of oriented lines (rays, spears), the discrete generators L_n .



External load cases shall be symbolized by these arrows. Forces and torques are defined in conjunction with the generators.

Endpoints of ray segments in homogeneous coordinates

Oriented lines in normalized Plücker coordinates

Forces and moments as wrenches

$$\mathbb{P}^3 \begin{pmatrix} 1 \\ p_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ q_3 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \\ q_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ q_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ p_4 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \\ p_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ p_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ q_4 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \\ q_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ p_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ q_4 \end{pmatrix}$$

\mathbb{D}^3

Each point on the dual unit sphere holds four parameters and represents an oriented line while each curve stands for a ray surface. Geodesic curves depict helicoids and are the natural optimum in the model space.

Transformation

$$\begin{pmatrix} 1 & o^T \\ t & A \end{pmatrix}$$

Each calculated change in $SE(3)$ moves the endpoints.

$so(3, \mathbb{D})$

Wrenches as dual vectors, processed in the tangent space of each transformation.

$SE(3)$ is a point model of the Euclidean motions. Each transformation creates a trace during relaxation.

\mathbb{R}^3

The endpoints define the ray segments, from which the optimized ruled surface \mathfrak{R}' is generated by an interpolation algorithm.

The optimized ruled surface is automatically corresponding to its representation on the dual unit sphere. In our example (yet without external forces) it is a part of a helicoid which is the only minimal surface in the class of skew ruled surfaces.

Fig. 7: Diagram of the process

5 Software für die Erzeugung von Regelflächen

Die gefundenen Ergebnisse wurden als Add-on für das Plug-in Grasshopper der CAD-Software Rhinoceros 3D [19] implementiert. Darüber hinaus wurden grundlegende Funktionalitäten plattformübergreifend in Matlab und Python realisiert. Dazu zählt neben dem Geradenkalkül für verschiedene liniengeometrische Modelle ein Simulationswerkzeug für Regelflächenrelaxation.

Das Grasshopper-Add-on mit dem Namen LineGeometry ist ein frei verfügbares Entwurfswerkzeug zum geradenbasierten Design von Regelflächen [20], [21]. Vier Funktionen (*Generators*) dienen der Erzeugung von Regelflächen und vier weitere Funktionen (*Util*) stellen Hilfswerkzeuge zur Verfügung (Bild 8, oben). Regelflächen können mit LineGeometry zum Beispiel erzeugt werden, indem sogenannte Kontrollgeraden die Fläche steuern – genau so, wie Kontrollpunkte eine Bézier-Kurve steuern. Oder aber die Regelfläche interpoliert die Kontrollgeraden (Bild 8, unten). Außerdem gibt es ein spezielles Werkzeug für Parallelflächen von Regelflächen, die wieder Regelflächen sind, und eines für die Erzeugung von Reguli. Werkzeuge für die Extraktion von Asymptoten- und Hauptkrümmungslinien unterstützen die Approximation von Freiformflächen durch Regelflächen-Patches. Ein weiteres Werkzeug dient dem effektiven *Loften* einer Vielzahl von Geraden. Damit wird eine Performance-Schwäche der Standard-Loft-Funktion von Rhinoceros bei einer großen Zahl von Profilkurven umgangen. Ein Werkzeug für die Darstellung der Striktionslinie, dem Ort der Zentralpunkte auf einer windschiefen Regelfläche, rundet den Werkzeugkasten ab.

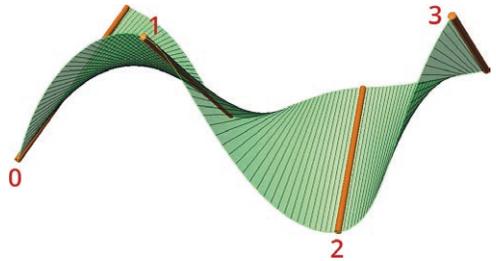
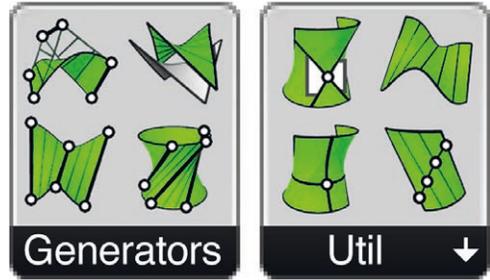


Bild 8: Funktionen des Add-on LineGeometry (oben) und Interpolation von vier Geraden mit einer Regelfläche, erzeugt durch die Funktion *BezLines* aus dem Add-on LineGeometry (unten) |

Fig. 8: Tools of the add-on LineGeometry (top) and interpolation of four lines with a ruled surface, created by the tool *BezLines* of the add-on LineGeometry (down)

There is also a special tool for “parallel surfaces” of ruled surfaces, which are ruled surfaces again, and one for generating reguli. Components for the extraction of asymptotic curves and curvature lines support the approximation of freeform surfaces by ruled surface patches. Another tool is used to effectively loft a large number of straight lines. This circumvents a performance weakness of Rhinoceros’ standard lofting function when dealing with a large number of profile curves. A tool for plotting the restriction line, the location of the central points on a skew ruled surface, completes the toolbox.

6 Anwendungen von LineGeometry

6.1 SPP-Sommerschule 2013

In einer Fallstudie *Summer School Pavilion* wurde der Prototyp einer Regelflächenschale während der SPP-Sommerschule 2013 entworfen

6 Applications of LineGeometry

6.1 SPP Summer School 2013

In a case study called *Summer School Pavilion*, the prototype of a ruled surface shell was designed during the SPP Summer School 2013 (see

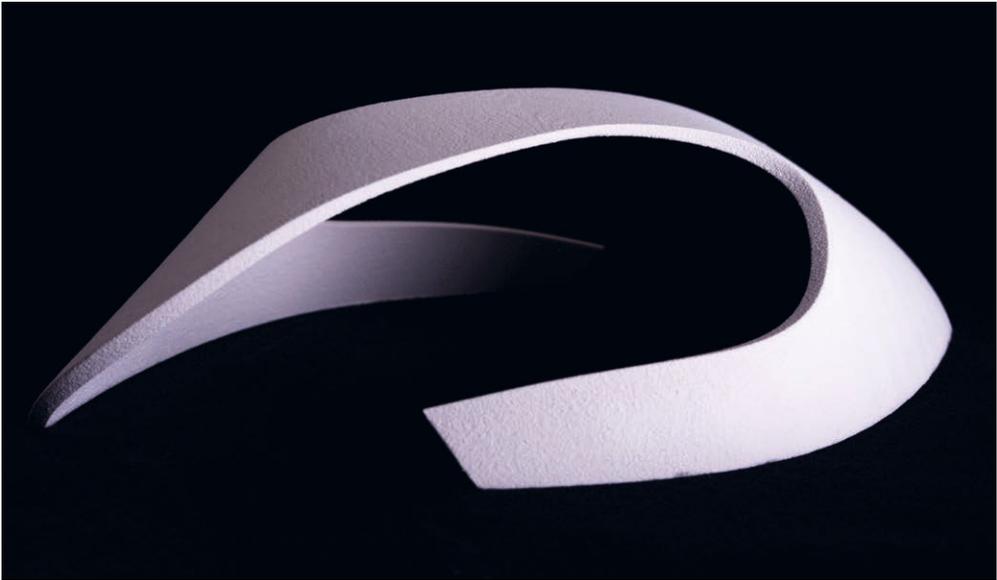


Bild 9: 3D-Druck des *Summer School Pavilion* aus dem 3D-Labor des Institutes für Geometrie, 2013 | **Fig. 9:** 3D print of the Summer School Pavilion, produced in 2013 at the 3D lab at the Institute of Geometry

(siehe Bild 9. Beteiligt waren Markus Hagemann (Mathematik, TU Dresden), Björn Freund (Maschinenbau, TU Darmstadt) und Michael Breitenberger (Statik, TU München). Zum Entwurf wurde mit Hilfe von CARAT++ eine Festigkeitsanalyse durchgeführt. Ein Modell der Fläche entstand im 3D-Labor am Institut für Geometrie, TU Dresden.

6.2 Modellierungskurs „Gestalten mit Regelflächen“

Im Sommersemester 2014 hatten 20 Studierende aus der Architekturfakultät der TU Dresden Gelegenheit, in die Liniengeometrie einzusteigen, mit Regelflächen zu entwerfen und die im Forschungsprojekt entstandenen Werkzeuge zu nutzen. Vier Teilaufgaben strukturierten den Kurs 3D-Modellieren von Prof. Lordick. Zunächst sollten die Studierenden lediglich gebaute Beispiele sammeln und präsentieren. Dabei stellte sich heraus, dass es für Neulinge keineswegs einfach ist, windschiefe Regelflächen zu erkennen und etwa von anderen Freiformflächen zu unterscheiden.

Fig. 9). Markus Hagemann (Institute of Geometry, TU Dresden), Björn Freund (Institute of Concrete Structures, TU Darmstadt) and Michael Breitenberger (Chair of Structural Analysis, TU Munich) were involved. For the design, a structural analysis was performed using CARAT++. A model of the surface was created in the 3D lab at the Institute of Geometry, TU Dresden.

6.2 Modeling course “Designing with ruled surfaces”

In the summer semester 2014, 20 students from the architecture faculty of the TU Dresden had the opportunity to get into line geometry, to design with ruled surfaces and to use the toolkit created during the research project. Four sub-tasks structured Prof. Lordick’s 3D modeling course. Initially, the students were asked to simply collect and present built examples. It turned out that it is by no means easy for newcomers to recognize skew ruled surfaces and to distinguish them from other free-form surfaces.

Die zweite Aufgabe war, eine freie Regelflächenstudie zu kreieren, und sich dabei beispielsweise durch Fadenmodelle aus der mathematischen Sammlung am Institut für Geometrie inspirieren zu lassen [22]. Diese Übung war formal streng gefasst: Alle mussten ihre Modelle in einem Würfelmodul von 25 cm Kantenlänge realisieren (Bild 10). Das Material – Faden und ein Rahmen aus Holzwerkstoff – war vorgegeben. Für die Herstellung des Rahmens wurde ein Lasercutter verwendet; die Schnittmuster mussten also auf digitalem Wege gewonnen werden. Bis zu diesem Punkt hatten die Studierenden nicht nur prinzipielle Erzeugungsweisen von Regelflächen, sondern auch die grafische Programmierumgebung Grasshopper in der CAD-Software Rhinoceros kennengelernt.

Im nächsten Schritt erhielten die Studierenden einen Einblick in die Formfindungswerkzeuge aus unserem Forschungsprojekt und sollten außerdem ein inhaltliches Konzept für einen kleinen Pavillon auf dem Campusgelände entwickeln. In der Abschlussaufgabe galt es dann,

The second task was to create a free ruled surface study, drawing inspiration, for example, from string models in the mathematical collection at the Institute of Geometry [22]. This exercise was formally strict: everyone had to realize their models in a cube module of 25 cm edge length (Fig.10). The material – thread and a frame made of hardboard – was given. A laser cutter was used to produce the frame, so the patterns had to be obtained digitally. Up to this point, the students had not only become acquainted with basic methods of generating ruled surfaces, but also with the Grasshopper graphical programming environment in the Rhinoceros 3D CAD software.

In the next step, the students were given an insight into the form finding tools from our SPP project and were also asked to develop a concept for a small pavilion on TU Dresden's campus. The final task was to combine the collected knowledge and concepts into a pavilion design (Fig. 11). For the evaluation of the designs, 3D prints were created in addition to the drawings.



Bild 10: Studierende mit ihren Fadenmodellen (2014) | Fig. 10: Students with their string models (2014)



Bild 11: Pavillonentwürfe zum Thema „Campus-Station“; von links oben nach rechts unten von Mark Ullrich, Andreas Margert, Daniel Petermann und Sandy Klemm | **Fig. 11:** Pavilion designs on the theme “Campus-Station”; from left top to right down: Mark Ullrich, Andreas Margert, Daniel Petermann und Sandy Klemm

die gesammelten Kenntnisse und Konzepte zu einem Pavillonentwurf zusammenzuführen (Bild 11). Für die Evaluierung der Entwürfe wurden neben den Zeichnungen auch 3D-Drucke erstellt.

Während des Kurses wurde offenbar, welche Herausforderung für die räumliche Vorstellung der Umgang mit Regelflächen bedeutet. Der digitale Modellbau war insofern unabdingbarer Bestandteil der Veranstaltung. Der weitgehend unvoreingenommene Zugang der Teilnehmenden zum Thema war ein Vorteil, weil dadurch ein ungeahntes Spektrum an Regelflächenentwürfen angeboten wurde – zunächst ohne Rücksicht auf die Effektivität der Konstruktionen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse des Projektes ermöglichen die Gestaltung mit Regelflächen auf eine

During the course it became obvious what a challenge for the spatial imagination dealing with ruled surfaces means. In this respect, digital model building was an indispensable part of the training. The open approach of the participants to the topic was an advantage, because this offered an unexpected variety of ruled surface designs – initially without concern for the feasibility of the constructions.

7 Conclusion and outlook

The results of the project so far allow the design with ruled surfaces in a novel and at the same time force-adaptive way. In the SPP follow-up project *Lightweight Concrete Structures Based on Line Geometry*, in cooperation with Prof. Mike Schlaich from the TU Berlin, the aim is to match the mathematical strategy with engineering form finding and optimization methods, to systematize them and thus make them easily ac-

neuartige und zugleich kraftadaptive Weise. Im SPP-Anschlussprojekt *Dünnwandige Betonbauteile mit Regelflächengeometrie*, in Kooperation mit Prof. Mike Schlaich von der Technischen Universität Berlin, geht es dann darum, die mathematische Strategie mit ingenieurtechnischen Formfindungs- und Optimierungsmethoden abzugleichen, zu systematisieren und somit praxistauglich zu machen. Das Ziel sind Werkzeuge zur Konstruktion unkonventioneller, aber effektiver und leichter Betonbauteile mit Regelflächengeometrie (siehe Bericht auf S. 488 ff. in diesem Band).

Die Erfahrung mit Studierenden hat gezeigt, dass der Wissenstransfer in Bezug auf die Gestaltung mit Regelflächen eine komplexe Herausforderung ist. Diesem Thema war die Summer school *Line Geometry for Lightweight Structures* (LGLS) gewidmet, die im September 2018 durchgeführt wurde und sich speziell an die nächste Generation aus Forschung und Praxis gewendet hat (siehe [23] und Kurzbericht auf S. 794/795 in diesem Band).

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

cessible for practical use. The goal is to develop tools for the design of unconventional but effective and lightweight structural elements from concrete with ruled surface geometry (see [23] and short report on p. 488 seq. in this volume).

The experience with students has shown that the transfer of knowledge related to the design with ruled surfaces is a complex challenge. The summer school *Line Geometry for Lightweight Structures* (LGLS), which was held in September 2018, was dedicated to this topic and addressed to the rising generation of researchers and practitioners (see pages 794/795 in this book).

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Beckh, M.: Hyperbolische Stabwerke: Suchovs Gittertürme als Wegweiser in den modernen Leichtbau. München: Detail, 2012
- [2] Burry, M.: Gaudí Unseen: Completing the Sagrada Familia. Berlin: Jovis, 2007
- [3] Heinle, E.; Schlaich, J.: Kuppeln aller Zeiten, aller Kulturen. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt DVA, 1996
- [4] Dechau, W. (Hrsg.): Kühne Solitäre. Ulrich Müther, Schalenbaumeister der DDR. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt DVA, 2000
- [5] Ruppert, M.; Gebbeken, N.; Janowski, D.; Raabe, K.-H.: Zur Berechnung von vorgespannten Hyperboloidschalen. Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002), Heft 4, S. 212–220
- [6] Müller, H.; Kokott, H.-J.: „Panorama“-Bauwerk Bad Frankenhausen. Bauplanung – Bautechnik 32 (1978) 2, S. 52–56
- [7] Shell Pioneers: Int. Symp. am 18./19.10.2012 an der TU Cottbus. <http://www.tu-cottbus.de/fakultaet2/de/bautechnikgeschichte/lehrstuhl/franzdischinger-symposium/inhalt.html> an der TU Berlin (aufgerufen am | accessed on 07.11.2013)
- [8] Schlaich, M.: Von den dünnen Betonschalen Félix Candela zu den leichten Flächentragwerken von heute. Bauingenieur – VDI-Bautechnik Jahresausgabe 2011/2012 (2011), S. 122–131
- [9] Flöry, S.; Pottmann, H.: Ruled Surfaces for Rationalization and Design in Architecture. LIFE in:formation. On Responsive Information and Variations in Architecture (2010), S. 103–109
- [10] Pottmann, H.; Wallner, J.: Computational Line Geometry. Heidelberg · Berlin u. a.: Springer, 2001
- [11] Lordick, D.: Konstruktion der Schattengrenzen krummer Flächen mithilfe von Begleitflächen. Diss., Universität Karlsruhe, 2001; erschienen bei: Aachen: Shaker Verlag
- [12] Scheurer, F.: Bis zur letzten Schraube – Kilden Konzerthaus. Werk, Bauen + Wohnen 98/65 (2011) 5, S. 12–19
- [13] Klawitter, D.: Clifford Algebras – Geometric Modelling and Chain Geometries with Application in Kinematics. Diss., TU Dresden, 2014; erschienen bei: Wiesbaden: Springer Spektrum
- [14] Hagemann, M.; Klawitter, D.: Discretisation of light-weight concrete elements using a line-geometric model. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 22.–25.07.2012 in Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 269–274
- [15] Klawitter, D.; Hagemann, M.: Kinematic mappings for Cayley-Klein geometries via Clifford algebras. Beiträge zur Algebra und Geometrie / Contributions to Algebra and Geometry 54 (2013), S. 737–761
- [16] Klawitter, D.: A Clifford Algebraic Approach to Line Geometry. Adv. Appl. Clifford Algebras 24 (2014), S. 713–736 – <https://doi.org/10.1007/s00006-014-0459-z>
- [17] Hagemann, M.; Klawitter, D.; Odehnal, B.: Curve Flows on Ruled Surfaces. Journal of Geometry and Graphics 17 (2013) 2, S. 129–140
- [18] Hagemann, M.; Klawitter, D.; Lordick, D.: Force Driven Ruled Surfaces. Journal for Geometry and Graphics (JGG) 17 (2013) 2, S. 193–204
- [19] CAD-Software Rhinoceros 3D: <https://www.rhino3d.com/> (aufgerufen am | accessed on 25.01.2022)
- [20] Download des Add-on LineGeometry: <http://linegeometry.daniellordick.de/> (aufgerufen am | accessed on 25.01.2022)
- [21] Lordick, D.: Parametrischer Entwurf von Regelflächen auf Grundlage von Interpolationsalgorithmen zwischen Kontrollgeraden. In: Bischoff, M.; von Scheven, M.; Oesterle, B. (Hrsg.): Tagungsband Baustatik – Baupraxis 14, 23./24.03.2020 an der Universität Stuttgart, 2020, S. 579–589 – <http://dx.doi.org/10.18419/opus-10762>
- [22] Sammlung Mathematische Modelle der TU Dresden: <https://www.mathematical-models.org/> (aufgerufen am | accessed on 25.01.2022)
- [23] Lordick, D.; Eichenauer, M.: Line Geometry Applied to Form Finding. In: Williams, Kim and Leopold, Cornelia (Eds.): Proc. of Nexus 20/21 – Relationships Between Architecture and Mathematics, 26.–29.07.2021 in Kaiserslautern (online), Kim Williams Books, 2021, S. 183–186

Bildnachweise | Picture credits

- Bild | Picture 1: Silke Scheerer
- Bilder | Pictures 2 [11], 10: Daniel Lordick
- Bild | Picture 3: Knut Arne Gjertsen, CC BY-SA 3.0, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/17/Kilden_teater_og_konserthus.jpg
- Bild | Picture 4: Design-to-Production, Fabian Scheurer [12]
- Bild | Picture 5: vgl. | compare [14]
- Bild | Picture 6: Hagemann et al. [18]
- Bild | Picture 7: [18]
- Bild | Picture 8: [21]
- Bild | Picture 9: Jens Martin Bornemann
- Bild | Picture 11: Renderings der genannten Autoren | Renderings of the named authors

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Kraftadaptive Diskretisierung leichter Betonbauteile mittels liniengeometrischer Modellierung

Force-adaptive discretisation of lightweight concrete components by means of line geometric modelling

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Daniel Lordick Leiter der Arbeitsgruppe Geometrische Modellierung und Visualisierung Head of the working group Geometric Modeling and Visualization
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	LO 1755/1-1
Kontakt Contact:	+49 351 463 34193 daniel.lordick@tu-dresden.de https://tu-dresden.de/mn/math/geometrie/lordick/
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr. Gunter Weiß Professur für Geometrie/Differentialgeometrie Chair of Geometry/Differential Geometry
Kontakt Contact:	– (emeritiert emeritus)
Adresse Address:	TU Dresden, Institut für Geometrie, 01062 Dresden
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.10.2011–30.09.2014 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 31.03.2015
Team Team:	Markus Hagemann (10/2011–12/2013) Daniel Klawitter (10/2011–03/2015)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Hagemann, M.; Klawitter, D.: Discretisation Lightweight Concrete Elements Using a Line-Geometric model. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 269–274
- Hagemann, M.; Klawitter, D.; Odehnal, B.: Curve Flows on Ruled Surfaces. Journal for Geometry and Graphics 17 (2013) 2, S. 129–140
- Hagemann, M.; Klawitter, D.; Lordick, D.: Force Driven Ruled Surfaces. Journal for Geometry and Graphics (JGG) 17 (2013) 2, S. 193–204
- Klawitter, D.; Hagemann, M.: Kinematic mappings for Cayley-Klein geometries via Clifford algebras. Beiträge zur Algebra und Geometrie/Contributions to Algebra and Geometry 54 (2013), S. 737–761
- Klawitter, D.: A Clifford Algebraic Approach to Line Geometry. Adv. Appl. Clifford Algebras 24 (2014), S. 713–736 – <https://doi.org/10.1007/s00006-014-0459-z>
- Lordick, D.; Klawitter, D.; Hagemann, M.: Liniengeometrie für den Leichtbau. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 224–235 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171646>

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Klawitter, D.: Clifford Algebras – Geometric Modelling and Chain Geometries with Application in Kinematics. 2014

Folgeprojekt | Follow-up project

- Methoden und Werkzeuge für Entwurf und Herstellung schalenartiger und dünnwandiger Betonbauteile mit Regelflächengeometrie. Kurz: Dünnwandige Betonbauteile mit Regelflächengeometrie | Methods and tools for design and fabrication of shell-like and thin-walled concrete structures with line geometry; Short title: thin-walled concrete structures with line geometry

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Daniel Lordick, Prof. Mike Schlaich (TU Berlin)
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 1542 (Phase II)

Leichte verformungsoptimierte Schalenträgerwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke | Light-weight shape-optimised shell structures made from high-performance concrete for collector modules of parabolic trough power plants

- ▶ Christoph Kämper¹, Tobias Stallmann², Patrick Forman¹, Jürgen Schnell², Peter Mark¹
- ▶ ¹ Lehrstuhl für Massivbau, Ruhr-Universität Bochum (RUB)
- ▶ ² FG Massivbau und Baukonstruktion, Technische Universität Kaiserslautern (TU KL)

1 Einleitung

Parabolrinnen-Kraftwerke sind zurzeit die am häufigsten zum Einsatz kommende und wirtschaftlichste Technologie solarthermisch konzentrierender Systeme (*Concentrated Solar Power* – CSP) und gehören zu den linienfokussierenden Systemen [1]. In Spanien stellen die solarthermischen Parabolrinnen-Kraftwerke *Andasol 1–3* mit einer Kollektorfläche von ca. 150 Millionen m² bereits 150 MW zur Verfügung, mit denen ca. 200.000 Einwohner jährlich mit Strom versorgt werden können [2]–[4]. Das Solarfeld besteht aus ca. 150 m langen, in Reihe angeordneten Kollektoren, die aus einzelnen Parabolrinnen-Kollektormodulen zusammengefasst und im Tagesverlauf der Sonne nachgeführt werden. Die Lagerung erfolgt an den Modulrändern im Schwerpunkt des Kollektormoduls, der mit der Rotationsachse zusammenfällt. Bisher werden die Kollektoren überwiegend als filigranes Stahlfachwerk mit über die Aperturweite parabelförmig, uniaxial gekrümmten und punktuell gestützten Spiegelementen ausgeführt. Bei der Assemblierung der Stahlfachwerke und der Spiegelemente ist schon im Bauzustand durchgehend eine hohe Präzision gefordert, um eine maximale Solarstrahlenkonzentration der einfallenden direkten

1 Introduction

Parabolic trough power plants are currently the most frequently used and most economical technology of solar thermal systems (*Concentrated Solar Power* – CSP) and belong to the linear focus collector types [1]. In Spain, the solar thermal parabolic trough power plants *Andasol 1–3* with a collector area of approx. 150 million m² already provide 150 MW, which means that approx. 200,000 inhabitants can be annually supplied with electricity [2]–[4]. The solar field consists of approx. 150 m long collectors arranged in rows, which are combined from individual parabolic trough collector modules and track the sun during the course of the day. The bearings are located at the edges of the module in the centre of gravity of the collector module, which corresponds to the axis of rotation. Up to now, the collectors have mainly been designed as a steel framework with parabolic, uniaxially curved and pointwise supported mirror elements. During the assembly of the steel framework and the mirror elements, high precision is required throughout the manufacturing in order to ensure a maximum solar radiation concentration of the incident direct solar radiation on an absorber tube located in the focal line [5]. A heat transfer medium, usually thermal oil,

solaren Strahlung auf ein in der Fokallinie befindliches Absorberrohr sicherzustellen [5]. In diesem wird ein Wärmeträgermedium, zumeist Thermoöl, auf eine Prozesstemperatur von ca. 400 °C erhitzt. In einem nachgeschalteten konventionellen Kraftwerksblock wird mittels Dampfturbine Elektrizität erzeugt. Das bisher kommerziell meist genutzte Kollektormodul ist der *EuroTrough* mit einer Aperturweite von ca. 5,80 m und einer Modullänge von 12 m [6], [7] (Bild 1), welches als Benchmark für die erste Förderphase des Projekts diene.

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit zielen bisherige Entwicklungen auf eine Vergrößerung der Spiegelfläche zur Steigerung des Wirkungsgrades über einen erhöhten geometrischen Konzentrationsgrad, definiert als das Verhältnis von Reflektor- zu Absorptionsfläche, ab. Module wie der *UltimateTrough* und der *SpaceTube* erreichen dies durch die Vergrößerung der Aperturweite auf 7,5 m bzw. 8 m [8], [9]. Ein alternatives Strukturkonzept aus stahlfaserverstärkten Betonfertigteilen der Schweizer Firma *Airlight* mit einer Aperturweite von 9,7 m besteht aus durch Luftdruck in parabolische Form gebrachten Spiegelfolien als Reflektorsystem und wurde bisher in einem Pilot-Kraftwerk in Ait-Baha, Marokko, umgesetzt [10]. Wesentliche Arbeiten der zweiten Förderphase sind daher – dem Trend zu größerer Apertur folgend – an der visionären Entwicklung von Parabol-schalen mit Öffnungsweiten von bis zu 10 m ausgerichtet.

is heated to a process temperature of approx. 400 °C in the absorber tube. Electricity is generated in a downstream conventional power plant unit by means of a steam turbine. The most commercially used collector module is the *EuroTrough* with an aperture width of approx. 5.80 m and a module length of 12 m [6], [7] (Fig. 1), which served as a benchmark for the first funding phase of the project.

In order to improve economic efficiency, previous developments have aimed to increase the size of the mirror surface in order to increase efficiency by a higher geometric degree of concentration, defined as the ratio of reflector surface to absorption surface. Modules like the *UltimateTrough* and the *SpaceTube* achieve this by increasing the aperture width to 7.5 m or 8 m, respectively, [8], [9]. An alternative structural concept consisting of prefabricated steel fibre-reinforced concrete elements from the Swiss company *Airlight* with an aperture width of 9.7 m consists of parabolic mirror foils as a reflector brought into parabolic shape by air pressure and has already been implemented in a pilot power plant in Ait-Baha, Morocco [10]. Therefore, in line with the trend towards a larger aperture, major work in the second funding phase aims at the visionary development of parabolic shells with aperture widths of up to 10 m.

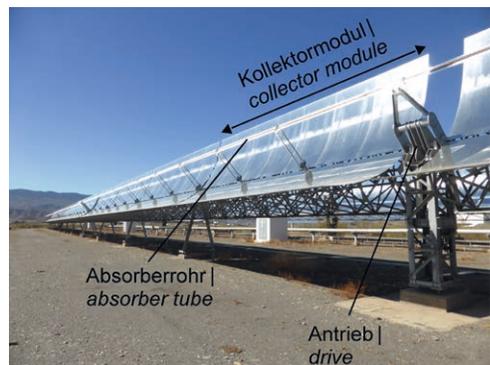


Bild 1: *EuroTrough*-Kollektormodule auf dem Testfeld der Forschungseinrichtung „CIEMAT Plataforma Solar“ | **Fig. 1:** *EuroTrough* modules at the testing area of the research facility “CIEMAT Plataforma Solar”

2 Ziele und Strategie

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, Tragkonstruktionen für Parabolrinnen-Kollektormodule aus Hochleistungsbeton zu entwickeln. Dies soll durch einen mehrstufigen (Konzept-, Struktur-, Bauteil-, Detailebene), interaktiven (Numerik und experimentelle Umsetzung) sowie interdisziplinären (Solartechnologie, Windingenieurwesen, Betontechnologie, Fertigteilbau, Ingenieurinformatik) Entwicklungsprozess gelingen. Es entstehen so besonders leichte, verformungsarme Strukturen, die unter Einhaltung von Verformungsrestriktionen streng am Prinzip *form follows force*, also am Kraftfluss, orientiert sind. Das methodische Gesamtkonzept beinhaltet sowohl Designprinzipien und numerische sowie experimentelle Methoden als auch die generelle praktische Realisierung von Parabolrinnen-Kollektormodulen aus Hochleistungsbeton.

Dazu wurden im Einzelnen folgende Aspekte erarbeitet:

1. Ableitung von Kriterien zur Genauigkeitsbewertung der Schaleninnenfläche (Abschnitt 3),
2. Entwicklung kleinformatiger Strukturkonzepte mit Abmessungen vom Typ *EuroTrough* (Förderphase I) und „upsizing“ auf großformatige Kollektormodule bis 10 m Aperturweite (Förderphase II) unter Berücksichtigung der Designprinzipien aus Förderphase I (Abschnitt 4),
3. Entwicklung parametrisierter, numerischer Modelle (Abschnitt 5) und Herleitung spezifischer Einwirkungen (Abschnitt 6),
4. Konzepte zur Multilevel-Optimierung und Ableitung von Methoden zur robusten Analyse (Abschnitt 7),
5. Weiterentwicklung der Betontechnologie, Bewehrungs- und Schalungstechniken (Abschnitt 8),
6. Experimentelle Untersuchung der Querkrafttragfähigkeit an Ersatzsystemen aus Hochleistungsbeton mit integrierten Hohlkörpern (Abschnitt 8),
7. Realisation von Demonstratoren (Abschnitt 9).

2 Objectives and strategy

The aim of the research project is to develop supporting structures for parabolic trough collector modules made of high-performance concrete. This is to be achieved through a multi-level (concept, structure, component, detail), interactive (numerics and experimental realisation) and interdisciplinary (solar technology, wind engineering, concrete technology, precast construction, building informatics) development process. This result in particularly lightweight, low-deformation structures that are strictly oriented towards the principle of *form follows force* while complying with deformation restrictions. The overall methodological concept includes design principles and numerical and experimental methods as well as the general practical implementation of parabolic trough collector modules made of high-performance concrete.

The following aspects were elaborated in detail:

1. Derivation of an accuracy criterion for the inner surface of the shell (section 3),
2. Development of small-scale structural concepts with *EuroTrough* type dimensions (funding phase I) and upsizing to large-format collector modules up to 10 m aperture width (funding phase II) taking into account the design principles from funding phase I (section 4),
3. Development of parameterised numerical models (section 5) and derivation of specific action effects (section 6),
4. Concepts for multi-level optimisation and derivation of robust analysis methods (section 7),
5. Further development of concrete technology, reinforcement and formwork techniques (section 8),
6. Experimental investigation of the shear strength of equivalent systems made of high-performance concrete with integrated void formers (section 8),
7. Realisation of demonstrators (section 9).

3 Herleitung eines Wirksamkeitskriteriums (RUB)

Die Leistung eines Solarfeldes hängt vom Verhältnis der solaren, einfallenden Energie zu tatsächlich absorbiertener Energie ab. Im Fall eines Kollektormoduls entspricht dies der reflektierten zur absorbierten direkten Solarstrahlung. Um eine maximale Solarstrahlenkonzentration sicherzustellen, muss die Reflektorfläche möglichst verformungsarm sein.

Der Querschnitt eines Parabolrinnenkollektors besitzt im idealen, also undeformierten, Zustand die Form einer Parabel, welche durch die Fokallänge f definiert ist (Bild 2, links). Diese beschreibt den Abstand zwischen Parabelursprung und dem Fokal- bzw. Konzentrationspunkt der Parabel. Im Fokuspunkt bündeln sich alle orthogonal einfallende Strahlen, die auf der idealen Parabeloberfläche reflektiert wurden. Hier ist das Absorberrohr angeordnet – bestehend aus Receiver und Schutzhülle, die zur Reduzierung von thermischen Verlusten ein Vakuum erzeugt. Die geometrische Form eines Parabelsegments kann eindeutig über den Öffnungswinkel φ_r , die Öffnungsweite w und die Fokallänge f beschrieben werden.

Die Wirksamkeit eines Solarfeldes hängt maßgeblich von der Formbeständigkeit der Reflektorfläche in Querrichtung ab und wird anhand der optischen Wirksamkeit definiert. Verformungen in Längsrichtung sind vernachlässigbar, da diese in Abweichungen der Solarstrahlen entlang der Fokallinie resultieren. Um die infolge äußerer Einflüsse sowie zeitlicher und initialer Formabweichungen auftretenden Verformungen einer Parabolschale hinsichtlich der Solarstrahlenkonzentration zu bewerten, wurde ein optisches Wirksamkeitskriterium hergeleitet. Es beruht auf einer Wichtung der Abweichung der reflektierten Solarstrahlen zum Fokuspunkt in Abhängigkeit des Absorberrohrdurchmessers d . Die aus einer verformten Reflektoroberfläche bezüglich einer idealen Parabelform resultierenden Winkelfehler Θ (vgl. Bild 2, links) der reflektierten Solarstrahlen werden mithilfe einer Wichtungsfunktion f_{PT} (Gl. 1) nach [11] bewertet.

3 Derivation of an efficiency criterion (RUB)

The performance of a solar field depends on the ratio of incident solar energy to actually absorbed energy. In the case of a collector module, this corresponds to the reflected direct solar radiation absorbed. In order to ensure a maximum concentration of solar radiation, the deformation of the reflector surface must be as low as possible.

The cross-section of a parabolic trough collector has the shape of a parabola in the ideal, i.e. undeformed, state, which is defined by the focal length f (Fig. 2, left). The focal length describes the distance between the vertex and the focal or concentration point of the parabola. In the focal point, all orthogonally incident rays that are reflected on the ideal parabola surface are concentrated. Here the absorber tube is arranged – consisting of receiver and protective cover, which generates a vacuum to reduce thermal losses. The geometric shape of a parabola segment can be clearly described by the rim angle φ_r , the aperture width w and the focal length f .

The efficiency of a solar field depends significantly on low deformations of the reflector surface in transverse direction and is defined by the optical efficiency. Deformations in the longitudinal direction are negligible because they result in deviations of the solar rays along the focal line. In order to evaluate the deformations of a parabolic shell occurring due to environmental conditions as well as temporal and initial shape deviations with regard to the solar radiation concentration, an optical efficiency criterion was derived. It is based on a weighting of the misalignment of the reflected solar rays from the focal point depending on the absorber tube diameter d . The slope errors Θ (cf. Fig. 2, left) of the reflected solar rays resulting from a deformed surface with respect to an ideal parabolic shape are evaluated using a weighting function f_{PT} , Eq. (1) acc. to [11].

$$f_{PT} = \begin{cases} 1 & \text{für } |\theta| < \theta_1 \\ \cot \frac{\varphi_r}{2} \left(\frac{2 \tan \frac{\varphi_r}{2}}{C \cdot \Theta} - 1 \right) & \text{für } |\theta| < \theta_1 < \theta_2 \\ 0 & \text{für } |\theta| < \theta_2 \end{cases} \quad (1)$$

Der geometrische Konzentrationsgrad C ist dabei das Verhältnis zwischen Öffnungsweite w und Receiverrohrdurchmesser d . Der Akzeptanzhalbwinkel θ_1 entspricht dem Winkel, für den die am Parabelrand einfallenden Solarstrahlen noch gerade das Receiverrohr treffen; θ_2 ist das entsprechende Pendant für den Parabelscheitel. Das heißt, jede Strahlabweichung kleiner θ_1 erzielt eine volle optische Wirksamkeit. Jegliche Winkelfehler, die größer sind, haben lediglich eine abgeminderte oder keine Wirksamkeit. Die so bestimmten lokalen Wirksamkeiten werden zur Ermittlung der gesamten optischen Wirksamkeit η eines Kollektormoduls über die projizierte Kollektorfläche aufintegriert. Zur Bewertung des Schalendesigns dienen dabei Mittelwert μ und Standardabweichung σ der Häufigkeitsverteilungen des Winkelfehlers, welche mit einer Normalverteilung approximiert sind. Volle Wirksamkeit tritt auf, wenn alle Winkelfehler innerhalb des Akzeptanzhalbwinkels θ_1 verbleiben. Bild 2 (rechts) zeigt exemplarisch die Häufigkeitsverteilung mit überlagerter Akzeptanzfunktion zur Bewertung der Kollektorwirksamkeit.

The geometrical concentration ratio C is the ratio between aperture width w and receiver tube diameter d . The acceptance half angle θ_1 corresponds to the angle at which the solar rays incident at the parabolic edge are still focused on the receiver tube; θ_2 is the corresponding counterpart for the parabolic vertex. In other words, each beam deviation of less than θ_1 achieves full optical efficiency. Any slope errors that are larger will only have a reduced or no effectiveness. These local efficiencies are integrated over the projected collector surface to determine the overall optical efficiency η of a collector module. The mean value μ and standard deviation σ of the probability distributions of the slope errors, which are approximated with a normal distribution, are used to evaluate the shell design. Full efficiency occurs when all angular errors remain within the acceptance half-angle θ_1 . Fig. 2 (right) shows an example of the probability distribution with a superposed acceptance function for evaluating the collector efficiency.

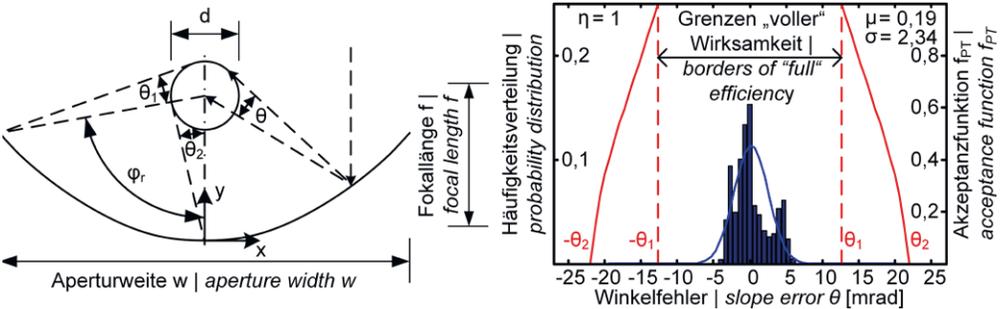


Bild 2: Geometrische Beziehung im Querschnitt einer Parabolrinne mit zylindrischem Receiver (links) und Genauigkeitsanalyse (rechts) | Fig. 2: Geometry and slope error parameters in cross-section based on a cylindrical absorber tube (left) and accuracy analysis (right)

4 Entwicklung von Strukturkonzepten (RUB)

Als Startkonfiguration für die Strukturfindung der ersten Förderphase wurden die Abmessungen des *EuroTrough*-Moduls mit einer Apertur von ca. 5,80 × 12,00 m gewählt (Bild 3, links). Wesentlicher Nachteil dieser und auch anderer Stahlfachwerkstrukturen mit punktuell aufgelagerten Spiegelementen ist die Trennung von Tragstruktur und Spiegelfläche, da Formabweichungen beider Strukturen sich superponieren. In diesem Projekt sollen daher Trag- und Reflektorstruktur zu einem verformungsarmen Schalentragwerk aus Hochleistungsbeton zusammengeführt werden (Bild 3, rechts). Dabei werden hohe Anforderungen an die Güte der Schalenoberfläche der uniaxial gekrümmten Betonschale gestellt, denn mit dieser werden über die gesamte Modullänge die Reflektorelemente, z. B. Spiegelfolie oder flexible Dünnglasspiegel, kontinuierlich flächig verbunden, sodass eine Eigensteifigkeit der bisher punktuell gestützten Spiegelemente nicht mehr erforderlich ist. Verformungen der Schalenstruktur wirken sich so direkt auf die verspiegelte Oberfläche aus und dienen als Inputgrößen für Genauigkeitsanalysen zur optischen Wirksamkeit. Ein primärer uniaxialer Lastabtrag, getrennt für Quer- und Längssystem, wie beim *EuroTrough* weicht einem multiaxialen Lastabtrag der dünnwandigen Schalenkonstruktion, die es zulässt, einen optimalen Kraftfluss auszubilden und Membrantragwirkungen zu aktivieren.

4 Development of structural concepts (RUB)

The dimensions of the *EuroTrough* module with an aperture of approx. 5.80 × 12.00 m were chosen as the starting configuration for the conceptual design finding in the first funding phase (Fig. 3, left). An essential disadvantage of this and other steel framework structures with pointwise supported mirror elements is the separation of supporting structure and mirror surface, since deformations of both structures superpose each other. In this project, the load-bearing and reflector structure are merged to a low-deformation shell made from high-performance concrete (Fig. 3, right). High demands are set on the surface quality of the uniaxially curved concrete shell, because the reflector elements, e.g. mirror foil or flexible thin glass mirrors, are continuously glued to the shell over the entire module length, so that the inherent rigidity of the previously point-supported mirror elements is no longer required. Thus, deformations of the shell structure have a direct effect on the mirrored surface and serve as input variables for accuracy analyses of the optical efficiency. A primary uniaxial load transfer, separated for transverse and longitudinal systems as with the *EuroTrough*, is replaced by a multiaxial load transfer of the thin-walled shell structure, which allows an optimal flow of forces and activation of membrane load capacity.

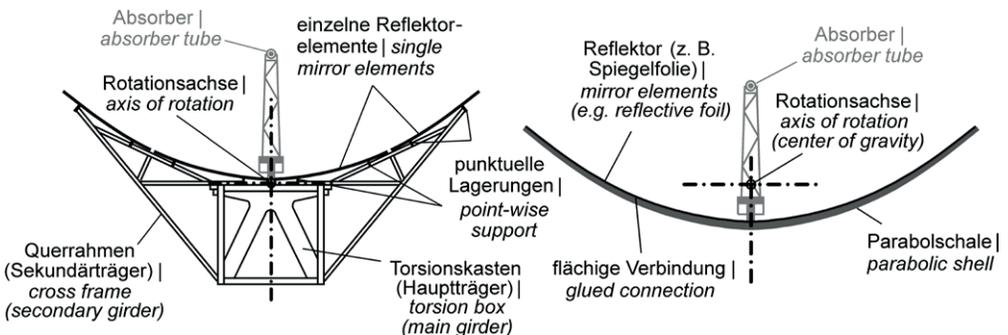


Bild 3: Querschnitt des *EuroTrough*-Moduls (links) und Konzept des Querschnitts einer parabolisch gekrümmten, einwandigen Betonschale (rechts) | Fig. 3: Cross-section of the *EuroTrough* module (left) and concept of the cross-section of the thin-walled parabolic concrete shell (right)

Für ein Strukturkonzept der Betonschale nach Vorbild des *EuroTrough*-Moduls wurde in der ersten Phase ein Initialmodell entwickelt, welches die wesentlichen Tragmechanismen von Tonnenschalen adaptiert. Um zusätzlich hohen Verwölbungen entgegenzuwirken, wurden als ingenieurtechnisch sinnvolle Ad-hoc-Optimierungsansätze Randverstärkungen an den Längsseiten, Zugbänder mit korrespondierenden Queraussteifungen auf der Schalenrückseite in den Viertelpunkten sowie Seitenschotte an den offenen Enden der Parabolschale, die gleichzeitig eine Lagerung im Schwerpunkt der Schale garantieren, vorgesehen (Bild 4, links). Mögliche Rippenverstärkungen auf der Schalenunterseite als Diagonalverband können zudem den Torsionswiderstand sowie die Struktursteifigkeit der dünnwandigen Schale erhöhen, wodurch zusätzlich die (effektive) Schalendicke reduziert werden kann [12].

For a structural concept of the concrete shell based on the *EuroTrough* module, an initial model was developed in the first phase which adapts the essential load-bearing mechanisms of barrel shells. In order to avoid additional warping, first 'ad hoc' optimisation approaches included edge strengthening on the long sides, tension ties with corresponding transverse strengthening on the backside of the shell at the quarter points and side bulkheads at the open ends of the parabolic shell, which at the same time guarantee a bearing in the centre of gravity of the shell (Fig. 4, left). Possible diagonal ribs on the backside of the shell can also increase the torsional stiffness as well as the structural rigidity of the thin-walled shell, which can additionally reduce the (effective) shell thickness [12].

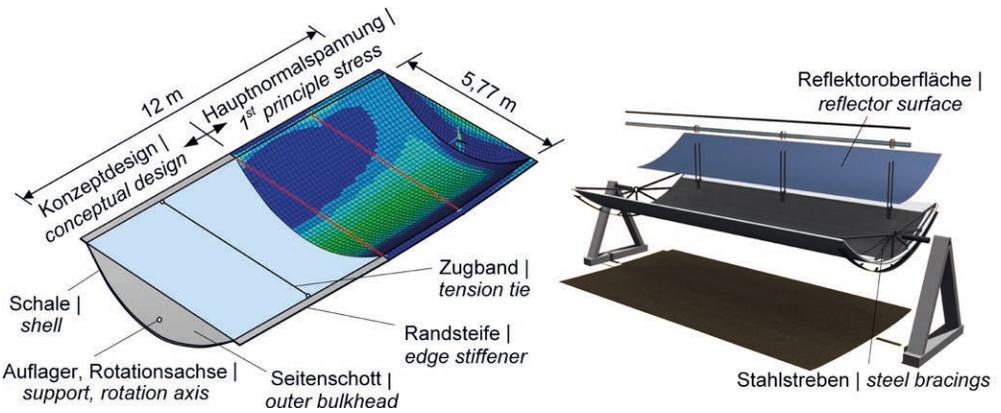


Bild 4: Strukturkonzepte; links: Tonnenschale, rechts: hybride Struktur mit Speichenradkonstruktion aus Stahl als Endauflager eines Moduls mit Rotationsachse im Schwerpunkt | **Fig. 4:** Structural concepts; left: barrel vault shell, right: hybrid structure with steel bracings for the support of a module with axis of rotation in the center of gravity

Zur Minimierung von Verschattungsverlusten durch die vollflächigen Seitenschotte können lokal hybride Konstruktionskonzepte herangezogen werden, bei denen primäre und sekundäre Strukturelemente material- und beanspruchungsspezifisch getrennt eingesetzt werden. Dazu wird bspw. die dünnwandige Betonschale schubfest mit einer Speichenradkonstruktion aus Stahlstreben als Endelement zur Lagerung verbunden (Bild 4, rechts). Der Verschattungseffekt des massiven Endschottes wird so wesentlich reduziert.

In order to minimise shading losses due to the fully enclosed side bulkheads, local hybrid design concepts can be used, in which primary and secondary structural elements are used separately for both material and loads. For this purpose, the thin-walled concrete shell is rigidly connected to a spoke wheel construction made of steel struts as an end element for bearing (Fig. 4, right). This significantly reduces the shading effect of the solid bulkhead.

Neben der Lagerung der Schalenstruktur im Schwerpunkt des Parabelquerschnitts wurde eine linienartige Abrolllagerung entwickelt. Hierbei verbleibt der Schwerpunkt des Parabelquerschnitts während des Abrollvorgangs auf einer horizontalen Achse, sodass rechnerisch keine mechanische Arbeit infolge Auf- oder Absenkens der Schale zu verrichten ist (Bild 5). Dazu werden an der Rückseite der Schale kreisförmige Sichelelemente appliziert, die auf einem Lagerelement mit der geometrischen Form einer verkürzten Zyklode abrollen. Mithilfe von ineinandergreifenden Zahnrädern wird ein Abrutschen der Schale verhindert. Dieses patentierte Lagerungskonzept [13] bildet die Grundlage für den Transfer auf Strukturen großer Aperturweite zur Erhöhung des Konzentrationsgrades, wie z. B. der 7,5 m × 24 m große *UltimateTrough* [8].

In addition to the bearing of the shell structure in the centre of gravity of the parabolic cross section, a linear roll-off bearing was developed. Thereby, the centre of gravity of the parabolic cross section remains on a horizontal line during the rolling process, so that no mechanical work is needed to raise or lower the shell (Fig. 5). For this purpose, circular sickle elements are applied to the back of the shell, which roll on a bearing element with the geometric shape of a reduced cycloid. Interlocking gears prevent the shell from slipping. This patented bearing concept [13] serves as a basis for structures with large aperture widths to increase the concentration ratio, such as the *UltimateTrough* with an aperture of 7.5 m × 24 m [8].

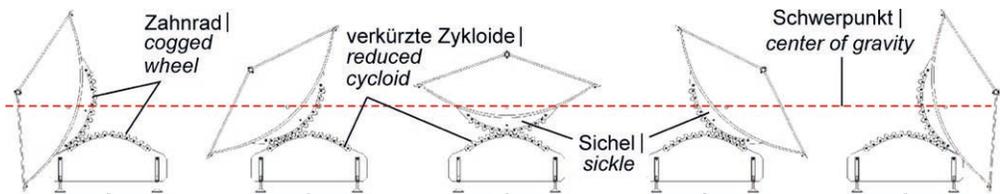


Bild 5: Prinzip der Abrolllagerung | Fig. 5: Principle of the rocker bearing mechanism

Zunehmende Aperturweiten erfordern allerdings erhöhte Wandstärken im Scheitel und an den Rändern, um eine entsprechende Struktursteifigkeit zu gewährleisten. Um gleichzeitig Material einzusparen, bietet es sich an, den Voll- in einen Hohlquerschnitt aufzulösen. Als Basiskonfiguration wurde ein Kollektormodul mit 10 m Aperturweite als vielzellige Hohlstruktur nach dem Prinzip einer Gitterschale [14], [15] mit Wandstärken von wenigen Zentimetern und oberer (Reflektorfläche) sowie unterer Schale entwickelt (Bild 6, links). In Längsrichtung wird hohe Struktursteifigkeit allein durch die mehrzellige Hohlkastenstruktur gewährleistet. Die Längsrippen in moderatem Abstand dienen überwiegend der Schubübertragung. Eine dichtere Anordnung erfolgt im Auflagerbereich mit annähernd punktueller Lasteinleitung an den Sichelrändern. In Querrichtung gewährleisten Rippen in vergleichsweise geringem Abstand die Quersteifigkeit, um die Formbeständigkeit der Parabel zu garantieren.

However, increased aperture widths require increased wall thicknesses at the vertex and edges to ensure structural stiffness. In order to save material at the same time, it is convenient to convert the full cross-section into a hollow cross-section. As a basic configuration, a collector module with an aperture width of 10 m was developed as a multi-core hollow structure according to the principle of grid shells [14], [15] with wall thicknesses of a few centimetres and an upper (reflector surface) as well as a lower shell (Fig. 6, left). In the longitudinal direction, high structural rigidity is ensured solely by the multi-core hollow structure. The longitudinal ribs in moderate spacing are mainly used for the transfer of shear loads. In contrast, a closer alignment is set in the supporting area with almost punctual load transfer at the sickle ends. In the transverse direction, ribs in comparatively small distances ensure the transverse rigidity to guarantee the deformation resistance of the

ren. Der mehrzellige Hohlkasten besitzt einen hohen Torsionswiderstand und reduziert über die Länge aufsummierte Verdrillungen stark.

Ein fertigungstechnisch leistungsfähigeres Designkonzept, welches das Konzept der mehrzelligen Gitterstruktur adaptiert, ist die Verwendung von Verdrängungskörpern (Bild 6, rechts). Die bereits im Hochbau verwendeten Hohlkörper in Form von rotationssymmetrischen Volumenkörpern wie z. B. Kugeln oder abgeflachte Ellipsoide werden zwischen der oberen und unteren Bewehrung angeordnet [16]–[18]. Solche Hohlkörper können zu Reihenmodulen bzw. Körben zusammengefasst werden, was eine einfache Installation während der Bauphase ermöglicht und den bei geometrisch komplexen Bauteilen aufwändigen Schalungsbau merklich reduziert. Der Anwendungstransfer auf Kollektormodule mit großen Aperturweiten gelingt dabei mit nur geringen Anpassungen im Vergleich zu einer Deckenkonstruktion. Dies betrifft sowohl die Schale selber durch ihre einachsige Krümmung gegenüber Platten als auch die Anpassung der Hohlkörper in Größe und Form aufgrund von meist verjüngenden Querschnitten der Parabol-schalenmodule zum Rand [19], [20]. Bei Verwendung bereits vorhandener Hohlkörperformen werden im Scheitelbereich vorwiegend Kugeln, am Parabelende vorzugsweise abgeflachte Ellipsoide eingesetzt (Bild 6, rechts).

parabola. The multi-core hollow structure has a high torsional stiffness and greatly reduces rotations accumulated over the collector length.

A more efficient design concept in terms of manufacturing technology, which adapts the concept of the multi-core grid structure, is the use of void formers (Fig. 6, right). The void formers, already used in building construction in the form of rotationally symmetrical elements such as spheres or flattened ellipsoids, are arranged between the upper and lower reinforcement [16]–[18]. Such void formers can be combined into row modules or baskets, which enables simple installation and noticeably reduces the costly formwork required for geometrically complex structures. The adaptation to collector modules with large aperture widths is possible with only minor adjustments compared to a slab. Both, the shell itself is affected by its uniaxial curvature compared to slabs as well as the adaptation of the void formers in size and shape due to mostly tapered cross-sections of parabolic shells [19], [20]. If already existing void formers are used, spheres are predominantly used in the vertex and flattened ellipsoids are preferred at the parabola edge (Fig. 6, right).

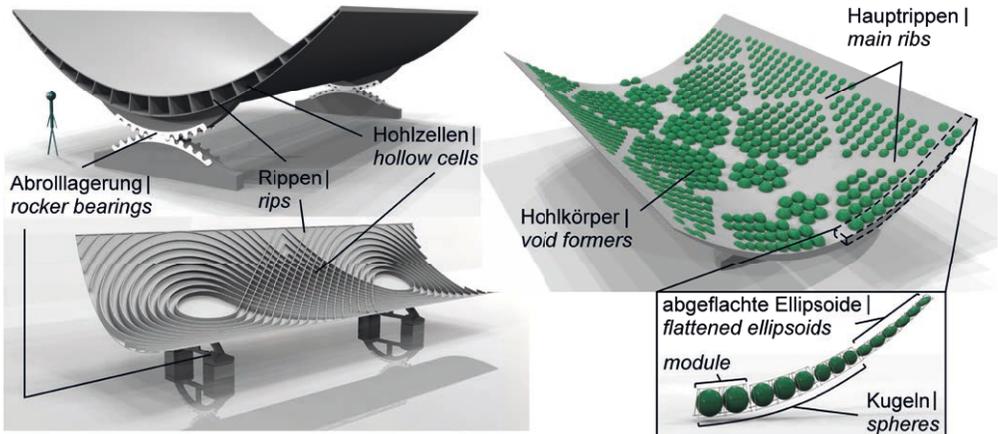


Bild 6: Strukturkonzepte für großformatige Kollektormodule; links: Rippen rechtwinklig zueinander oder dem Hauptspannungsverlauf folgend, rechts: mit Hohlkörpern | **Fig. 6:** Structural concepts for large-aperture collector modules; left: orthogonal stiffeners or acc. to the principle stresses, right: with embedded void formers (right)

5 Numerische Modellierung und Restriktionen (RUB)

Zur Simulation der Verformungen und Spannungen wurden parametrisierte Finite-Elemente-Modelle erstellt, welche sich an die entwickelten Strukturkonzepte nach Vorbild des *EuroTroughs* und an großformatigen Modulen mit Aperturweiten von ca. 10 m orientieren. Um die Reflektionsoberfläche unverzerrt wiederzugeben, wurde die virtuelle Schale bei kleinformatigen Modulen durch 8-knotige Kontinuumschalenelemente mit je 3 Translationsfreiheitsgraden je Knoten aufgebaut, wodurch Dickenänderungen auf die Unterseite der Schale verlegt werden können. Die Randverstärkungen, Seitenschotte sowie äußere Rippenverstärkungen (Quer- und/oder Diagonalaussteifungen) wurden mit 4-knotigen ebenen Schalenelementen mit je 3 Translations- und Rotationsfreiheitsgraden je Knoten modelliert. Die Zugbänder bestehen aus 3D-Stebelementen (vgl. Bild 4, links).

Großformatige Module mit Hohlzellen wurden mit 4-knotigen, ebenen Schalenelementen und reduzierter Integration modelliert. Da nur geringe Wandstärken vorhanden sind, werden sie sowohl für die Deckschichten als auch für die Rippen in Form eines Mittellinienmodells mit Überlappung verwendet. Für Modelle mit integrierten Hohlkörpern werden über den Querschnitt Layer angeordnet, sodass der Effekt integrierter Hohlkörper verschmiert über die Höhe durch effektive Steifigkeitswerte berücksichtigt werden kann. Die an der Unterseite der Schale applizierten, kreisförmigen Sichel-elemente wurden ebenfalls mit den bereits beschriebenen ebenen Schalenelementen modelliert und für die Definition der Auflagerbedingungen zwischen Sichel und Lagerelement herangezogen (Bild 7).

Materielle Restriktionen ergaben sich durch Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul sowie v. a. aus der zentrischen Zugfestigkeit des Betons, um große Verformungen infolge eines gerissenen Zustands II zu vermeiden. Die numerisch angesetzten Materialparameter wurden an der TU Kaiserslautern experimentell ermittelt

5 Numerical modelling and restrictions (RUB)

For the simulation of deformations and stresses, parameterised finite element models were developed, which are based on the geometrical parameters of the *EuroTrough* and large-scale modules with an aperture width of approx. 10 m. In order to build up the reflective surface undistorted, the virtual shell of small-scale modules was modelled by 8-noded continuum shell elements with 3 degrees of freedom of translation per node, whereby thickness changes can be transferred to the backside of the shell. The edge stiffeners, side bulkheads and outer ribs (transverse and/or diagonal stiffeners) were modelled with 4-noded shell elements with 3 degrees of freedom in translation and rotation per node. The tension ties consist of 3D truss elements (cf. Fig. 4, left).

Large-scale modules with hollow cores were modelled with 4-node shell elements and reduced integration. Since only small thicknesses occur, they are used for both the cover layers and the ribs as a midline model with overlap. For models with integrated void formers, layers are arranged over the cross-section so that the effect of integrated void formers is smeared over the height and is integrated by effective stiffness values. The circular sickle elements applied to the backside of the shell were also modelled with the shell elements already described and used to define the support conditions between the sickle and the bearing element (Fig. 7).

Material restrictions are based on the compressive strength and the modulus of elasticity as well as the axial tensile strength of the concrete in order to avoid large deformations due to a cracked state II. The numerically applied material parameters were determined experimentally at the TU Kaiserslautern (Table 1). The restrictive, effective axial tensile strength [12], [21] was derived from the bending tensile strength. For operating state, the cross-section must remain mathematically in a non-cracked state, so that the numerical simulation is based on a linear-elastic material model. On the geometric

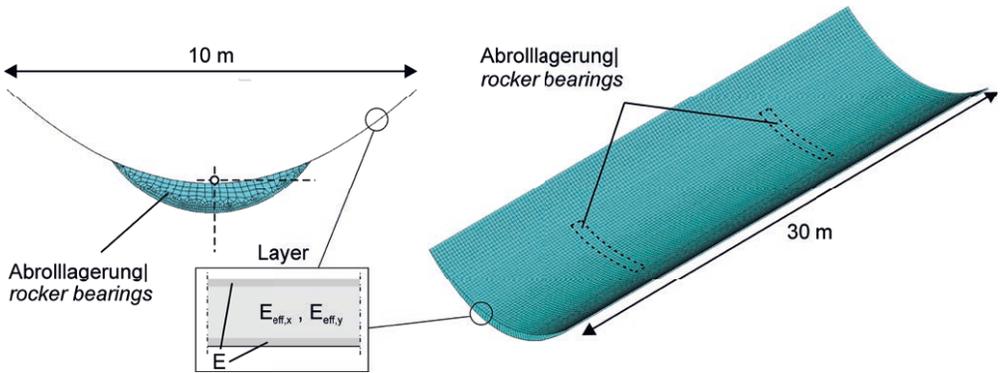


Bild 7: Numerisches Modell für großformatige Kollektormodule mit Layeransatz | **Fig. 7:** Numerical model for large-scale collector modules with layered cross-section

Parameter Parameter	Wert Value	Modellanwendung Use in the model
Elastizitätsmodul Young's modulus	47.600 N/mm ²	x
Biegezugfestigkeit Flexural tensile strength	15 N/mm ²	
Zylinderdruckfestigkeit Cylinder compressive strength	109 N/mm ²	
Dichte Density	2524 kg/m ³	x
Zentrische Zugfestigkeit Axial tensile strength f_{ct}	7,75 N/mm ²	
Effektive zentrische Zugfestigkeit Effective axial tensile strength $\alpha_{ct,pl} \cdot f_{ct}$	6,20 N/mm ²	x

Tabelle 1: Festbetoneigenschaften (Mittelwerte) von Nanodur® (TU Kaiserslautern) und Zuordnung der Parameter auf Modellebene | **Table 1:** Mean values of the hardened Nanodur® concrete (TU Kaiserslautern) and parameters used for numerical analysis

(Tab. 1). Die restriktive, effektive zentrische Zugfestigkeit [12], [21] wurde aus der Biegezugfestigkeit bestimmt. Für den Betriebszustand ist ein Verbleiben des Querschnitts im Zustand I rechnerisch zu gewährleisten, sodass die numerischen Untersuchungen auf einem linear-elastischen Materialmodell beruhen. Auf geometrischer Ebene resultieren Restriktionen aus den Anforderungen an die Verformungsarmut aufgrund der optischen Wirksamkeit, sodass geometrische Nichtlinearitäten, also große Verformungen, unberücksichtigt bleiben.

6 Spezifische Einwirkungen (RUB)

Bei Parabolrinnenkollektoren sind verschiedenste Beanspruchungsszenarien zu beachten:

- Eigen- und Windlasten (wegen der Sonnennachführung im Tagesverlauf auslenkungsbedingt),

level, restrictions result from the requirements for low deformation due to the optical efficiency, so that geometric nonlinearities, i.e. large deformations, are not considered.

6 Specific action effects (RUB)

For parabolic trough collectors, a wide variety of specific action effects have to be considered:

- dead and wind loads (variable due to sun tracking during the course of the day),
- initial pre-deformations from manufacturing processes (surface quality, waviness of the mirror elements, etc.),
- deformations from material-related time-dependent creep and shrinkage processes,
- non-linear transient temperature constraints due to high temperature differences in the course of day and year (especially in desert regions).

- initialen Vorverformungen aus Herstellungsprozessen (Oberflächengüte, Welligkeit der Spiegelemente etc.),
- Verformungen aus materialbedingten zeitabhängigen Kriech- und Schwindprozessen,
- nichtlineare instationäre Temperaturbeanspruchungen durch hohe Temperaturunterschiede im Tages- und Jahresverlauf (v. a. in Wüstenregionen).

Generell wird dabei unterschieden in:

- Betriebszustand: unter gemäßigten Windbedingungen wird eine maximale Solarstrahlkonzentration sichergestellt,
- Überlebenszustand: bei einem Böenstaudruck, der einer 50-jährigen Wiederkehrperiode genügt, wird der Kollektor aus dem Wind in Schutzposition (nach oben geöffnete Parabel) gedreht.

In general, a distinction is made between:

- operating state: a maximum solar radiation concentration is ensured under moderate wind conditions,
- survival state: at a gust pressure that is sufficient for a 50-year return period, the collector is turned into a survival position (parabola opened upwards).

6.1 Wind loads from wind tunnel tests (RUB)

Standardised wind load approaches, e.g. of the Eurocode, are usually considered conservative, as they are subjected to major simplifications for a generally valid design. For this reason, sufficiently modelled wind tunnel tests are common for special structures in order to obtain precise wind pressure distributions on the structure. To determine the very specific, quasi-static loads on parabolic trough collec-

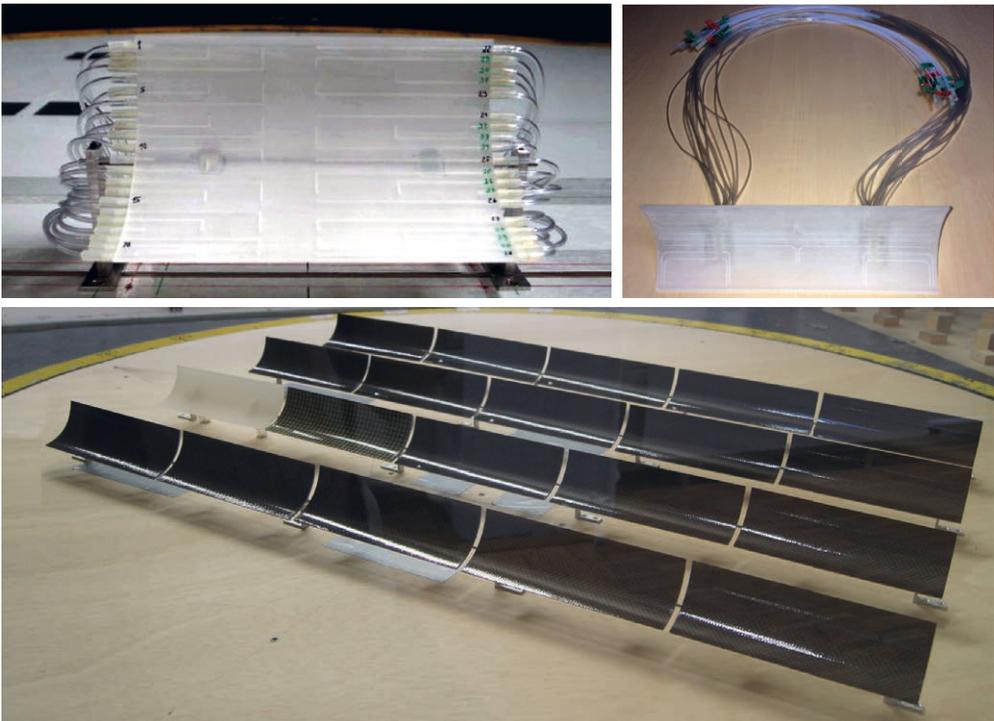


Bild 8: Windkanaluntersuchungen an skalierten, kleinformatigen (oben links) und großformatigen Kollektormodulen als Solist (oben rechts) und in Gruppenanordnung (unten) | **Fig. 8:** Wind tunnel tests on small-scaled (top left) and large-aperture collector modules as a solitary (top right) or in array arrangement (bottom)

6.1 Windwirkungen aus Windkanaltests (RUB)

Normativ geregelte Windlastansätze, z. B. des Eurocodes, gelten meist als konservativ, da sie für eine allgemeingültige Auslegung großen Vereinfachungen unterworfen sind. Daher sind für Sonderbauwerke hinreichend genau modellierte Windkanaluntersuchungen erlaubt, um genaue Winddruckverteilungen auf das Tragwerk zu erhalten. Zur Bestimmung der sehr bauteilspezifischen, quasi-statischen Beanspruchungen auf Parabolrinnen-Kollektormodule wurden umfangreiche Tests im Windkanal der Ruhr-Universität Bochum an skalierten kleinformatigen (Phase I) [22]–[26], großformatigen solitären (Phase II) sowie in Gruppenanordnung an verschiedenen Stellen positionierten (Phase II) *Rapid-Prototyping*-Modellen durchgeführt (Bild 8) [27]. Variationen waren (Bild 9):

- Kollektormodule als Solist (M 1 : 75, 1 : 150) und in Gruppenanordnung (M 1 : 150),
- Gruppenanordnung, Module am Rand und in der Mitte (jeweils Reihen 1–4),
- Windanströmungsrichtung β bzgl. Kollektorachse 0° – 180° (15° -Abstufung), Solomodul und Gruppenanordnung,
- Anstellwinkel φ : 0° (geöffnet in den Wind, \triangleq Morgen- bzw. Abendstellung), 30° , 45° , 60° , 90° (\triangleq Mittagsstellung, nach oben offen) als Solist und in Gruppenanordnung.

Die Herstellung der Modelle erfolgte mittels Stereolithographie, einer 3D-Drucktechnik mit hoher Auflösung und Präzision, welche besonders für die Ausbildung der Druckluftkanäle mit Durchmessern im Millimeterbereich erforderlich war. Durch gezielte Führung der Druckluftkanäle zu den Auflagern konnte die Messtechnik so angeschlossen werden, dass Störeffekte am Rand (Phase I, Bild 8, oben links) vermieden werden. Für das kleinformatige Modul sind die Druckmesspunkte der Vorder- und Rückseite auf getrennten Hälften angeordnet, so dass nur für die Modellhalbierende vergleichbare Druckdifferenzen für korrespondierende Druckmessstellen auf Vorder- und Rückseite ausgewertet werden konnten. Bei reihenartiger Anordnung einzelner Module zu Kollektoren können für die

tor modules, detailed tests were carried out in the wind tunnel of the Ruhr University Bochum on scaled small-scale (phase I) [22]–[26], large-scale solitary (phase II) and grouped (phase II) *rapid prototyping* models at various positions (Fig. 8) [27]. The variations were (Fig. 9):

- solitary collector modules (scale 1 : 75, 1 : 150) and in group arrangement (scale 1 : 150),
- modules at the edge and in the middle (rows 1–4), group arrangement,
- wind flow direction β with respect to collector axis 0° – 180° (15° graduation), solitary module and group arrangement,
- pitch angle φ : 0° (open to the wind attack, \triangleq morning or evening position), 30° , 45° , 60° , 90° (\triangleq noon position, open to the top), solitary module and group arrangement.

The models were produced using stereo-lithography, a 3D printing technique with high resolution and precision, which was particularly required for generating compressed air pipes with diameters in the range of millimetres. Wind flow disturbances at the edge (phase I, Fig. 8, top left) could be avoided by directing the compressed air pipes directly to the supports, where the measuring technique is connected (Fig. 8, centre). For the small-scale module, the pressure taps at the front and back sides are arranged on separate halves, so that comparable pressure differences for corresponding pressure taps could only be evaluated for the centre line. If single modules are arranged in rows to form collectors, the pressure coefficients can be assumed to be constant in the longitudinal direction for the middle position. Separate measurements in phase II were necessary to determine the pressure effects on the edge modules of a solar field.

By means of extreme value statistics, dimensionless, equivalent net pressure coefficients $c_{p,net}$ were generated from the resulting measured pressure over time, which are derived from the superposition of the pressure coefficients from front and back [28]. For the transfer to the real structure, similar conditions must exist, which are given by a true-to-scale adaptation of essential parameters of the wind flow, such as scale

mittleren Module die Druckbeiwerte als konstant in Längsrichtung angesehen werden. Für die Erfassung der Beanspruchungen von Randmodulen eines Solarfeldes waren gesonderte Messungen in Phase II nötig.

Mittels Extremwertstatistik wurden aus den gemessenen Druckzeitreihen dimensionslose, äquivalente Netto-Druckbeiwerte $c_{p,net}$ generiert, welche die Überlagerung der Druckbeiwerte von Vorder- und Rückseite beschreiben [28]. Zur Übertragbarkeit auf das reale Tragwerk müssen ähnliche Bedingungen vorherrschen, was durch eine maßstäbliche Anpassung wesentlicher Parameter des Strömungsvorgangs, wie der geometrische und zeitliche Maßstab, gegeben ist. Mithilfe der Taylor-Hypothese lässt sich der geometrische Maßstab proportional zum zeitlichen Maßstab setzen, wodurch äquivalente 10-Minuten-Böenintervalle im Windkanal bestimmt werden können [29]. Die gemessenen Druckdifferenzen werden dann

of geometry and time. By means of the Taylor hypothesis the geometric scale can be set proportional to the time scale, whereby equivalent 10-minute gust intervals in the wind tunnel are determined [29]. The measured pressure differences are then converted into pressure coefficients and split into equivalent 10-minute gusts. Each of these intervals has a maximum or minimum, which are described by an extreme value distribution according to Gumbel. In order to generate pressure coefficients sufficient for a 50-year return period, 78%-quantiles were determined with respect to Cook [28]. Similar wind tunnel tests [30] show good agreement. The pressure coefficients determined for the small-scale collector module can be assumed to be constant over the entire module length (Fig. 9, left) and simulate middle positions in the first (or last) row of a solar field with frontal wind attack ($\beta = 0^\circ$). For large-scale collector modules, distributions of the pressure coefficients over the entire module length can be derived and shadow-

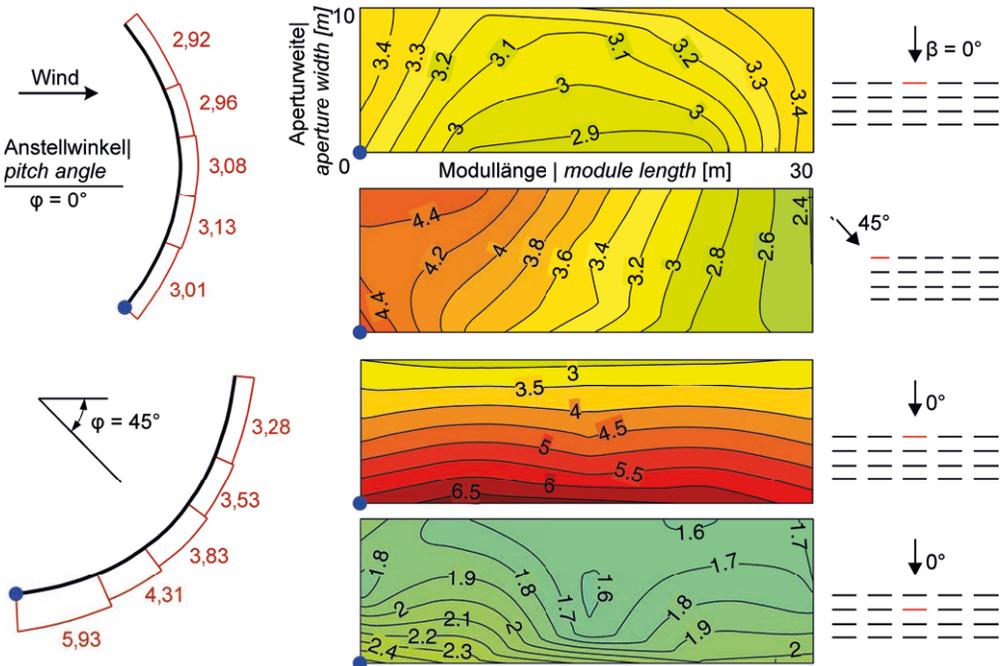


Bild 9: Verteilung der Netto-Druckbeiwerte für kleinformatige (links) und großformatige Kollektormodule (Mitte, rechts) bei ausgewählten Szenarien von β und ϕ | **Fig. 9:** Net pressure coefficients for small-scaled (left) and large-aperture collector modules (right) for selected angle scenarios of β and ϕ

in Druckbeiwerte umgerechnet und für eine Auswertung mittels Fraktilwert-Methode in äquivalente 10-minütige Böen unterteilt. Diese Intervalle haben jeweils ein Maximum bzw. Minimum, die einer Extremwertverteilung nach Gumbel unterworfen werden. Um Druckbeiwerte zu generieren, die einer 50-jährigen Wiederkehrperiode genügen, wurden nach Cook 78-%-Fraktilwerte bestimmt [28]. Ähnliche Windkanalversuche [30] zeigen eine gute Übereinstimmung. Die ermittelten Druckbeiwerte für das kleinformatige Kollektormodul können als konstant über die gesamte Modullänge angesetzt werden (Bild 9, links) und simulieren mittlere Positionen in erster (bzw. letzter) Reihe eines Solarfeldes bei frontaler Anströmung ($\beta = 0^\circ$). Für großformatige Kollektormodule können Verteilungen der Druckbeiwerte über die gesamte Modullänge angegeben sowie deutliche Windverschattungseffekte abgeleitet werden, die eine Typeneinstufung von Modulen innerhalb eines Solarfeldes erlaubt (Bild 9, rechts).

Zur Ermittlung von Windlasten w müssen die Druckbeiwerte mit dem Böenstaudruck in einer Referenzhöhe von 10 m multipliziert werden. Für den Betriebszustand wird ein Staudruck $q = 0,18 \text{ kN/m}^2$ angesetzt, was einer Windgeschwindigkeit von $v = 17 \text{ m/s}$ mit einer Windstärke von 7 Bft entspricht. Im Überlebenszustand herrscht eine Windstärke von 12 Bft ($v = 33 \text{ m/s}$) mit einem Böenstaudruck von $q = 0,68 \text{ kN/m}^2$.

Bild 10 zeigt exemplarisch die numerisch ermittelten maximalen bzw. minimalen Querbiegemomente m_{xx} über den Auflagern (Schnitte A-A, B-B) für Anstellwinkel $\varphi = 0^\circ$ und 60° infolge reiner Windbelastung für die Reihen R1–4 sowie eine Normierung auf die Maximal- bzw. Minimalwerte (M+ und M-) der ersten Reihe mit Anstellwinkel 0° . Windverschattungseffekte sind ab Reihe 2 zu erkennen, gekennzeichnet durch deutlich geringere Biegebeanspruchungen. Ähnliche Effekte lassen sich auch für die Anstellwinkel 45° und 90° ableiten. Kollektormodule am Rand erfahren eine eindeutige antimetrische Beanspruchung und sind gesondert zu untersuchen. Eine ganzheitliche Auswertung der Windkanalversu-

ing effects can be identified that allow modules to be classified within a solar field (Fig. 9, right).

In order to determine wind loads w , the pressure coefficients must be multiplied by the gust pressure at a reference height of 10 m. For the operating state, a resulting wind pressure $q = 0.18 \text{ kN/m}^2$ is assumed, which corresponds to a wind speed of $v = 17 \text{ m/s}$ equivalent to 7 Bft. In the survival state a Beaufort number of 12 ($v = 33 \text{ m/s}$) with a wind pressure of $q = 0.68 \text{ kN/m}^2$ is estimated.

Fig. 10 shows an example of the numerically determined maximum and minimum transverse bending moments m_{xx} at the supports (sections A-A, B-B) for pitch angles $\varphi = 0^\circ$ and 60° due to pure wind load for the rows R1–4 as well as a normalisation to the maximum and minimum values (M+ and M-) of the first row with a pitch angle of 0° . Shadowing effects can be detected from row 2 onwards, characterized by significantly lower bending moments. Similar effects can also be derived for the pitch angles of 45° and 90° . Collector modules at the edge clearly have antimetric loading and have to be analysed separately. A holistic evaluation of the wind tunnel tests [27] has shown that the solar field can be divided into three types:

- Type 1: collector modules in the first and last two rows with maximum wind loads predominantly from frontal (0°) and rear wind direction (180°),
- Type 2: modules at the solar field edge with non-uniform load and maximum values predominantly from a wind direction of 45° or 135° ,
- Type 3: modules in the centre of the solar field (usually from the third row onwards) with wind loads at least approx. 20% lower than type 1.

Wind flow directions between 45° and 135° are of minor importance.

6.2 Temperature constraints from climate data (RUB)

An economically reasonable operation of parabolic trough power plants is only possible at locations with a high annual direct solar irradi-

che [27] hat gezeigt, dass das Solarfeld in drei Typen eingeteilt werden kann:

- Typ I: Kollektormodule in den ersten und letzten beiden Reihen mit maximalen Windbeanspruchungen überwiegend aus frontaler (0°) und rückseitiger Windanströmung (180°),
- Typ II: Module am Solarfeldrand mit ungleichmäßiger Beanspruchung und Maximalwerte überwiegend aus einer Windanströmung von 45° bzw. 135° ,
- Typ III: Module innerhalb des Solarfeldes (meist ab der dritten Reihe) mit Windbeanspruchungen mindestens ca. 20 % geringer als bei Typ I.

Windanströmungsrichtungen zwischen 45° und 135° sind untergeordnet.

6.2 Temperaturbeanspruchung aus Klimadaten (RUB)

Ein wirtschaftlich sinnvoller Betrieb von Parabolrinnenkraftwerken ist lediglich an Standorten mit einer hohen jährlichen, direkten Solareinstrahlung möglich. Dies sind i. d. R. Orte, an denen hohe Temperaturen und meist auch Temperaturschwankungen vorherrschen wie z. B. in Wüsten. Dies führt zu einem ständigen Wechsel von Wärmezufuhr und -abfuhr und folglich zu instationären Temperaturfeldern im Tragwerk. Dabei ist ein Parabolrinnenkollektor den äußeren Witterungsbedingungen ausgesetzt, welche sich auf die Temperatur im und am Bauteil auswirken. Dieses instationäre nichtlineare Wärmeübertragungsproblem aus Wärmeleitung, kurzwelliger Sonneneinstrahlung und langwelliger Einstrahlung aus der Umgebung wurde basierend auf einem Ansatz von Temperaturverteilungen an Brückentragwerken [31] aus der Fourier'schen Differentialgleichung der Wärmeleitung hergeleitet, numerisch diskretisiert und via expliziter Zeitintegration in der Umgebung einer Tabellenkalkulation umgesetzt [32]. Mithilfe der klimatischen Randbedingungen für einen typischen Standort von Parabolrinnenkraftwerken wurde die Temperaturbeanspruchung in einer 5 cm dicken Schale simuliert und als konstante Temperaturschwankung ΔT_N und linearer Temperaturgradient ΔT_M ausge-

ation. These are usually places where high temperatures and mostly high fluctuations of temperature prevail, e.g. in deserts. This leads to a constant change of heat and consequently to transient temperature fields in the structure. A parabolic trough collector is exposed to weather conditions, which affect the temperature in and on it. This results in a transient nonlinear heat transfer problem due to heat conduction, short-wave solar radiation and long-wave radiation from the environment, which was derived by means of the Fourier differential equation of

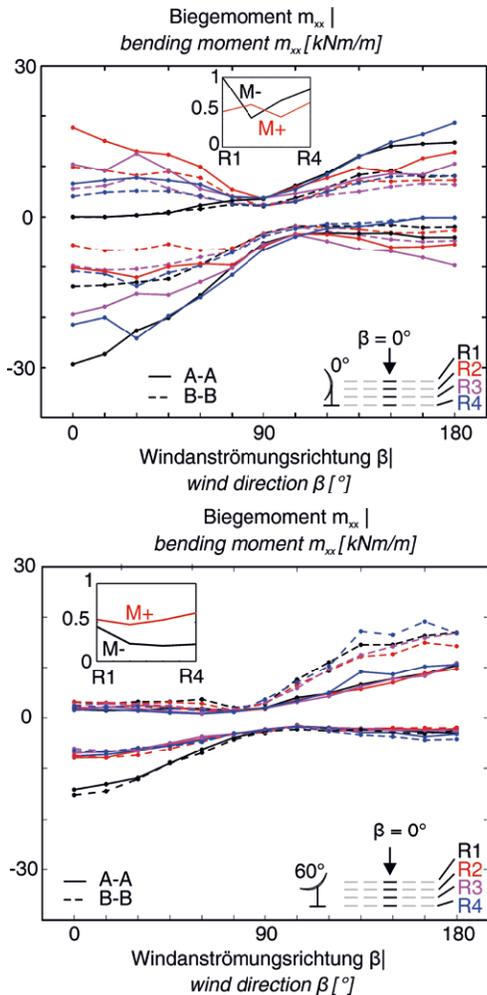


Bild 10: Maximale Querbiegemomente m_{xx} der Reihen R1–4, Anstellwinkel $\varphi = 0^\circ$ und 60° | Fig. 10: Maximum bending moment m_{xx} about longitudinal axis for a pitch angle of 0° and 60° in rows 1 to 4

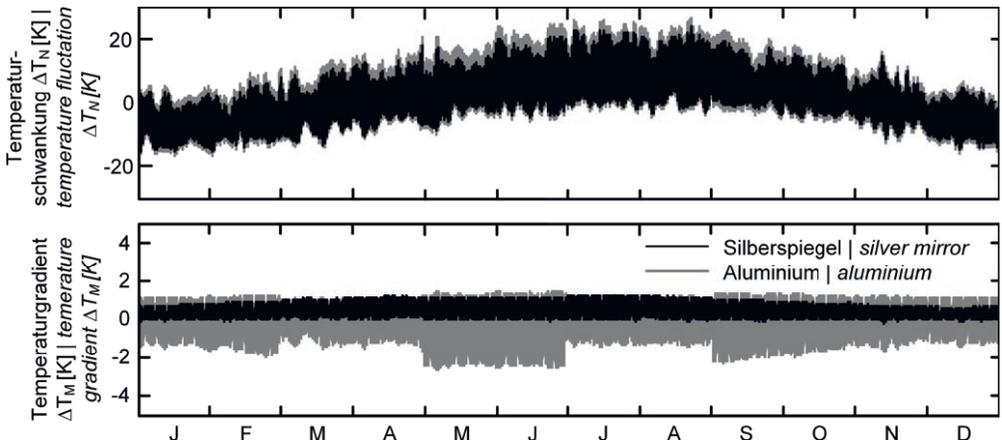


Bild 11: Numerisch simulierte Temperaturbeanspruchungen in der Parabolschale | Fig. 11: Numerically simulated temperature constraints in collector module's cross-section

wertet. Bild 11 zeigt die Ergebnisse für ein Jahr mit dem Ansatz eines Reflektors als Silber- oder Aluminiumspiegel. Eine ausführliche Herleitung ist in [12] gegeben. Daraus resultiert ein konservativer, einhüllender Lastansatz mit einer konstanten Temperaturschwankung von $\Delta T_N = \pm 30$ K und einem linearen Temperaturgradienten von $\Delta T_M = \pm 5$ K, welche aufgrund fehlender Korrelation zusätzlich in Anlehnung an [33] gewichtet werden.

6.3 Zeitabhängige Verformungen (RUB)

Initiale Vorverformungen sollen ungewollte herstellungsbedingte Initialabweichungen zur idealen Parabelform berücksichtigen. Diese sind als Fluktuation eines homogenen, isotropen Zufallfeldes [34] abbildbar, welche mithilfe einer Autokovarianzfunktion über diskrete Punkte der Parabelöffnungsweite korreliert und so eingestellt wurden, dass sie, nach praxisüblichen Anforderungen an Tübbinge [35] hauptsächlich im Bereich von $\pm 0,5$ mm über eine Einflusslänge von 0,5 m streuen [24].

Untersuchungen zu den Auswirkungen von zeitabhängigen Kriech- und Schwindverformungen haben gezeigt, dass diese von untergeordneter Bedeutung für die Strahlenkonzentration sind. Schwinden bewirkt eine geringe, kontinuierliche Stauchung des Parabelquerschnitts und kann durch Wärmebehandlung frühzeitig zum Stoppen gebracht werden [36]. Aufgrund der

heat conduction based on an approach of temperature distributions on bridge structures [31], numerically discretized and implemented via explicit time integration in the environment of a spreadsheet [32]. Using the climatic boundary conditions for a typical location of parabolic trough power plants, the temperature constraints in a 5 cm thick shell was simulated and determined to a constant temperature fluctuation ΔT_N and a linear temperature gradient ΔT_M . Fig. 11 shows the results for one year with the approach of a reflector as a silver or aluminium mirror. A detailed derivation is given in [12]. This results in a conservative, enveloping temperature approach with a constant fluctuation of $\Delta T_N = \pm 30$ K and a linear gradient of $\Delta T_M = \pm 5$ K, which are additionally weighted according to [33] due to a lack of correlation.

6.3 Time-dependent deformations (RUB)

Initial pre-deformations consider unintended initial deviations from the ideal parabolic shape due to the manufacturing process. They are generated as fluctuation of a homogeneous, isotropic random field [34], which is correlated by means of an auto-covariance function via discrete points of the parabola aperture width and adjusted in such a way that they mainly scatter in the range of ± 0.5 mm over an influence length of 0.5 m [24], according to the usual requirements for tunnel lining segments [35].

Sonnennachführung stellen sich veränderliche Lastzustände aus Eigengewicht ein, die sich gegenseitig aufheben und daher kaum Kriechverformungen hervorrufen. In der Theorie können Kriechprozesse so rechnerisch vollständig ausgeschaltet werden. Eine ausführliche Darstellung der Modellansätze für die zeitlichen Verformungen [37], speziell von Parabolschalen aus Beton, ist in [22], [24] gegeben.

7 Optimierungsstrategien (RUB)

Die entwickelten Optimierungsstrategien beinhalten bewusst mehrere Ebenen. Ausgewählte Elemente waren:

Konzeptebene:

- Bestimmung von geometrischen Randbedingungen wie Aperturweite, Fokallänge, Modulänge, Absorberrohrbefestigung etc.
- Festlegung von Lagerungspunkten, Drehpunkt, Antriebstechnik etc.
- Anordnung von Sekundärelementen wie Zugbändern, Aussteifungen, Seitenschotte etc.

Strukturebene:

- Entwicklung einer Schalenstruktur mit minimalem Volumen und hoher Steifigkeit
- Bestimmung von minimalen Wandstärken, Querschnittsverlauf etc.
- Ableitung von minimalen Querschnitten und optimierter Lage der Sekundärelemente

Detailebene:

- Ableitung von Lösungen zur punktuellen Lasteinleitung
- Konzepte zum Anschluss der Sekundärelemente (z. B. Zugbänder als Durchspannung mit Endverankerung)
- Entwicklung von Elementen zur Auflagerung bzgl. der Sonnennachführung: Ausbildung von Seitenschotten, Abrollsicheln, Abrollhügel, Zahnräder etc.

Die Optimierungsstrategien berücksichtigen die zuvor beschriebenen spezifischen Einwirkungen in geeigneter Kombination und werden durch parallel verlaufende fertigungstechnische

Investigations of the effects of time-dependent creep and shrinkage deformations have shown that they are of secondary importance for the solar ray concentration. Shrinkage causes a slight, continuous swell of the parabolic cross-section and can be stopped early by heat treatment [36]. Due to the tracking of the sun, variable load conditions arise from dead load, which partially neutralise each other and therefore cause hardly any creep deformations. Thereby, creep processes can be completely eliminated theoretically. A detailed description of the model approaches for time-related deformations [37], especially for parabolic shells made of concrete, is given in [22], [24].

7 Optimisation strategies (RUB)

The developed optimization strategies contain several levels. Selected items are:

Concept level:

- Determination of geometric boundary conditions such as aperture width, focal length, module length, mounting of absorber tubes, etc.
- Definition of bearing positions, pivot points, drive technology, etc.
- Arrangement of secondary elements such as tension ties, stiffeners, bulkheads, etc.

Structure level:

- Development of a shell structure with minimal volume and high stiffness
- Determination of minimum wall thicknesses, cross-sectional shapes, etc.
- Derivation of minimal cross-sections and optimized arrangement of secondary elements

Detail level:

- Derivation of structural solutions for pointwise loadings
- Concepts for connecting the secondary elements (e.g. tension ties with anchors)
- Development of supporting elements with respect to the sun tracking: design of bulkheads, roll-off sickles, roll-off mounds, gear wheels etc.

(Schalungstechnik, Bewehrungstechnik etc.) sowie betontechnologische Untersuchungen (Betonzrezeptur, Verarbeitbarkeit etc.) begleitet.

7.1 Strukturoptimierung

Im entwickelten Verfahren zur Strukturoptimierung mit anfänglich gradientenbasierten Methoden ist die multikriterielle Problemstellung – ein sowohl leichtgewichtiges auch verformungsarmes Tragwerk – aufgelöst worden, indem eine Minimierung des Volumens die alleinige Zielfunktion beschreibt und die erforderliche Systemsteifigkeit innerhalb einer nachgeschalteten Genauigkeitsprüfung der Schaleninnenfläche sichergestellt wird [24]. Verschiedene nacheinander durchlaufene Beanspruchungsszenarien in Abhängigkeit der Kollektorauslenkung beschränken den Optimierungsprozess. Restriktionen sind im Wesentlichen die Beschränkung der Hauptspannungen auf die zentrische Zugfestigkeit des Betons. Kollektorauslenkungen von 45° und 60° sowie, eher untergeordnet, 0° sind maßgeblich für den Optimierungszyklus und führen in Kombination mit dem Eigengewicht zu ungünstigen Verformungen der Schaleninnenfläche sowohl für kleinformatige als auch für großformatige Kollektormodule.

7.1.1 Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse mit nachgeschalteter Formoptimierung

Um dem Anspruch einer leichtgewichtigen und gleichzeitig verformungsarmen Tragstruktur gerecht zu werden, wurden im Formfindungsprozess für Parabolschalen nach geometrischem Vorbild des *EuroTroughs* Schalentragwerke mit äußeren, linienartigen Versteifungen – auch im Hinblick auf die Herstellung – entwickelt, da das Volumen maßgeblich durch die Schalendicke definiert ist und durch eine rippenartige Verstärkung die Eigenlast reduziert werden kann, ohne verhältnismäßig hohe Steifigkeitsverluste zu erhalten. Durch die äußeren Versteifungen wurden somit auch die Freiwerte bzw. Optimierungsvariablen erhöht, sodass ein gradientenbasierter Optimierungsprozess um eine Voroptimierung auf Basis des „Metamodells Optimaler Prognosefähigkeit“ (MOP)

The optimisation strategies consider the specific actions described above in a suitable combination and are complemented by parallel manufacturing (formwork technology, reinforcement technology, etc.) and concrete technology investigations (concrete mixture, workability, etc.).

7.1 Structural optimisation

Within the developed methods for structural optimization with initially gradient based methods, the multi-criterial problem – both a lightweight and a low-deformation structure – has been solved by minimizing the volume, describing the objective function and ensuring the required system stiffness by means of a subsequent accuracy analysis of the inner shell surface [24]. Various load scenarios according to the collector deflection constrain the optimization process. Restrictions are essentially the limitation of the main stresses to the axial tensile strength of the concrete. Collector deflections of 45° and 60° and, rather negligible, 0° are significant for the optimization cycle and, in combination with the dead weight, lead to decisive deformations of the inner shell surface for both small-scale and large-scale collector modules.

7.1.1 Variance-based sensitivity analysis with subsequent shape optimisation

In order to fulfil the demands for a lightweight and at the same time low-deformation structure, within the form finding process parabolic shells according to the geometry of the *EuroTrough* were developed with linear ribs at the shells backside – also with regard to manufacturing – since the volume is defined mainly by the shell thickness. Thus, the dead load can be reduced by outer ribs without losing significant rigidity. Due to the additional ribs, the optimization variables increased, so that a gradient based optimisation process was extended by a pre-optimisation based on the ‘Metamodel of Optimal Prognosis’ (MOP) [38]. Using stochastic samplings, e.g. *Latin Hypercube*, the responses of the structure are approximated using meta-models. In addition, a variance-based sen-

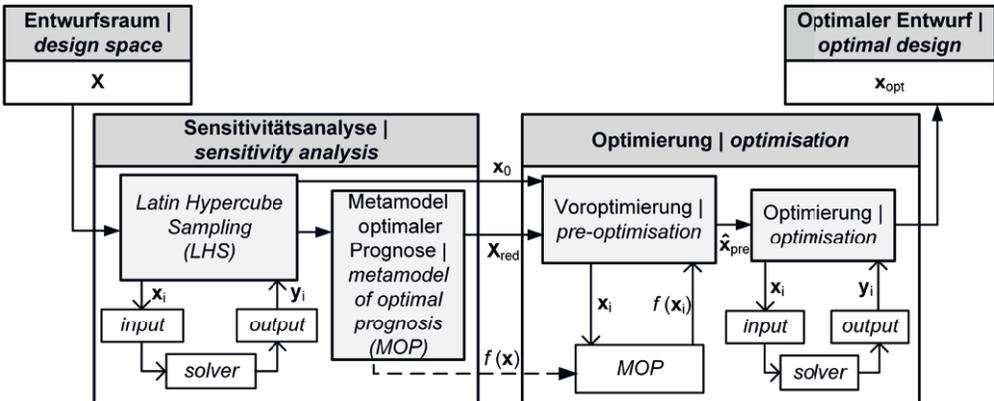


Bild 12: Ablaufdiagramm des sensitivitätsbasierten Optimierungsprozesses | Fig. 12: Sensitivity based optimisation process

[38] erweitert wurde. Mittels stochastischer Samplingverfahren, z. B. *Latin Hypercube Sampling*, werden dazu die Systemantworten des Tragwerks mithilfe von Approximationsfunktionen angenähert. Zusätzlich werden durch eine varianzbasierte Sensitivitätsanalyse, welche die Prognosefähigkeit einzelner Freiwerte auf die Systemantworten bewertet, wesentliche Freiwerte identifiziert und somit der Freiwerteraum eingrenzt. Auf Ebene der analytischen Approximationsmodelle erfolgt dann eine erste Voroptimierung. Das so generierte analytische Optimum dient dann als Startwert für den rechnerisch aufwändigeren Optimierungsprozess auf numerischer Ebene (Bild 12). Analysen unterschiedlicher Aussteifungskonzepte, welche stets eine kreuzende Diagonalaussteifung auf Schalenrückseite als Primärverstärkung besitzen, zeigen, dass eine Massenreduktion von 20–30 % im Verhältnis zum vollwandigen Schalenmodell bei gleichzeitiger Einhaltung der geforderten Oberflächengenauigkeiten möglich ist [12].

7.1.2 Innere Strukturfindung

Bei großformatigen Kollektormodulen wird eine erhöhte Querstruktursteifigkeit durch eine Vergrößerung des inneren Hebelarms von den Struktur längsrandern zum Scheitel erzielt. Unter Einhaltung der zentrischen Zugfestigkeit des Betons muss die Unterseite des Querschnitts dazu in ihrer Höhe angepasst werden. Simultan ist

sensitivity analysis, which evaluates the prognosis ability of single variables in relation to the responses, identifies essential variables and thus reduces the design space. At the reduced level of the analytical metamodels, an initial pre-optimization takes place. The analytical optimum generated in this way then serves as the starting value for the computationally more complex optimization process on the numerical level (Fig. 12). Analyses of different rib patterns, which always have diagonally crossing ribs on the backside of the shell as primary stiffener, show that a mass reduction of 20–30% in relation to the full-walled shell model is possible while simultaneously maintaining the required surface accuracy [12].

7.1.2 Inner form finding

In the case of large-scale collector modules, increased transverse rigidity is achieved by enlarging the inner lever arm from the longitudinal edges of the structure to the vertex. While maintaining the axial tensile strength of the concrete, the height of the backside of the cross-section must be adjusted for this purpose. Simultaneously, the volume must be reduced so that the full cross-section is transformed into a hollow cross-section. Embedded void formers in the neutral level of the cross-section enable to save dead weight and thus achieve larger spans with the same cross-section height. This principle was adopted for large-scale collector modules

das Volumen zu reduzieren, sodass der Vollquerschnitt in einen Hohlquerschnitt aufgelöst wird. Eingebettete Hohlkörper in der Neutralebene des Querschnitts ermöglichen es, Eigengewicht einzusparen und somit größere Spannweiten bei gleicher Querschnittshöhe zu realisieren. Für großformatige Kollektormodule wurde dieses Prinzip aufgegriffen und eine Strategie der inneren Strukturfindung entwickelt, welche neben der Ermittlung der Volumenreduktion auch effektive Biege-, Membran und Schubsteifigkeitskennwerte für beliebige Hohlkörpergrößen und -formen bereitstellt, die als homogenisierte Schicht in numerischen Analysen und der Strukturoptimierung der Schale berücksichtigt werden können (Bild 13) [19], [39]–[41].

Zur Ermittlung effektiver Steifigkeitskennwerte wird partiell ein Volumenelement mit Hohlkörpern extrahiert und aufgrund der periodischen Anordnung der Hohlkörper eine repräsentative Einzelzelle definiert, deren elastische Eigenschaften auf die Gesamtstruktur projiziert werden können. Obwohl die Einzelzelle als dreidimensionale Struktur vorliegt, kann als ingenie-

and a strategy of inner form finding was developed which, in addition to determining volume reduction, also provides effective bending, membrane and shear stiffness parameters for any size and shape of void formers, which can be considered as a homogenized layer in numerical analyses and structural optimisation of the shell (Fig. 13) [19], [39]–[41].

To determine effective stiffness values, a volume element with void formers is partially extracted and, due to the periodic arrangement, a representative unit cell is defined whose elastic properties can be projected onto the overall structure. Although the unit cell represents a three-dimensional structure, it can be described as a combination of two-dimensional single systems, which represent stiffnesses of a slab, a plate or a beam (longitudinal and transverse ribs) with an effective, hollow core specific width b_{eff} , depending on the definition. Shear deformations remain unconsidered due to simplification (Kirchhoff theory). For the reduced unit cell, homogeneous, isotropic upper and lower cover layers as well as voids are de-

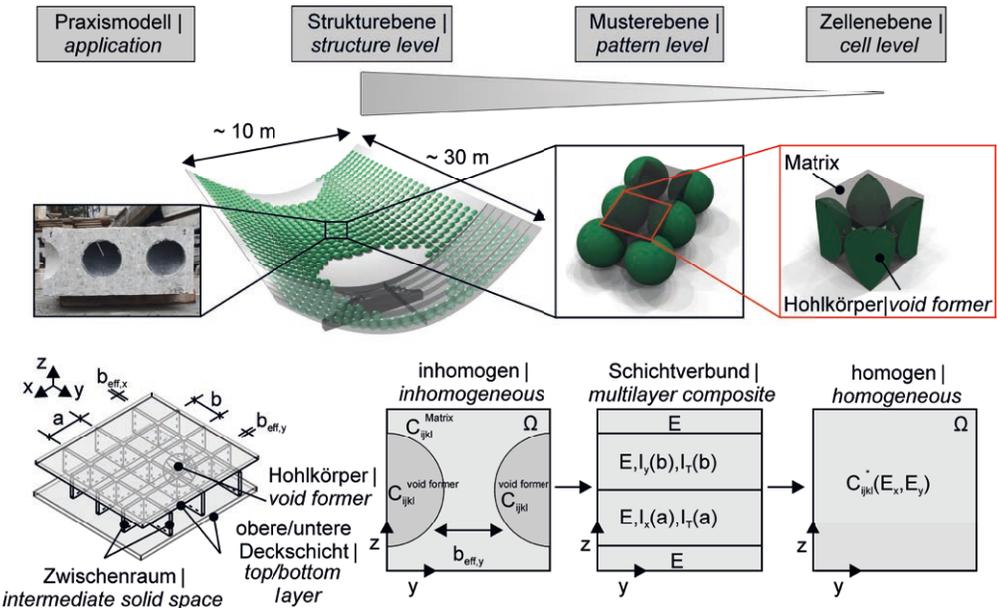


Bild 13: Konzept zur Ermittlung effektiver Steifigkeitskennwerte (oben) und Strategie zur Umsetzung in numerischen Modellen (unten) | Fig. 13: Strategy to determine effective stiffness values for embedded void formers (top) and to implement in numerical models (bottom)

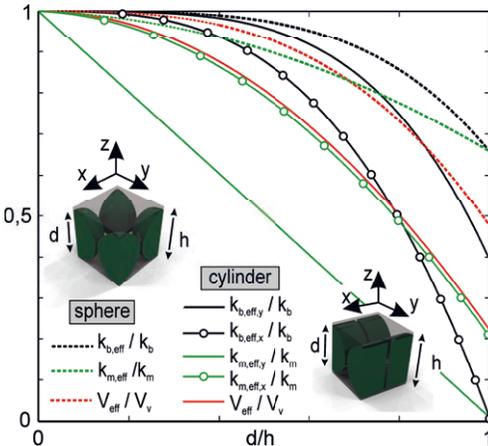
eurwissenschaftliche Näherung die Struktur als ein Verbund von zweidimensionalen Einzelsystemen beschrieben werden, die je nach Definition Steifigkeiten einer Scheibe oder einer Platte bzw. eines Balkens (Längs- und Querrippen) mit effektiver, hohlkörperspezifischer Breite b_{eff} repräsentieren. Schubdeformationen bleiben vereinfachend unberücksichtigt (Kirchhoff-Theorie). Für die reduzierte Einzelzelle werden als Einzelsysteme homogene, isotrope obere und untere Deckschichten sowie Zwischenräume in der Hohlkörperebene als längs- und querorientierte Parallelsteifenscharen mit verschmierter Steifigkeit über die Achsabstände a bzw. b definiert (Bild 13, unten). Die Gesamtsteifigkeit des Verbunds ergibt sich dann aus der Summe von Scheiben- und Platten- bzw. Balkensteifigkeiten der Einzelsysteme. Aufgrund des symmetrischen Strukturaufbaus des Verbunds zu zwei rechtwinkligen Normalebene (Parallelsteifenscharen) gilt das elastische Verhalten der Gesamtstruktur als orthotrop. Bild 14 zeigt exemplarisch den Verlauf der normierten Biege- und Membransteifigkeit für den Einschluss einer Kugel bzw. eines Zylinders sowie die Anteile der Einzelsysteme an der Gesamtbiegesteifigkeit.

Bis zu einer Hohlkörperhöhe von ca. 40 % der Einzelzelle sind für beide Hohlkörpergeome-

nien als longitudinal und transversely orientated parallel ribs with smeared stiffness over the distances a and b (Fig. 13, bottom). The total stiffness of the composite then results from the sum of the slab and plate or beam stiffnesses of the individual systems. Due to the symmetrical structure of the composite to two orthogonal normal planes (parallel stiffeners), the elastic behaviour of the overall structure is considered orthotropic. Fig. 14 shows an example of the course of the standardised bending and membrane stiffness for embedded spheres or cylinders as well as the components of the individual stiffness to the total bending stiffness.

Up to a void former height of approx. 40% of the unit cell, hardly any significant bending stiffness losses in the longitudinal direction can be noted for both geometries. Maximum volume reductions are generally achieved with cylinders as void formers. With a higher d/h ratio, only the transverse direction of the unit cell with embedded cylinders loses comparatively more rigidity, so that the relative decrease in rigidity is greater than the volume reduction. From a d/h -ratio of ~ 0.85 , the rigidity of the overall system is mainly determined by the moment of inertia of the parallel strip (Fig. 14, right). In general, the relative decrease of the stiffness values is less than

normierte effektive Steifigkeiten einer Einheitszelle | unit cell's norm. eff. stiffness values



Anteile an Gesamtbiegesteifigkeit (Kugel) | total bending stiffness components (sphere)

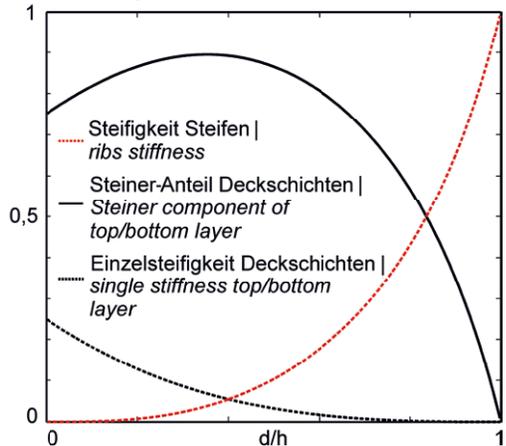


Bild 14: Normierte effektive Steifigkeitskennwerte für Biege- und Membransteifigkeit mit kugelförmigen und zylindrischen Hohlkörpern (links) sowie Verlauf der Anteile an Gesamtsteifigkeit (rechts) | **Fig. 14:** Normalised effective stiffness values for bending and axial stiffness of a unit cell with various void formers (left) and development of each layer of the multilayer composite (right)

trien erwartungsgemäß kaum nennenswerte Biegesteifigkeitsverluste in Längsrichtung zu vermerken. Größte Volumenreduktionen werden generell mit Zylindern als Hohlkörper erzielt. Mit höherem d/h -Verhältnis verliert lediglich die Querrichtung der Einzelzelle mit Einschluss eines Zylinders vergleichsweise stärker an Steifigkeit, sodass die relative Abnahme der Steifigkeit größer ist als die Volumenreduktion. Ab einem d/h -Verhältnis von $\sim 0,85$ wird die Steifigkeit des Gesamtsystems überwiegend aus dem Eigenträgheitsmoment der Parallelsteifenschar geprägt (Bild 14, rechts). Für die Kugel gilt allgemein, dass die relative Abnahme der Steifigkeitskennwerte geringer ist als die Volumenreduktion, sodass im Vergleich zu einem Vollquerschnitt geringere elastische Verformungen resultieren.

7.1.3 Topologieoptimierung mit modifiziertem SIMP-Ansatz für mittensymmetrische steifigkeitsorientierte Rippenverstärkung

Zur Identifizierung der Anordnung möglicher Hohlkörperverteilungen in der Schale bzw. von Verstärkungsrippen, welche dem Kraftfluss innerhalb des Bauteils gerecht wird, bietet sich die topologische Optimierung an [42]. Über die Steuerung der Verteilung einer Pseudodichte ρ im vorgegebenen Entwurfsraum lassen sich so Bereiche bestimmen in denen Material vorhanden sein muss bzw. keines erforderlich ist, bei gleichzeitiger Maximierung der Struktursteifigkeit (Minimierung der Nachgiebigkeit). Kommerzielle Programmsysteme bieten nur wenige Gestaltungsparameter für die Beeinflussung der topologischen Optimierung von Strukturen. Neben der Vorgabe einer z. B. gewünschten Volumenreduktion stehen i. d. R. nur ausgewählte finite Elemente zur Verfügung, um eine Optimierung durchzuführen. Eigene Lösungsalgorithmen unter Berücksichtigung bereits vorhandener Basismodule [43] konnten innerhalb des Programmsystems *MATLAB* integriert werden. Aus der klassischen Betrachtung des inneren Aufbaus einer ebenen Struktur wird für Flächentragwerke eine Optimierung in Dickenrichtung, da die Steifigkeit nicht mehr ausschließlich vom E-Modul, sondern auch

the volume reduction due to the sphere, so that lower elastic deformations result in comparison to a full cross-section.

7.1.3 Topology optimisation with modified SIMP approach for symmetric rigidity-oriented ribs

Topological optimisation provides a method for identifying the arrangement of possible void former distributions in the shell or of ribs, which follow the flow of forces within the structure [42]. By steering the distribution of a pseudo density ρ in the predefined design space, areas can be determined in which material must be present or is not required, while maximising the structural stiffness (minimising the compliance) simultaneously. Commercial program systems offer only a few design parameters for controlling the topological optimization of structures. Besides the specification of a desired volume reduction, for example, only subset finite elements are usually suitable for an optimization task. Our own solution algorithms that consider already given basic modules [43] could be integrated within the program system *MATLAB*. From the conventional view of a planar structure, an optimisation in thickness direction is developed for shell structures, since the stiffness no longer depends solely on the modulus of elasticity, but also on the wall thickness t . Thus, the resulting density distribution corresponds to a material distribution over the wall thickness. For shell structures, in addition to the general density distribution, the structural composition of the density on the basis of its stiffness components is also interesting for further analyses. In order to analyse shell structures with respect to the composition of thickness direction, a new approach was developed which is based on already known 4-noded shell elements with reduced integration and superposes bending (k_b), membrane (k_m) and shear stiffness (k_s) components (Mindlin-Reissner theory [44]). In the optimization process, the individual stiffness components are separately described by modifying the objective function, here the minimization of the system compliance, and sensitivities. Thus, each stiffness

von der Wandstärke t abhängt. Die resultierende Dichteverteilung entspricht somit einer Materialverteilung über die Wandstärke. Bei Schalenstrukturen ist neben der allgemeinen Dichteverteilung auch die strukturelle Zusammensetzung der Dichte anhand ihrer Steifigkeitsanteile für weitergehende Analysen interessant. Um Schalenstrukturen auch hinsichtlich ihres Aufbaus in Dickenrichtung analysieren zu können, wurde ein neuer Ansatz entwickelt, der auf Basis bekannter 4-knotiger Schalenelemente mit reduzierter Integration besteht und Biege- (k_b), Membran- (k_m) und Schubsteifigkeitsanteile (k_s) überlagert (Mindlin-Reissner-Theorie [44]). Im Optimierungsprozess werden die einzelnen Steifigkeitsanteile unter Modifizierung von Zielfunktion, hier die Minimierung der Systemnachgiebigkeit, und Sensitivitäten aufgelöst formuliert. Jeder Steifigkeitsanteil erhält somit eigene Entwurfsvariablen mit zugehörigen exponentiellen Strafparametern λ , sodass sich die Elementsteifigkeitsmatrix k_i ergibt zu:

$$k_i = \rho_0^\lambda \left[(1 - \rho_b)^\lambda \cdot k_{ib} + \rho_b^\lambda \cdot (1 - \rho_m)^\lambda \cdot k_{im} + \rho_b^\lambda \cdot \rho_m^\lambda \cdot k_{is} \right] \quad (2)$$

wobei i die Elementnummer ist. Der Parameter ρ_0 entspricht der klassischen Entwurfsvariablen, die für die grundsätzliche Dichteverteilung im Entwurfsraum zuständig ist. Anteilmäßig wird über die Variation der zweiten Entwurfsvariablen ρ_b der Einfluss der Biegesteifigkeitskomponente aufgezeigt, die Anteile der Membran- und Schubsteifigkeit ergeben sich analog. Bild 15 zeigt dazu die Dichteverteilung des klassischen SIMP-Ansatzes (oben links) [42] und der hier entwickelten, auf Schalensteifigkeiten basierten Formulierung (oben rechts) unter gleichen Inputparametern [45]. Der konventionelle SIMP-Ansatz liefert überwiegend schwarz-weiße 1-0-Designs, der modifizierte bildet ebenfalls deutliche Hauptrippen aus, allerdings in Kombination mit einem großen Anteil an Zwischendichten (grau). Eine Aufteilung in Biege-, Membran- und Schubsteifigkeit (Bild 15, unten) zeigt, dass Hauptrippen sich überwiegend aus Membransteifigkeits- mit wenigen Biegesteifigkeitsanteilen entwickeln. Zwischendichten sind hauptsächlich der Biegesteifigkeit zuzuordnen, die als gering ausgeprägte Sekun-

component receives its own design variables with associated exponential penalty factor λ , so that the resulting element stiffness matrix k_i is:

$$k_i = \rho_0^\lambda \left[(1 - \rho_b)^\lambda \cdot k_{ib} + \rho_b^\lambda \cdot (1 - \rho_m)^\lambda \cdot k_{im} + \rho_b^\lambda \cdot \rho_m^\lambda \cdot k_{is} \right] \quad (2)$$

where i is the number of elements. The parameter ρ_0 corresponds to the classic design variable, which steers the basic density distribution within the design space. The influence of the bending stiffness component is shown proportionally by the variation of the second design variable ρ_b , the ratios of the membrane stiffness and shear stiffness result analogously. Fig. 15 shows the density distribution of the classical SIMP approach (top left) [42] and the distribution pattern based on shell stiffness formulation developed here (top right) under equal input parameters [45]. The conventional SIMP approach mainly delivers black and white 1-0 designs, the modified one also forms distinct main ribs, but combined with a large amount of intermediate densities (grey). A classification into bending, membrane and shear stiffness (Fig. 15, bottom) shows that the main ribs arise primarily from membrane stiffness with a low amount of bending stiffness. Intermediate densities are mainly due to bending stiffness, which would be applied as secondary ribs. Shear stiffness components are of minor importance and occur only in concentrated form at the support. With this formulation, stiffness-orientated ribs can now be designed inside the cross-section. By specific modification of the boundary conditions and penalization of stiffness components, not only shell structures but also slab or plate structures can be optimized, so that this method can be used in many ways.

7.1.4 Distribution of void formers based on graded densities

For a stiffness-oriented distribution of void formers within the neutral level of the cross-section of shell structures, the effective stiffness values derived from section 7.1.2 were specified for different void sizes as a function of volume reduction. The density/stiffness ratio can no longer be controlled by a freely selectable expo-

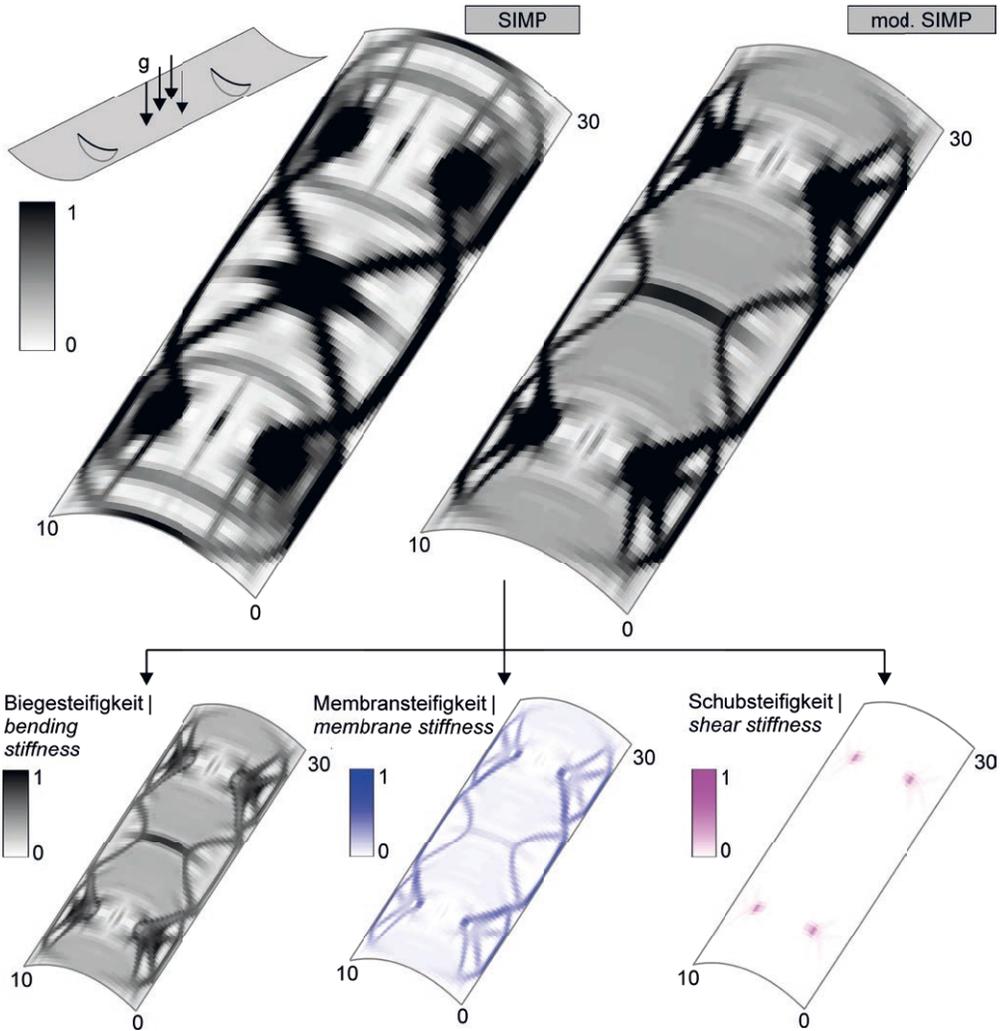


Bild 15: Dichtelayouts mit klassischem SIMP-Ansatz (oben links) und modifizierter SIMP-Formulierung (oben rechts) und Aufteilung in Steifigkeitsanteile (unten) | **Fig. 15:** Conventional topology optimisation SIMP approach (top left) and modified SIMP approach (top right) separated in stiffness components (bottom)

därrippen Anwendung finden würden. Schubsteifigkeitsanteile sind untergeordnet und treten nur konzentriert am Auflager auf. Mit dieser Formulierung können nun steifigkeitsaffin Verstärkungsrippen im inneren des Querschnitts konstruiert werden. Durch gezielte Anpassung der Randbedingungen und Bestrafung von Steifigkeitsanteilen können neben Schalenstrukturen auch Scheiben- oder Plattenstrukturen optimiert werden, sodass diese Methode variabel und vielfältig einsetzbar ist.

nent in the formulation, but is described explicitly and functionally. Thus, bending, membrane and shear stiffnesses are not only actually coupled, but also combined within the optimization algorithm by means of the design variable. The predetermination of the physical dependencies leads to a limitation of the optimization problem, so that oscillating variations of the density per iteration step, which could occur with free density/stiffness ratios per stiffness component (section 7.1.3), are significantly reduced,

7.1.4 Hohlkörperverteilung aus gradierten Dichten

Für eine steifigkeitsorientierte Verteilung von Hohlkörpern innerhalb der Neutralebene des Querschnitts von Schalenstrukturen wurden die abgeleiteten effektiven Steifigkeitskennwerte aus Abschnitt 7.1.2 für verschiedene Hohlkörpergrößen in Abhängigkeit der Volumenreduktion formuliert. Das Dichte-Steifigkeits-Verhältnis ist nun nicht mehr durch einen frei wählbaren Exponenten in der Formulierung steuerbar, sondern ist explizit funktional beschrieben. So sind Biege-, Membran- und Schubsteifigkeiten nicht nur real verknüpft, sondern auch innerhalb des Optimierungsalgorithmus über die Entwurfsvariable gekoppelt. Die Vorgabe der physikalischen Abhängigkeiten führt zu einer Eingrenzung des Optimierungsproblems, sodass sich oszillierende Änderungen der Dichte je Iterationsschritt, die sich bei freien Dichte-Steifigkeits-Verhältnissen je Steifigkeitsanteil einstellen konnten (Abschnitt 7.1.3), deutlich abschwächen, sodass finale Dichteverteilungen frühzeitig entstehen. Resultierende Dichteverteilungen sind für eine Hohlkörperverteilung aufgrund des feinen – rechnerisch erforderlichen – FE-Netzes zu detailliert aufgelöst, da die Größe eines Hohlkörpers mehrere Elemente umfasst. In einer nachgeschalteten Post-Processing-Analyse wird unter Mittelung angrenzender Elemente, repräsentativ für einzelne Hohlkörper oder in Gruppenanordnung, eine wesentliche gröbere Dichteverteilung generiert, mit der über das Dichte-Steifigkeits-Verhältnis charakteristische Hohlkörpergrößen abgeleitet werden können. Bild 16 zeigt das Schema von der funktionalen Beschreibung diskreter Steifigkeitswerte (links) über eine generierte Dichteverteilung (mittig) bis zu einer abgeleiteten Hohlkörperverteilung (rechts). Die ausgeprägte Farbabstufung zwischen 0 und 1 führt dabei zu einer deutlicheren Identifikation von Zwischendichten. Der Transfer zwischen Dichte- und Hohlkörperverteilung gelingt über eine vorherige Definition von Hohlkörpergröße und -anordnung z. B. als Solist oder in Gruppe, hier exemplarisch für eine Gruppe von 2×2 Hohlkörpern gleicher Größe und der Mittelung der Dichten

so that final density distributions occur early. Resulting density distributions are too detailed for a distribution of void formers due to the fine – computationally required – FE mesh, since the size of a void comprises several elements. In a downstream post-processing analysis, a considerably more coarse density distribution is generated by averaging nearby elements, representing individual void formers or a group arrangement, in order to derive characteristic void sizes by means of the density/stiffness ratio. Fig. 16 shows the scheme of the functional description of discrete stiffness values (left), a generated density distribution (centre) and a derived void former distribution (right). The distinct colour gradation between 0 and 1 leads to a distinct identification of intermediate densities. The transfer from density to void former distributions is achieved by a previous definition of void former size and arrangement e.g. solo or in a group, here exemplarily for a group of 2×2 voids of the same size and the averaging of the densities of the elements enclosed by this defined size. Strong concentrations of high density values (red) at the supports lead to no or only small void former sizes, low density values (blue) to maximum sizes and intermediate sizes in transition areas. The presented method can be transferred to any shape of void formers and structures (plate, slab) and a stiffness-oriented distribution of void formers can be derived in a subsequent analysis.

7.2 Robustness (RUB)

In robustness analyses, the uncertainty of geometric and/or material parameters is mostly considered. Variable load scenarios are often ignored or less important. During the complex wind tunnel tests, a representative database was established which allows the use of these data for robustness analyses in order to consider variations or uncertainty of measured wind pressures to determine the influence on the structural response. Analogously, an approach for a robust topological density distribution under several load cases was implemented for the optimization concepts of inner form finding.

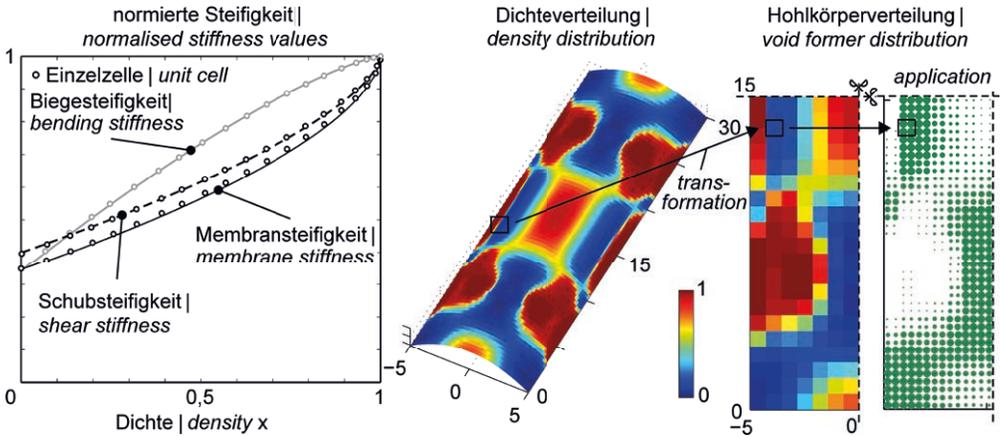


Bild 16: Elemente zur steifigkeitsorientierten Hohlkörperverteilung: normierte Steifigkeiten in Abhängigkeit der Dichte (links), generierte Dichteverteilung (mittig) und abgeleitete Hohlkörperverteilung (rechts) | **Fig. 16:** Elements to distribute void formers in structures: normalised effective stiffness values from a unit cell analysis (left), optimised density distribution (centre) and void former distribution (right)

der von dieser definierten Größe eingeschlossenen Elemente. Starke Konzentrationen hoher Dichtewerte (rot) an den Auflagern führen zu keinen bzw. nur geringen Hohlkörpergrößen, geringe Dichtewerte (blau) zur Maximalgröße und Zwischengrößen in Übergangsbereichen. Die vorgestellte Methode kann auf beliebige Formen von Hohlkörpern und Strukturen (Platte, Scheibe) übertragen und in einer Nachlaufanalyse eine steifigkeitsorientierte Hohlkörperverteilung abgeleitet werden.

7.2 Robustheit (RUB)

In Robustheitsanalysen werden vorwiegend die Unschärfen geometrischer und/oder materieller Parameter eingebunden. Veränderliche Beanspruchungen bleiben häufig unberücksichtigt oder sind untergeordnet. In den Windkanaluntersuchungen wurde eine repräsentative Datenbasis aufgebaut, die es erlaubt, experimentelle Daten für Robustheitsanalysen zu verwenden, um gezielt Variationen bzw. Unschärfen von gemessenen Winddrücken zu berücksichtigen, um den Einfluss auf die Strukturantwort zu erfassen. Analog wurde für die Optimierung der inneren Strukturfindung ein Ansatz zur robusten Generierung topologischer Dichteverteilungen bei mehreren Lastfällen implementiert.

7.2.1 Stochastic approaches from experimentally determined wind tunnel test data

The 78%-quantiles derived in section 6.1 for the determination of equivalent wind pressure distributions on parabolic trough collector modules are not correlated between the individual measuring taps over the parabolic shell, so that extreme values do not occur simultaneously. Rather, combinations of values of the assumed distributions per measuring point can result. An extension of the previous numerical analysis offers a simulation of the value spectrum of these distribution functions. Using *Latin Hypercube Sampling* (LHS), equally distributed random values between 0 and 1 were generated which represent discrete points of a Gumbel distribution function $F(x)$ derived from measured values (Fig. 17). The transfer into a density distribution $f(x)$ provides an accuracy criterion of the represented function by calculating characteristic parameters such as mean value, standard deviation, modal value and dispersion. Convergence studies have shown that at least a number of 80 samplings (simulations) should be used to adequately characterise the Gumbel distribution with a deviation of the parameters of $\leq 3\%$. Thus, independently for each measuring point stochastic random numbers are determined, which serve as input for the numerical analysis. Fig. 18 shows the combinations of pressure

7.2.1 Stochastische Ansätze aus experimentell ermittelten Windkanalversuchsdaten

Die in Abschnitt 6.1 abgeleiteten 78%-Fraktilwerte zur Ermittlung äquivalenter Winddruckverteilungen für Parabolrinnen-Kollektormodule sind zwischen den einzelnen Messstellen über die Paraboschale nicht korreliert, sodass Extremwerte nicht simultan auftreten. Vielmehr können Kombinationen von Werten der zugrunde gelegten Verteilungen je Messstelle auftreten. Eine Erweiterung der bisherigen numerischen Analyse bietet eine Simulation des Wertespektrums dieser Verteilungsfunktionen. Mittels *Latin Hypercube Sampling* (LHS) wurden gleich verteilte Zufallswerte zwischen 0 und 1 generiert, die diskrete Punkte einer aus Messwerten abgeleiteten Gumbel-Verteilungsfunktion $F(x)$ abbilden (Bild 17). Der Transfer in eine Dichteverteilung $f(x)$ liefert ein Maß über die Genauigkeit der abgebildeten Funktion durch Berechnung verteilungsbeschreibender Parameter wie z. B. Mittelwert, Standardabweichung, Modalwert und Dispersion. Konvergenzstudien ergaben, dass mindestens 80 Simulationen zur ausreichenden Beschreibung der Gumbel-Verteilung mit einer Abweichung der Parameter von $\leq 3\%$ anzusetzen sind. Unabhängig für jede Messstelle werden so stochastische Zufallszahlen als Input für die numerische Analyse ermittelt. Bild 18 zeigt die Kombinationen von Druckbeiwerten je Sampling (links) und exemplarisch die Streuung des normierten, maximal auftretenden negativen Querbiegemomentes m_{11} infolge Windlast für die Kollektorreihen 1 bis 4 bei Verwendung von 100 Samplings für einen Anstellwinkel von 0° . Die Normierung erfolgte auf den 78%-Fraktilwert der ersten Reihe (schwarze Linie), zusätzlich sind die Häufigkeitsverteilungen je Reihe angegeben. Maximale Querbiegemomente werden durch die Simulationen abgedeckt und umhüllen 78%-Fraktilwerte, sodass die Abbildung eines Windereignisses mit einer 50-jährigen Wiederkehrperiode eingehalten wird. Je Reihe bilden verschiedene Simulationen Maximalwerte ab (rote Linien), wobei 78%-Fraktilwerte durchgehend ca. $2/3$ der auftretenden Werte abdecken. Windverschattungseffekte zwischen den Reihen sind deutlich zu erkennen. Eine minimale Reduk-

coefficients per sampling (left) and exemplarily the variation of the standardised, maximum occurring negative transverse bending moment m_{11} due to wind load for the collector rows 1 to 4 using 100 samples for a pitch angle of 0° . The standardisation was based on the 78%-quantile of the first row (black line); additionally the frequency distributions per row are given. Maximum transverse bending moments are covered by the simulations and enclose 78%-quantiles so that the representation of a wind event with a 50-year return period is maintained. For each row, different simulations show maximum values (red lines), whereby 78%-quantiles permanently cover approx. $2/3$ of the occurring values. Shadowing effects between the rows are clearly visible. A minimum reduction of approx. 20% occurs in the fourth row, a maximum of approx. 55% in the second. There is a tendency for the effect from row 3 to row 4 to decrease, so that reductions smaller than 20% from row 5 will not be expected.

7.2.2 Robust density distribution designs

The method for stiffness-oriented density distribution developed in section 7.1.3 performed exemplarily for a constant area load. By implementing variable load cases as multi-objective optimization approach and the weighted sum compliance as objective function, variable load cases can be combined and a robust material distribution can be derived. Fig. 19 shows the material distributions with respect to the individual stiffness components using a surface load acting on the entire inner surface in combination with a one-sided surface load. A previously symmetrical material distribution (section 7.1.3) is replaced by an antisymmetric one. Material concentrations not only appear in the area of the supports but also at the more heavily loaded longitudinal edge, predominantly in the form of bending stiffness, which – in combination with the truss structure of membrane stiffness components asymmetrically formed to the longitudinal axis – produce a locally varying optimized load transfer. Thus, the influence of the one-sided surface load is considered in terms of stiffness. A combination

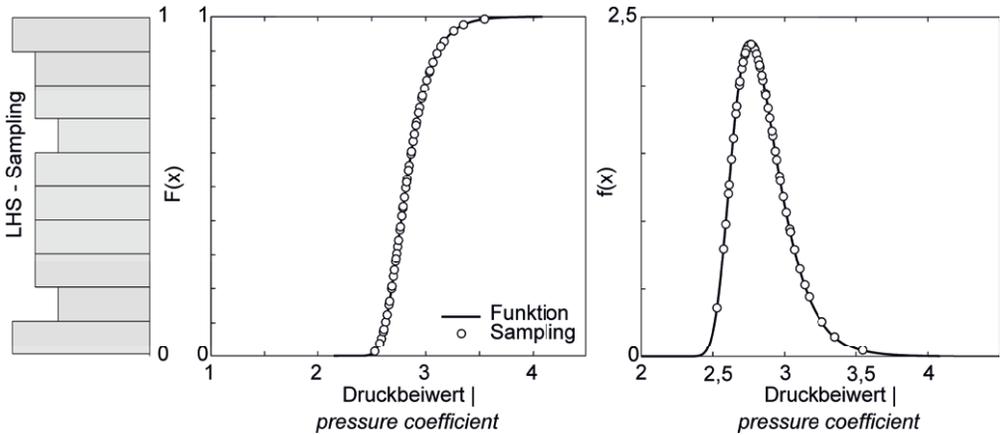


Bild 17: Latin Hypercube Sampling zur Abbildung diskreter Punkte der Gumbel-Verteilung | Fig. 17: Latin hypercube sampling mapping discrete values of the Gumbel distribution

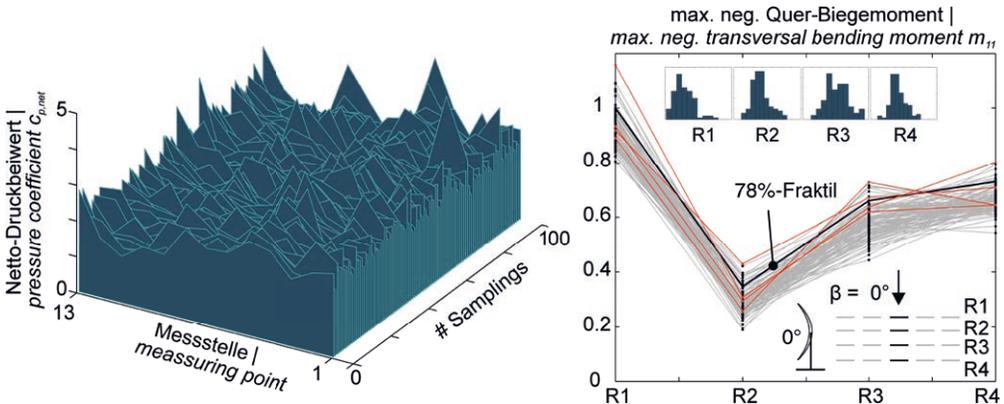


Bild 18: Zufallsbasierte Netto-Druckbeiwerte je Messstelle und Sampling (links) sowie Streuung des normierten, maximal negativen Biegemomentes m_{11} über die Reihen 1–4 eines Solarfeldes (rechts) | Fig. 18: Random based pressure coefficients for measuring points and sampling (left) and normalised maximum bending moment m_{11} about longitudinal axis for rows 1–4 in solar fields (right)

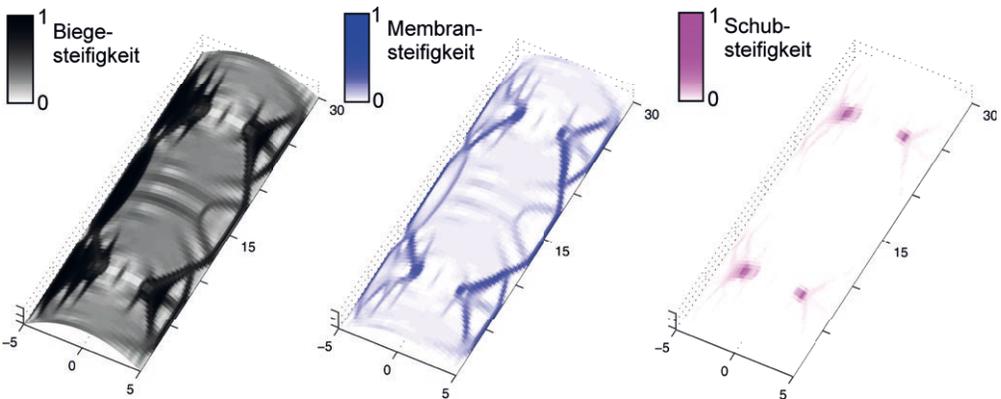


Bild 19: Dichteverteilung der Steifigkeitsanteile bei kombinierter Belastung $g+q$ | Fig. 19: Density distribution for each stiffness components under combined load $g+q$

tionen von ca. 20 % tritt in der vierten Reihe, eine maximale von ca. 55 % in der zweiten auf. Tendenziell ist ein abnehmender Effekt von Reihe 3 zur Reihe 4 festzustellen, sodass kleinere Reduktionen als 20 % ab Reihe 5 nicht zu erwarten sind.

7.2.2 Robuste Dichtedesigns

Die in Abschnitt 7.1.3 entwickelte Methode zur steifigkeitsorientierten Dichteverteilung wurde anhand einer konstanten Flächenlast gezeigt. Durch Implementierung beliebiger Lastfälle als mehrobjektiven Optimierungsansatz und der gewichteten Summennachgiebigkeit als Zielfunktion können beliebige Lastfälle kombiniert und eine robuste Materialverteilung abgeleitet werden. Bild 19 zeigt unter Ansatz einer auf die gesamte Innenfläche wirkenden Flächenlast in Kombination mit einer einseitigen Flächenlast die Materialverteilungen bzgl. der einzelnen Steifigkeitsanteile. Eine zuvor symmetrische Materialverteilung (Abschnitt 7.1.3) wird durch eine antimetrische ersetzt. Materialkonzentrationen zeigen sich nicht nur im Bereich der Auflager, sondern auch am stärker beanspruchten Längsrand, überwiegend ausgeprägt in Form von Biegesteifigkeit, die – in Kombination mit der zur Längsachse unsymmetrisch ausgebildeten Fachwerkstruktur aus MembranstEIFIGKEITSANTEILEN – einen lokal abweichenden optimierten Lastabtrag erzeugt. Der Einfluss der einseitigen Flächenlast wird somit steifigkeitsorientiert berücksichtigt. Eine Kombination mehrerer relevanter Lastfälle führt somit zu einem robusten Design für mittensymmetrische Rippenverstärkungen oder für die Verteilung von Hohlkörpern.

8 Untersuchung der Querkrafttragfähigkeit von Platten aus Nanodur® mit integrierten Hohlkörpern (TU KL)

8.1 Allgemeines

Zur Auslegung einer Parabolrinne aus Nanodur®-Beton [46] mit im Querschnitt integrierten Hohlkörpern ist es essentiell, das Tragverhalten dieser Struktur zu analysieren. Da eine Kombi-

of several relevant load cases, e.g. dead load, wind and torsion, leads to a robust design for symmetric ribs or for the distribution of void formers.

8 Investigation of the shear force bearing capacity of slabs made of Nanodur® with void formers (TU KL)

8.1 General

For the design of a parabolic trough made of Nanodur® concrete [46] with void formers integrated in the cross-section, it is essential to analyse the load-bearing behaviour of this structure. Since a combination of fine-grained high-performance concrete and void formers has not yet been considered according to the current state of knowledge, tests to determine the load-bearing behaviour were essential. Due to the complex geometry of a parabolically curved shell with a variable cross-section, the investigations described below were carried out on uniaxially clamped plates with void formers.

The investigation of the load-bearing behaviour of hollow core slabs is not new, but so far mainly ceiling systems made of normal strength concrete have been considered [47]. A further difference is that in the systems considered so far a minimum distance of the void formers was required for the formation of strips, whereas in this project the hollow bodies were arranged directly next to each other. The overall goal was to make the cross-section as slim as possible and thus cost-optimized.

8.2 Behaviour of conventional hollow core slabs

The load-bearing behaviour of a conventional hollow core slab is essentially subdivided into the consideration of the bending and transverse load-bearing capacity. The basis of every bending design is the determination of the pressure zone height and the inner lever arm. When considering cross-sections with integrated void formers, two different cases have to be consid-

nation aus einem feinkörnigen Hochleistungsbeton und Hohlkörpern bisher nach aktuellem Kenntnisstand noch nicht betrachtet wurde, waren Versuche zur Ermittlung des Tragverhaltens unerlässlich. Aufgrund der komplexen Geometrie einer parabolisch gekrümmten Schale mit veränderlichem Querschnitt wurden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen an einachsig gespannten Platten mit Hohlkörpern durchgeführt.

Die Untersuchung des Tragverhaltens von Hohlkörperplatten ist nicht neu, allerdings wurden bisher vornehmlich Deckensysteme aus Normalbeton betrachtet [47]. Ein weiterer Unterschied ist, dass bei den bisher betrachteten Systemen ein Mindestabstand der Hohlkörper für die Ausbildung von Stegen gefordert war, wohingegen die Hohlkörper in diesem Projekt unmittelbar nebeneinander angeordnet wurden. Insgesamt war es das Ziel, den Querschnitt möglichst schlank und damit kostenoptimiert zu gestalten.

8.2 Tragverhalten konventioneller Hohlkörperdecken

Das Tragverhalten einer konventionellen Hohlkörperdecke untergliedert sich im Wesentlichen auf die Betrachtung der Biege- und Querkrafttragfähigkeit. Grundlage jeder Biegebemessung ist die Ermittlung der Druckzonenhöhe und des inneren Hebelarms. Bei der Betrachtung von Querschnitten mit integrierten Hohlkörpern sind hierbei zwei unterschiedliche Fälle zu betrachten. Sofern die Druckzonenhöhe im Bereich der Hohlkörper kleiner als die Betondeckung ist, ist eine Biegebemessung nach den üblichen bekannten Verfahren möglich. Ragen die Hohlkörper allerdings bis in den Bereich der Druckzonenhöhe, sind diese bei der Biegebemessung zu berücksichtigen. Bereits in [48] wurde festgestellt, dass die Hohlkörper sowohl die Spannungsverteilung im Querschnitt, als auch den inneren Hebelarm beeinflussen. Ein Bemessungsansatz für Decken mit abgeflachten, rotationssymmetrischen Hohlkörpern kann [47] entnommen werden.

ered. If the pressure zone height in the area of the hollow bodies is smaller than the concrete cover, a bending design according to the usual known methods is possible. However, if the void formers extend into the area of the pressure zone height, these must be taken into account in the bending design. Already in [48] it was determined that the hollow bodies influence both the stress distribution in the cross-section and the inner lever arm. A design approach for ceilings with flattened, rotationally symmetrical hollow bodies can be found in [47].

8.3 Shear force bearing capacity of conventional hollow core slabs

It is well known that the determination of the shear force behaviour of reinforced concrete slabs is very complex. If hollow core elements are arranged in the cross-section, this results in a changed shear force behaviour. Extensive investigations have already been carried out on conventional hollow core slabs, including [16], [47], [49]. Although the design of a hollow core slab is basically possible in the same way as for a ribbed slab, only the existing 'strips' (see Fig. 20, top) are taken into account, not the overall cross-section available. This leads to a very uneconomical design.

In [47] a suitable model for the design of the shear force bearing capacity was developed. In addition, investigations were carried out on the individual load-bearing mechanisms. Essentially, the load bearing capacities of the non-cracked compression zone, of the crack-side tothing as well as due to an anchor effect of the bending reinforcement are used. The investigations were carried out on normal strength concretes up to strength class C50/60. The Nanodur® concrete used in this project does not only differ in strength. The main differences are the significantly smaller maximum grain size with a diameter of only 3 mm and the absence of the strips as described above. It was therefore necessary to conduct our own investigations into the shear strength of reinforced concrete slabs made of Nanodur® concrete with integrated void formers.

8.3 Querkrafttragfähigkeit konventioneller Hohlkörperdecken

Bekanntlich ist die Erfassung des Querkrafttragverhaltens von Stahlbetonplatten sehr komplex. Sind im Querschnitt Hohlkörper angeordnet, hat dies ein verändertes Querkrafttragverhalten zur Folge. Zu konventionellen Hohlkörperdecken wurden bereits umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, u. a. [16], [47], [49]. Zwar ist die Bemessung einer Hohlkörperdecke grundsätzlich analog zu der einer Rippendecke möglich, allerdings wird hierbei nicht der insgesamt zur Verfügung stehende Querschnitt betrachtet, sondern lediglich die vorhandenen „Stege“ gehen in die Bemessung ein (vgl. Bild 20, oben). Dies führt zu einer sehr unwirtschaftlichen Bemessung.

In [47] wurde ein geeignetes Modell zur Bemessung der Querkrafttragfähigkeit entwickelt. Weiterhin wurden Untersuchungen zu den einzelnen Tragmechanismen angestellt. Im Wesentlichen werden hierbei die Tragfähigkeit der ungerissenen Druckzone, der Traganteil der Rissuferverzahnung sowie der Traganteil infolge einer Dübelwirkung der Biegezugbewehrung herangezogen. Die Untersuchungen wurden an Normalbetonen bis zur Festigkeitsklasse C50/60 durchgeführt. Der in diesem Projekt verwendete Nanodur®-Beton unterscheidet sich hiervon nicht nur in der Festigkeit. Wesentliche Unterschiede sind das deutlich kleinere Größtkorn mit einem Durchmesser von nur 3 mm und das Fehlen der oben beschriebenen Stege. Somit war es erforderlich, eigene Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonplatten aus Nanodur®-Beton mit integrierten Hohlköpern durchzuführen.

8.4 Experimentelle Untersuchungen

8.4.1 Versuchsprogramm

Zur Untersuchung der Querkrafttragfähigkeit wurden Versuchskörper mit unterschiedlichen Querschnittsabmessungen hergestellt und in 3-Punkt-Biegeversuchen geprüft. Die Platten waren 65,7 cm breit, die Hohlkörper jeweils 10 cm hoch. Wesentlicher zu variierender Pa-

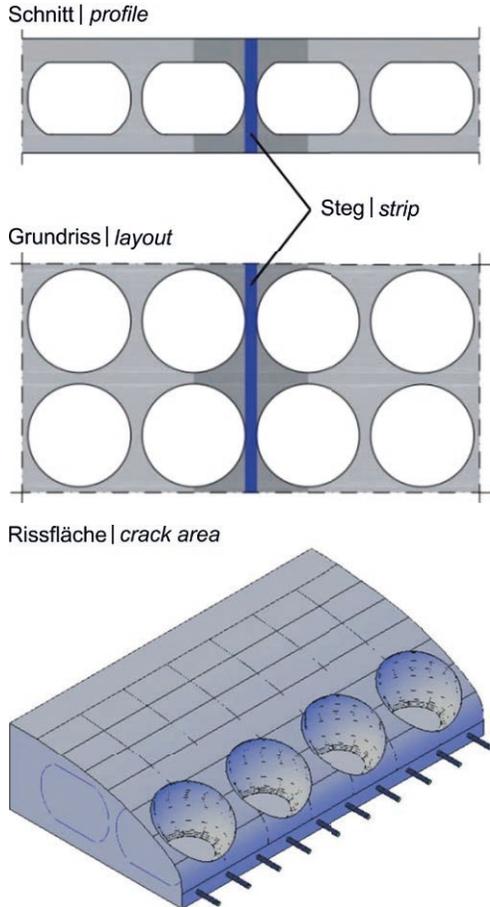


Bild 20: Schnitt und Grundriss einer Hohlkörperdecke (oben) und Rissfläche (unten) bei einachsigem Lastabtrag | **Fig. 20:** Profile and layout of a plate with void formers (top) and crack area (bottom) with uniaxial load transfer

8.4 Experimental investigations

8.4.1 Experimental test program

In order to investigate the shear load bearing capacity, test specimens with different cross-sectional dimensions were produced and tested in 3-point bending tests. The plates were 65.7 cm wide, the void formers had a height of 10 cm each. The main parameter to be varied was the height of the concrete cover of the void formers. For each test type, three tests were carried out on plates with void formers and one reference

Bezeichnung Description	Plattenhöhe Height [cm]	Betondeckung der Hohlkörper Concrete cover above void formers [cm]
V-Q-10-141	14,1	1,6
V-Q-10-160	16,0	2,2
V-Q-10-170	17,0	3,2
V-Q-10-180	18,0	4,2

Tabelle 2: Versuchsprogramm | Table 2: Test program

parameter war die Höhe der Betonüberdeckung der Hohlkörper. Für jeden Versuchstyp wurden jeweils drei Versuche an Platten mit Hohlkörpern und ein Referenzversuch ohne Hohlkörper durchgeführt (Tab. 2). Die Platten wurden so konstruiert, dass je Platte zwei Versuche durchgeführt werden konnten. Jede Versuchsreihe setzt sich aus zwei Probekörpern zusammen. Hierbei enthält eine Platte jeweils beidseitig Hohlkörper, die zweiten hingegen nur einseitig, damit auf der gegenüberliegenden Seite der Referenzversuch durchgeführt werden kann.

8.4.2 Versuchskörper im Detail

Die Besonderheit der Versuchsreihe V-Q-10-141 liegt in der Querschnittshöhe, die entgegen allen Konstruktionsregeln lt. [50] so gering wie möglich gehalten wurde. Die Betondeckung für die Bewehrung wurde hier mit lediglich 1 cm zur Bauteilober- und -unterseite hin angesetzt. In Bild 21 ist der Aufbau der Versuchskörper exemplarisch dargestellt.

Die Hohlkörper wurden ohne Zwischenräume parallel zum Bauteilrand verlegt. In Querrichtung liegen sie bündig mit der Betonaußenkante. Als Biegebewehrung wurde Ankerstabstahl St 900/1000 mit einem Durchmesser von 15 mm verwendet. Konventioneller Betonstahl B500 konnte aufgrund der Vorgabe eines realistischen Längsbewehrungsgrades von maximal 2 % und der Einhaltung zulässiger Stababstände nicht verwendet werden. Die Querbewehrung entspricht der Menge nach 20 % des geometrischen Längsbewehrungsgrades. Hierfür wurde ein konventioneller Stabstahl B500B verwendet. Die Betondeckung wurde so gewählt, dass sie ein Mindestmaß von 1 cm nicht unterschreitet. In den Untersuchungen von [51] konnte gezeigt werden, dass die Schädigungsmechanismen durch Chloride oder

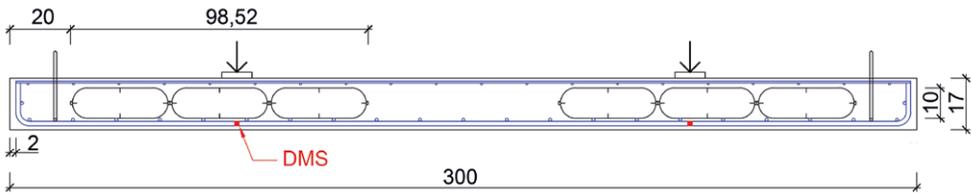
test without void formers (Table 2). The plates were designed that two tests could be carried out per plate. Each test series consisted of two test specimens. One plate contained void formers on both sides, while the second one contained void formers on one side only, so that the reference test could be carried out on the opposite side.

8.4.2 Test specimens in detail

The special feature of the test series V-Q-10-141 lies in the cross-section height, which was kept as low as possible contrary to all design rules acc. to [50]. The concrete covering for the reinforcement was set with only 1 cm towards the top and bottom of the component. Fig. 21 shows an example of the structure of the test objects.

The void formers were arranged parallel to the edge of the specimen without gaps. In the transverse direction they are aligned with the outer edge of the concrete. The bending reinforcement used was St 900/1000 with a diameter of 15 mm. Conventional reinforcing steel B500 could not be used due to the specification of a realistic degree of longitudinal reinforcement of maximum 2% and the adherence to permissible bar spacings. The transverse reinforcement corresponds to the quantity after 20% of the geometric longitudinal reinforcement degree. A conventional B500B bar steel was used for this purpose. The concrete covering was chosen so that it does not fall below a minimum of 1 cm. In the investigations of [51] it could be shown that the damage mechanisms caused by chlorides or carbonation have very little effect on the Nano-dur® concrete.

Längsschnitt | Longitudinal section



Querschnitt | Cross section

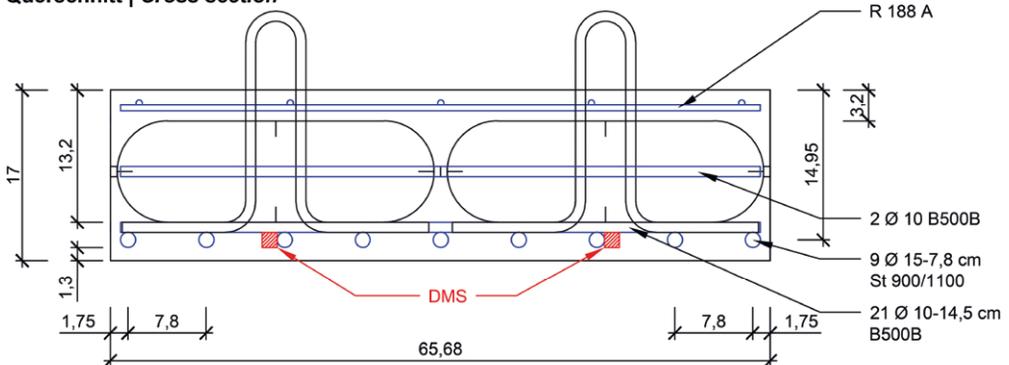


Bild 21: Aufbau der Probekörper; hier: Typ V-Q-10-170 | Fig. 21: Structure of the test specimen using the example of V-Q-10-170

Karbonatisierung sehr geringe Auswirkungen auf den Nanodur®-Beton haben.

In Anlehnung an [47] wurde eine Breite der Versuchskörper b zu $\geq 4 h$ (Probekörperhöhe, vgl. Tab. 2) gewählt. Dabei konnten in Querrichtung zwei Hohlkörperreihen nebeneinander angeordnet werden. Eine geringfügige Unterschreitung der Mindestbreite bei der Versuchsreihe V-Q-10-180 wurde akzeptiert. Des Weiteren wurde zur Vermeidung eines Effektes durch auflagernahe Einzellasten eine Schubschlankheit von $a / d \geq 4$ angestrebt, wobei a den Abstand zwischen Lasteinleitung und Auflager und d die statische Höhe des jeweiligen Probekörpers wiedergibt.

8.4.3 Betonherstellung und Materialkennwerte

Es wurden Vorversuche durchgeführt, um die Betonierbarkeit des Nanodur®-Betons unter Verwendung der vorhandenen Laborausstattung in Chargen von bis zu 400 l zu prüfen. Daraus wurde eine von der Empfehlung des Herstellers [46] etwas abweichende Rezeptur für wiederkehrende Betonagen in dieser Grö-

Based on [47], the width of the test specimens was chosen to $b \geq 4 h$ (test specimen height, see Table 2). Two rows of void formers could be arranged next to each other in the transverse direction. A slight underrun of the minimum width in the test series V-Q-10-180 was accepted. Furthermore, a shear slenderness of $a / d \geq 4$ was aimed in order to avoid an effect caused by individual loads close to the support, where a represents the distance between load introduction and support and d the static height of the respective test specimen.

8.4.3 Concrete production and material properties

Preliminary tests were carried out to test the concreteability of Nanodur® concrete in batches of up to 400 l using the existing laboratory equipment. This was used to develop a formulation for recurring concretes of this size, which differed somewhat from the manufacturer's recommendation [46] (Table 3). Instead of a white cement, a grey one was used. The hardened concrete parameters (Table 4) were determined after 28 days of wet storage of the samples.

Ausgangsstoff Material	Anteil Weight proportion [kg/m³]
Nanodur® Compound 5941 grau grey	1.050
Rheinsand 0/2 Rhine sand 0/2	430
Basaltsplitt 1/3 Basalt grit 1/3	880
Zugabewasser Mixing water	162
Fließmittel Super-plasticizer Glenium ACE 430 ^{*)}	13,65
Schwindreduzierer Shrinkage reducing admixture Eclipse® Floor	6,0

^{*)} entspricht 3,3 M.-% Zementgehalt | equal to 3.3 m% cement content

Tabelle 3: Betonrezeptur | **Table 3:** Concrete recipe period II

Benordnung entwickelt (Tab. 3). Auf einen Erhärtungsbeschleuniger wurde vollständig verzichtet. Anstatt eines Weißzementes kam ein Grauzement zum Einsatz. Die Festbetonkennwerte (Tab. 4) wurden nach 28 Tagen Nasslage der Proben bestimmt.

Da bei einer Serienfertigung von Solarkollektoren aus Beton nicht nur geringe Ausschulfristen präferiert werden, sondern auch die Festigkeitsentwicklung eine wichtige Rolle spielt (Aufbringen der Spiegelfläche, Transport zum Kollektorfeld etc.), wurde diese anhand einer Versuchsreihe bestimmt. Es wurde festgestellt, dass die Druckfestigkeit innerhalb der ersten drei Tage bereits auf einen Wert von 87 % der Druckfestigkeit nach 28 Tagen im Wasserbad ansteigt. Nach sieben Tagen sind 90 % und nach 14 Tagen sind bereits 100 % erreicht. Somit ist es möglich, die Bauteile unmittelbar nach dem Ausschalen weiter zu bearbeiten und an den Aufstellort zu verbringen. Dies spart Zeit, Lagerfläche und trägt somit zu einer deutlichen Kostenreduktion bei.

8.4.4 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper wurden im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau an der TU Kaiserslau-

Since not only short stripping times are preferred for series production of solar collectors made of concrete, but also the strength development plays an important role (application of the mirror surface, transport to the collector field, etc.), it has been determined on the basis of a series of tests. It was found that the compressive strength increases within the first three days to a value of 87% of the compressive strength after 28 days in a water bath. After seven days 90% are reached and after 14 days 100% are already reached. This makes it possible to process the components immediately after stripping and transport them to the installation site. This saves time and storage space and thus contributes to a significant reduction in costs.

8.4.4 Manufacturing of the test specimens

The test specimens were produced in the laboratory for structural engineering at the TU Kaiserslautern. Each slab was concreted individually. The void formers, type cobiax® Slim-Line S-100 [55], consist of two half-shells each, which are joined together using a patent fastener (Fig. 22, top). Fastening and securing of the position was carried out by screwing to the formwork base. In addition, a reinforcing steel mesh was arranged above the void formers and fixed to the lower re-

Materialeigenschaft Material property	Wert Value
Elastizitätsmodul Young's modulus ^{*)}	47.708,3 N/mm²
Biegezugfestigkeit Bending tensile strength ^{**)}	10,3 N/mm²
Zylinderdruckfestigkeit Cylinder compressive strength	130,4 N/mm²
Festbetonrohddichte Density	2.524,2 kg/m³

^{*)} Zylinder | Cylinder Ø 150 mm, h = 300 mm, nach | acc. to DIN EN 12390-3 [52]; ^{**) nach | acc. to DIN EN 196-1 [53]}

Tabelle 4: Festbetonkennwerte | **Table 4:** Material properties of the hardened Nanodur® concrete in period II

tern hergestellt. Jede Platte wurde einzeln betoniert. Die verwendeten Hohlkörper vom Typ cobiax® Slim-Line S-100 [55] bestehen jeweils aus zwei Halbschalen, die per Patentverschluss zusammengefügt werden (Bild 22, oben). Die Befestigung und Lagesicherung erfolgte durch Verschraubung mit dem Schalboden. Zusätzlich wurde eine Betonstahlmatte oberhalb der Hohlkörpern angeordnet und mit Bindedraht zur unteren Bewehrung hin fixiert (Bild 22, unten). Die erforderliche Höhenlage wurde mittels Abstandhaltern zwischen den Hohlkörpern und der Betonstahlmatte hergestellt.

8.4.5 Versuchsaufbau und -durchführung

Die 3-Punkt-Biegeversuche wurde mithilfe eines servo-hydraulischen Prüfzylinders durchgeführt. Die Position der Lasteinleitung wurde so gewählt, dass eine etwa 20 % höhere Querkraft an dem äußeren Auflager (bezogen auf die gesamte Platte) auftritt, um ein Querkraftversagen in diesem Bereich zu erzwingen.

Der jeweils unbelastete Plattenteil wurde während des Versuchs fortlaufend unterstützt, damit keine ungewollten Schnittkräfte durch diesen Kragarm in den untersuchten Bereich eingeleitet wurden. Die Auflagerung erfolgte auf Rollenlagern, damit eine störungsfreie Verdrehung möglich war. Zwischen der Rollenlagerung und dem Probekörper wurden Stahlbleche mit den Abmessungen $b \times h = 100 \times 20$ mm und ein Elastomer mit einer Stärke von 1 cm angeordnet. Im Bereich der Lasteinleitung wurde ein Lastverteilungsträger eingesetzt, der wiederum auf einem Elastomer mit einer Stärke von 1 cm gelagert wurde. Oberhalb des Lastverteilungsträgers wurde eine Kalotte auf zwei Lagen PTFE-Folie angeordnet, damit sowohl geringe Verdrehungen als auch Verschiebungen während des Versuchs ermöglicht werden konnten. Zum besseren Verständnis der Rissverläufe wurde die Lage der Hohlkörper bereits vor Versuchsbeginn auf den Probekörpern eingezeichnet (Bild 23).

Es wurden induktive Wegaufnehmer (IWA) und jeweils über den Auflagern und in den Viertelpunkten angeordnet, zudem noch 2 IWA un-

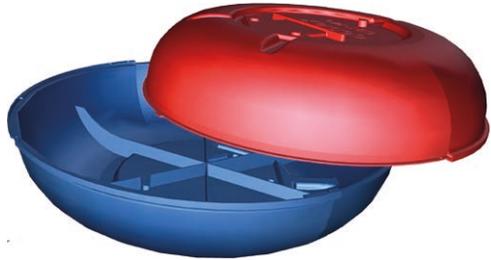


Bild 22: Detail Hohlkörper cobiax® Slim-Line S-100 (oben), Hohlkörper nach Einbau (unten) | **Fig. 22:** Detail cobiax® S-100 void former (top), void former after assembly (bottom)

inforcement with steel wire (Fig. 22, bottom). The required height was achieved by spacers between the void formers and the reinforcing steel mesh.

8.4.5 Test setup und execution

The 3-point bending tests were carried out with a servo-hydraulic test cylinder. The position of the load introduction was chosen so that an approximately 20% higher transverse force occurs at the outer support (relative to the entire plate) in order to force a shear force failure in this area.

The unloaded part of the slab was continuously supported during the test so that no unwanted forces were introduced into the examined area by this cantilever arm. The support was made on roller bearings so that a free rotation was possible. Steel sheets measuring $w \times h = 100 \times 20$ mm and an elastomer with a thickness of 1 cm were placed between the roller bearing and the test specimen. A load distribution beam was used in the load introduction area, which was supported on an elastomer with a thickness of 1 cm. Above the load distribution beam, a calotte was placed on two layers of PTFE foil to allow both minor twisting and displacement during the test. For a better understanding of



Bild 23: Versuchsaufbau am Beispiel V-Q-10-160-2 | Fig. 23: Test setup using the example of V-Q-10-160-2

terhalb der Lasteinleitung über die Breite des Probekörpers verteilt. Die Dehnungsmessstreifen (DMS) wurden in den Drittelpunkten des Querschnitts direkt an der Biegezugbewehrung angebracht (s. Bild 21).

Zu Beginn der Versuchsdurchführung wurden 10 Lastzyklen auf Gebrauchslastniveau weggesteuert aufgebracht. Dies dient der Ausbildung eines abgeschlossenen Rissbildes und verhindert eine Überschätzung der tatsächlichen Bruchlast durch Verkanten der Rissflanken im Falle einer direkten Ansteuerung der Bruchlast. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass das Gebrauchslastniveau innerhalb von zwei Minuten erreicht wurde. Die Last wurde dann drei Minuten aufrechterhalten und anschließend wieder auf 1 kN gesenkt. Nach Erreichen der 10 Lastzyklen wurde die Last in Schritten von je 10 % der Gebrauchslast bis zum Bruch gesteigert.

8.4.6 Versuchsergebnisse

Nachfolgend werden die Beobachtungen während der Versuchsdurchführung und die Versuchsergebnisse aufgezeigt. Während der Versuche wurden nach jedem der 10 Lastzyklen und bei jeder weiteren Laststufe die Rissfortschritte markiert. In Bild 24 sind die Rissverläufe sowohl nach dem ersten und dem zehnten Lastzyklus (schwarze Markierung), als auch bis zum Bruch-

the crack paths, the position of the void formers was already drawn on the test specimens before the start of the test (Fig. 23).

Inductive displacement transducers (IWA) were installed above the supports and in the quarter points, and 2 IWA were distributed over the width of the test specimen below the load introduction. The strain gauges (DMS) were attached directly to the bending reinforcement in the third points of the cross-section (Fig. 21).

At the beginning of the test, 10 load cycles were applied in a displacement-controlled manner at service load level. This serves to form a closed crack pattern and prevents an overestimation of the actual breaking load due to tilting of the crack flanks in the case of direct initiation of the breaking load. The loading speed was selected so that the service load level was reached within two minutes. The load was then maintained for three minutes and subsequently reduced to 1 kN. After the 10 load cycles had been reached, the load was increased in steps of 10% of the service load until breakage.

8.4.6 Test results

In the following the observations during the test and the results are shown. During the tests, the crack propagation was marked after each of the

zustand (Lastschritte in roter Markierung) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bereits nach einmaliger Belastung sowohl Biegerisse unterhalb der Lasteinleitung als auch Risse im Bereich der Hohlkörper auftreten. Diese Risse weisen eine stufenähnliche Form, mit horizontalem Abschnitt in der Hohlkörperachse auf. Weiterhin fällt auf, dass die Risse z. T. bereits bis in den Bereich der Betondruckzone verlaufen. Nach Abschluss des zehnten Lastzyklus ist das Rissbild nahezu unverändert. Der Versagensriss (vgl. Bild 24, unten) ist links der Lasteinleitung aus einem Biegeriss entstanden und somit, anders als nach der Vorbemessung zu erwarten, im Bereich des inneren Auflagers. Im Bruchzustand trat das Versagen schlagartig ein, gekennzeichnet durch ein instabiles Risswachstum des maßgebenden

10 load cycles and at each subsequent load stage. Fig. 24 shows the crack propagation after the first and tenth load cycle (black marking) and up to the state of fracture (load steps in red marking). It can be seen that already after the first loading bending cracks below the load introduction and cracks in the void former area occurred. These cracks have a step-like shape with a horizontal section in the void former axis. It is also noticeable that some of the cracks already run into the area of the concrete pressure zone. After completion of the tenth load cycle, the crack pattern was almost unchanged. The failure crack (cf. Fig. 24, below) has arisen from a bending crack to the left of the load introduction and thus, contrary to what can be expected after the preliminary design, in the area of the inner support. In

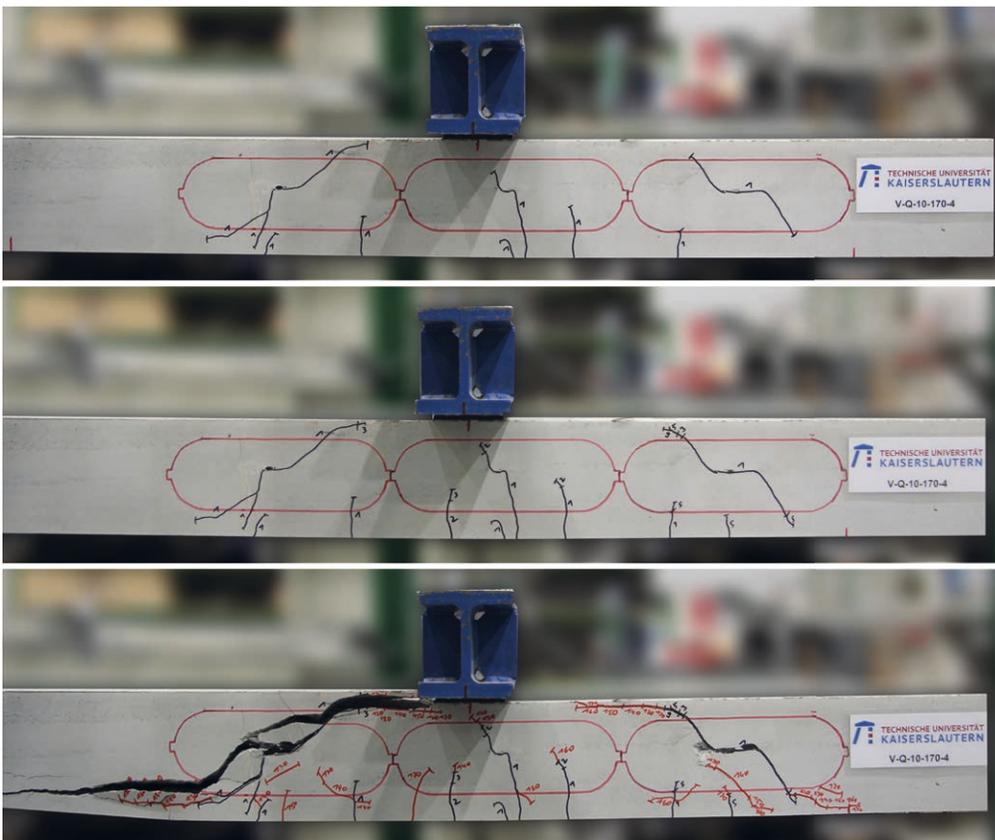


Bild 24: Rissverläufe am Beispiel V-Q-10-170-4, oben: 1. Zyklus GZG, Mitte: 10. Zyklus GZG, unten: Bruchzustand | **Fig. 24:** Crack pattern of specimen V-Q-10-170-4, top: 1st cycle SLS, centre: 10th cycle SLS, bottom: failure state

Biegeschubrisses bis hin zur Lasteinleitung und auftretendem Sekundärriss.

Im Wesentlichen konnten dieser Rissverlauf und das Eintreten des Bruchzustandes bei allen Versuchen festgestellt werden. Im Unterschied dazu trat der Versagensriss bei den Referenzproben jeweils rechts der Lasteinleitung, d. h. am äußeren Auflager, auf.

Für eine bessere Vergleichbarkeit wird ein Abminderungsfaktor d_{vf} bestimmt, der den Einfluss der Hohlkörper auf die Querkrafttragfähigkeit einer Platte aus Nanodur®-Beton ohne Querkraftbewehrung nach Gl. 6.2a in DIN EN 1992-1-1 [50] (s. Gl. (3)) widerspiegelt. Lt. [54] gibt der Vorfaktor $C_{Rd,c}$ einen empirisch ermittelten Wert unter Berücksichtigung des erforderlichen Zuverlässigkeitsindex für einen Zeitraum von 50 Jahren wieder. Er wurde anhand zahlreicher Querkraftversuche mit Normalbeton kalibriert, die Übertragbarkeit auf den Nanodur®-Beton ist folglich nicht per se gegeben. Aufgrund der fehlenden Datengrundlage werden die nachfolgenden Betrachtungen dennoch in Anlehnung an [54] mit $C_{Rd,c} = 0,2$ durchgeführt. Als Betondruckfestigkeit wird die mittlere Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} angesetzt (Gl. 3). Weitere Bestandteile sind der Maßstabsfaktor k , der Längsbewehrungsgrad ρ_l , die kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone b_w sowie die statische Höhe d . Betonlängsspannungen σ_{cp} werden nicht angesetzt.

$$V_{Rm,c}^{[N]} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (3)$$

Anhand der Tests ergibt sich ein Abminderungsfaktor d_{vf} nach Gl. (4):

$$d_{vf} = \frac{V_u}{V_{Rm,c}} = \frac{V_u}{0,2 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3} \cdot b_w \cdot d} \quad (4)$$

Nachfolgend wird der ermittelte Vorfaktor d_{vf} der statischen Höhe d (Bild 25) und der ermittelten Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} (Bild 26) gegenübergestellt. In den Diagrammen ist zu erkennen, dass der Abminderungsfaktor zwischen 0,4 und 0,5 liegt. Ausnahme ist die Versuchsreihe mit

the fracture state, the failure occurred abruptly, characterized by an unstable crack growth of the decisive bending shear crack up to load introduction and occurring secondary crack.

Essentially, this crack pattern and the occurrence of the fracture condition could be determined in all tests. In contrast, the failure crack occurred in the reference specimens to the right of the load introduction, i.e. at the outer support.

For better comparability, a reduction factor d_{vf} is determined, which reflects the influence of void formers on the shear strength of a slab of Nanodur® concrete without shear reinforcement acc. to Eq. 6.2a in DIN EN 1992-1-1 [50], Eq. (3). Acc. to [54], the pre-factor $C_{Rd,c}$ represents an empirically determined value for a period of 50 years, taking into account the required reliability index. It was calibrated by means of numerous shear force tests with normal strength concrete, the transferability to the Nanodur® concrete is therefore not given per se. Due to the missing data basis, the following considerations are nevertheless carried out on the basis of [54] with $C_{Rd,c} = 0,2$. The concrete compressive strength in Eq. (3) is assumed to be the mean cylinder compressive strength f_{cm} . Further components are the scale factor k , the longitudinal reinforcement degree ρ_l , the smallest cross-section width within the tensile zone b_w as well as the static height d . The longitudinal stresses σ_{cp} are not considered.

The tests result in a reduction factor d_{vf} acc. to Eq. (4):

$$d_{vf} = \frac{V_u}{V_{Rm,c}} = \frac{V_u}{0,2 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3} \cdot b_w \cdot d} \quad (4)$$

In the following, the determined pre-factor d_{vf} is compared with the static height d (Fig. 25) and the determined cylinder compressive strength f_{cm} (Fig. 26). The diagrams show that the reduction factor lies between 0.4 and 0.5. The exception is the test series with a plate thickness of

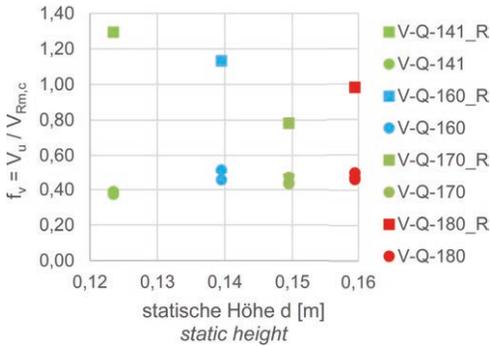


Bild 25: Faktor d_{vf} in Abhängigkeit der statischen Höhe d | Fig. 25: Coefficient d_{vf} as a function of static height d

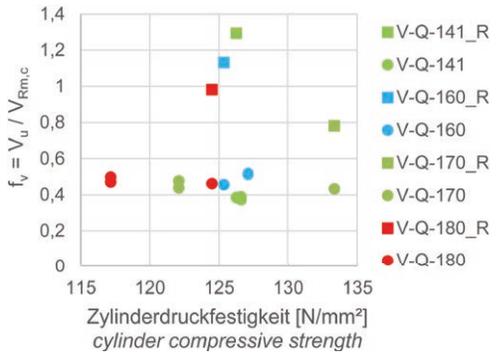


Bild 26: Faktor d_{vf} in Abhängigkeit der ermittelten Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} | Fig. 26: Coefficient d_{vf} as a function of cylindrical compressive strength f_{cm}

14,1 cm Plattendicke. Der hier berechnete Faktor liegt im Mittel bei 0,38. Die Betondruckfestigkeit hat gem. Bild 26 keine Auswirkung auf d_{vf} . Dies und die bei allen Versuchsreihen identischen Randbedingungen lassen darauf schließen, dass die Verwendung der Hohlkörper S-100 bei der Versuchsreihe V-Q-10-141 zu einer Beeinflussung der Druckzone und damit einhergehend zu einer weiteren Abminderung der Querkrafttragfähigkeit führt. Ab 16 cm Plattenstärke und damit verbunden einer Betonüberdeckung der Hohlkörper von mind. 2,2 cm ist davon auszugehen, dass die Druckzone durch die Verwendung der Hohlkörper nicht beeinträchtigt wird. Der Mittelwert aller durchgeführten Referenzversuche liegt etwa bei 1,1. Eine Auswertung in Anlehnung an DIN EN 1992-1-1 [50] und Heft 600 [54] erscheint unter Berücksichtigung der begrenzten Datengrundlage somit als gerechtfertigt.

Konservativ betrachtet beträgt der Abminderungsfaktor $d_{vf} = 0,35$. Gegenüber dem in [47], [55] und [56] festgelegten Abminderungsfaktor $f_v = 0,5$ stellt dies eine weitere Reduzierung der Tragfähigkeit dar. In [47] wurde ein modifiziertes Bemessungsmodell nach [57] zur Ermittlung der rechnerischen Querkrafttragfähigkeit von Hohlkörperdecken hergeleitet. Im Wesentlichen beruht dieses Bemessungsmodell auf der Kombination der drei Hauptquerkrafttraganteile ungerissene Druckzone, Rissreibung und Dübelwirkung. Im Modell von [47] wurde der negative Einfluss der Hohlkörper auf die Haupttraganteile bereits berücksichtigt. Im direkten Vergleich

14,1 cm. The average factor calculated here is 0.38. Acc. to Fig. 26, the concrete compressive strength has no effect on d_{vf} . This circumstance and the identical boundary conditions in all test series lead to the conclusion that in the test series V-Q-10-141 the use of void formers of type S-100 leads to an influence on the pressure zone and thus to a further reduction in the shear force bearing capacity. From a plate thickness of 16 cm and a concrete covering of the void formers of at least 2.2 cm, it can be assumed that the pressure zone will not be affected by the use of these. The mean value of all reference tests performed is approximately 1.1. An evaluation based on DIN EN 1992-1-1 [50] and DAFStb Book 600 [54] thus appears to be justified under consideration of the limited data basis.

Conservatively the reduction factor can be determined to $d_{vf} = 0.35$. Compared to the reduction factor $f_v = 0.5$ defined in the investigations in [47], [55], [56], this represents a further reduction in the load carrying capacity. In [47], a modified design model acc. to [57] was derived to determine the calculated shear load carrying capacity of hollow core slabs. Essentially, this design model is based on the combination of the three main transverse load bearing components: non-cracked pressure zone, crack friction and dowel effect of the bending reinforcement. In the model of [47], the negative influence of the void formers on the main load-bearing elements has already been taken into account. In the direct comparison of these considerations

dieser Überlegungen mit den hier durchgeführten Untersuchungen unterscheidet sich der Nanodur®-Beton von dem bisher betrachteten Normalbeton im Wesentlichen durch die höhere Zug- und Druckfestigkeit und das Größtkorn von nur 3 mm. Insbesondere letzteres kann den Traganteil der Rissverzahnung negativ beeinflussen. Ein kleineres Größtkorn bedeutet in diesem Fall eine geringere Verzahnungstiefe. Des Weiteren ist durch die Verwendung eines hochfesten Betons ein Rissverlauf durch das Korngefüge hindurch möglich. Durch die spezielle Anordnung der Hohlkörper wird die ohnehin nur geringe Verzahnungsfläche noch weiter herabgesetzt. Es wird vermutet, dass durch die große Zug- und Druckfestigkeit des Nanodur®-Betons Reserven in der Tragfähigkeit der ungerissenen Druckzone und der Dübeltragwirkung aktiviert werden und die verringerte Tragfähigkeit der Rissverzahnung in einem bestimmten Ausmaß kompensiert wird.

with the investigations carried out here, the Nanodur® concrete differs from the previously considered normal strength concrete essentially by the higher tensile and compressive strength and the maximum grain size of only 3 mm. In particular, the selection of the maximum grain size can have a negative effect on the bearing portion of the crack tothing. In this case, a smaller maximum grain size means a smaller tothing depth. Furthermore, the use of a high-strength concrete allows the crack to run through the grain structure. The special arrangement of the void formers even further reduces the already small tothing surface. It is assumed that the high tensile and compressive strength of Nanodur® concrete activates reserves in the load-bearing capacity of the non-cracked compression zone and the dowel load-bearing effect and compensates for the reduced load-bearing capacity of the crack tothing to a certain extent.

$$V_{Rd,c,vf}^{[N]} = d_{vf} \cdot \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (5)$$

Unter Berücksichtigung aller durchgeführten Untersuchungen kann die Querkrafttragfähigkeit von Platten ohne Querkraftbewehrung aus Nanodur® mit integrierten Hohlkörpern des Typs cobiax® S-100 nach Gl. (5) und unter Verwendung des konservativ angesetzten Abminderungsfaktors $d_{vf} = 0,35$ berechnet werden. Die Höhe des oberen Betonspiegels darf hierbei einen Wert von 2,2 cm nicht unterschreiten. Eine allgemeingültige Bemessungsempfehlung kann anhand der hier beschriebenen Versuche nicht ausgesprochen werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen, insbesondere mit Variation der Hohlkörpergrößen und -anordnung erforderlich.

Taking into account all investigations carried out, the shear force bearing capacity without shear force reinforcement of slabs made of Nanodur® concrete with integrated void formers of the type cobiax® S-100 can be calculated acc. to Eq. (5) and using the conservatively applied reduction factor $d_{vf} = 0.35$. The height of the upper concrete level must not fall below a value of 2.2 cm. A generally valid design recommendation cannot be made based on the tests described here. This requires further investigations, in particular with variation of the void former sizes and arrangement.

9 Demonstratoren (TU KL)

9.1 Leichte Schale aus Hochleistungsbeton als Parabolrinne für solarthermische Kraftwerke

9.1.1 Entwurf

Zur Verdeutlichung der generellen Machbarkeit einer dünnwandigen Schale aus Nanodur®-

9 Demonstrators (TU KL)

9.1 Light-weight shell made of high-performance concrete as parabolic trough for solar thermal power plants

9.1.1 Design

To illustrate the general feasibility of a thin-walled shell of Nanodur® concrete as a para-

Beton als Parabolrinne für solarthermische Kraftwerke wurde in Phase I des SPP an der TU KL ein Demonstratormodul von 3,2 m Länge hergestellt. Das Konzept wurde an den bestehenden Kollektortyp IST PT-1 angelehnt, der auf dem Testgelände des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) bereits ausführlich auf die thermische Wirksamkeit hin geprüft wurde [58]. Die Geometriedaten sind Bild 27 zu entnehmen. Die Schale ist insgesamt sehr schlank ausgeführt.

9.1.2 Material

Grundlage des Nanodur®-Betons ist das bereits beschriebene Nanodur® Compound 5941. Dieses wird mit Wasser, Sand, Gesteinskörnung, Fließmittel, Schwindreduzierer und ggf. Erhärtungsbeschleuniger vermischt. Im Rahmen dieses Projekts wurden an der TU KL unterschiedliche Mischungszusammensetzungen hinsichtlich Druck- und Zugfestigkeit als auch Festigkeitsentwicklung geprüft. Die Mischungen unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Anteil des Erhärtungsbeschleunigers (Tab. 5). Erwartungsgemäß nimmt die Festigkeitsentwicklung mit zunehmendem Gehalt des Erhärtungsbeschleunigers zu. Durch seine speziellen Eigenschaften und die zähe aber doch sehr fließfähige Konsistenz wird empfohlen, die Rezeptur für jeden Anwendungsfall individuell anzupassen. Für die Herstellung des Demonstrators konnte nach Abschluss der Untersuchungen die Mischung M2 empfohlen werden [51].

Parabolic trough for solar thermal power plants, a demonstrator module 3.2 m long was produced in phase I of the SPP at the TU KL. The concept was based on the existing collector type IST PT-1, which has already been extensively tested for its thermal effectiveness at the test site of the German Aerospace Center (DLR) [58]. The geometry data is shown in Fig. 27. The shell is very slim overall.

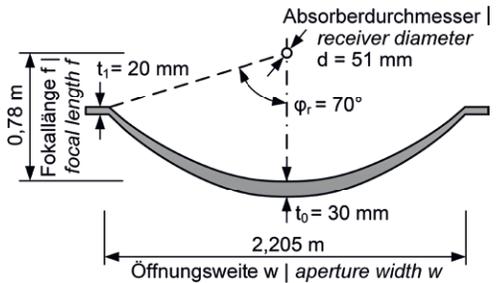


Bild 27: Abmessungen des Demonstratormoduls | Fig. 27: Dimensions of the prototype

9.1.2 Material

The Nanodur® concrete is based on the already described Nanodur® Compound 5941, which is mixed with water, sand, aggregates, superplasticizer, shrinkage reducer and, if necessary, hardening accelerator. Within the scope of this project, different compound compositions were tested at the TU KL with regard to compressive and tensile strength as well as strength development. The compounds differ essentially in the proportion of hardening accelerator (Table 5). As expected, the strength develop-

Ausgangsstoff Material	Anteil Weight proportion in [kg/m³]		
	M1	M2	M3
Nanodur® Compound 5941 weiß white		1.042	
Rheinsand 0/2 Rhine sand 0/2		426	
Basaltsplitt 1/3 Basalt grit 1/3		882	
Zugabewasser Mixing water	160,0	147,7	135,4
Fließmittel Super-plasticizer Glenium ACE 430 ¹⁾		20,3	
Schwindreduzierer Shrinkage reducing admixture Eclipse® Floor		8	
Erhärtungsbeschleuniger Hardening accelerator X-SEED® 100	-	12,3	24,6

¹⁾ entspricht 3,3 M.-% Zementgehalt | Equal to 3.3 m% cement content

Tabelle 5: Betonrezepturen | Table 5: Concrete recipes

Materialeigenschaft Material property	Wert Value
Elastizitätsmodul Young's modulus	47.593 N/mm ²
Biegezugfestigkeit Bending tensile strength	15,1 N/mm ²
Zylinderdruckfestigkeit Cylinder compressive strength	109,1 N/mm ²
Festbetonrohddichte Density hardened concrete	2.524 kg/m ³

Tabelle 6: Festbetonkennwerte | **Table 6:** Material properties of the hardened Nanodur® concrete

Die Mittelwerte der Festbetonkennwerte sind in Tabelle 6 dargestellt.

9.1.3 Herstellung

Der Demonstrator wurde vollständig an der TU Kaiserslautern hergestellt [22]. Als Schalung für das Kollektormodul wurde eine Fratec®-Sonderschalung der Firma Max Frank GmbH und Co. KG verwendet. Diese besteht aus einem zugeschnittenen Polystyrolkern mit einer selbstklebenden Folie als Schalhaut. Die Schale wurde liegend betoniert, wobei der Beton vom Scheitel aus eingefüllt wurde, um mögliche Luft einschüsse zu vermeiden. Als Bewehrung wurde eine konventionelle Betonstahlmatte Typ Q188A verwendet, die ausschließlich zum Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit dient.

Für die Verspiegelung der Betonoberfläche standen mehrere Konzepte wie z. B. Glas- oder Silberspiegel, Aluminiumblech und Reflektorfolie zur Auswahl. Aufgrund der notwendigen manuellen Applizierung wurde ein PVD-beschichtetes Aluminiumblech (*Physical Vapour Deposition*) mit einer Stärke von 0,5 mm verwendet. Dieses wurde mit einem Konstruktionsklebstoff der Firma Sika auf der Betonoberfläche fixiert.

Abschließend wurden die Unterbauten zusammengefügt. Das Element ruht auf der patentrechtlich geschützten Abrollkonstruktion [13], Abschnitt 4. Bei der Nachführung bewegt sich der Schwerpunkt der Gesamtkonstruktion auf einer horizontalen Ebene. Dies reduziert den notwendigen Energieaufwand des Antriebs erheblich. Bild 28 zeigt den fertig installierten Demonstrator auf dem Dach eines Laborgebäudes der TU Kaiserslautern.

ment increases with increasing content of the hardening accelerator. Due to its special properties and tough yet very free-flowing consistency, it is recommended that the formulation be adapted individually for each application. For the production of the demonstrator the mixture M2 could be recommended after completion of the investigations [51].

The mean values of the hardened concrete are shown in Table 6.

9.1.3 Manufacturing process

The demonstrator was manufactured entirely at the TU Kaiserslautern [22]. A Fratec® special formwork from Max Frank GmbH & Co. KG was used as formwork for the collector module. It consists of a cut-to-size polystyrene core with a self-adhesive film as formwork skin. The shell was concreted horizontally, whereby the concrete was filled in from the apex in order to avoid possible air inclusions. As reinforcement, a conventional reinforcing steel mesh type Q188A was used, which serves exclusively for the ultimate limit state.

Several materials such as glass or silver mirrors, aluminium sheet and reflector foil were available for mirroring the concrete surface. Due to the necessary manual application, a PVD-coated aluminium sheet (physical vapor deposition) with a thickness of 0.5 mm was used. This was fixed to the concrete surface with an adhesive from Sika.

Finally, the substructures were joined together. The element is supported by on the patented roll-off construction [13], section 4. During sun-tracking, the centre of gravity of the entire construction moves on a horizontal plane. This considera-

9.1.4 Vermessung

Zur Überprüfung der Formgenauigkeit und Validierung der vorausgegangenen Untersuchungen an der RUB wurde der Demonstrator in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) vermessen. Die Vermessung erfolgte mithilfe der digitalen Nahbereichsfotogrammetrie, einem berührungslosen Messverfahren mit dem die Koordinaten charakteristischer Punkte im Raum ermittelt werden können. Diese Punkte wurden im Vorhinein mithilfe von insgesamt 200 Messmarken auf der Reflektoroberfläche markiert. Durch die Aufnahme von Fotos aus unterschiedlichen Blickwinkeln lassen sich dann geometrische Beziehungen zwischen den Messpunkten ableiten und die Punktkoordinaten exakt bestimmen [59]. Die am Demonstrator ermittelten Koordinaten wurden mit der Soll-Form einer idealen verglichen, um die Abweichungen zu bestimmen. In Bild 29 (links) ist die gemessene Verformung, welche maßgeblich im Bereich von ± 5 mm variiert, über die Kollektoroberfläche dargestellt. Anhand der Verformung konnte die Winkelabweichung der reflektierten Solarstrahlen bestimmt werden, welche mit der in Abschnitt 3 beschriebenen Akzeptanzfunktion f_{PT} , Gl. (1), bewertet wurde, und so die lokalen, optische Wirksamkeiten über die Oberfläche bestimmt werden (Bild 29, rechts). Es zeigt sich, dass z. T. Randbereich keine optische Wirksamkeit mehr besitzen, also die reflektierte Strahlung für diese Bereiche nicht auf das Absorberrohr gebündelt werden kann. Dennoch besitzt der Demonstrator global eine optische Wirksamkeit von 94 %.

9.2 Demonstrator mit integrierten Hohlkörpern

Auch in der zweiten Phase des gemeinsamen Projekts war ein Großdemonstrator aus Nanodur®-Beton geplant, nun mit integrierten Hohlkörpern. Dieser befindet sich zum Zeitpunkt des Abschlussberichtes jedoch noch in der Herstellung. Der 1,5 m lange Demonstrator entspricht der Form des in Abschnitt 4 behandelten Moduls mit einer Aperturweite von 10 m und wurde, durch herstellungsbedingte Re-

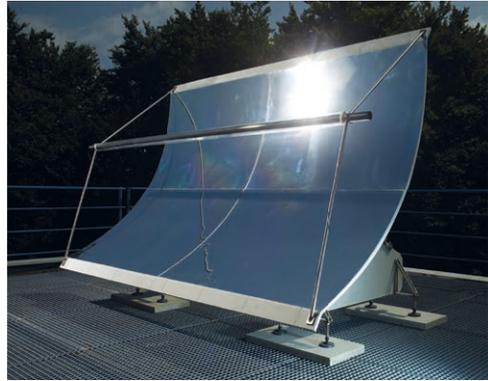


Bild 28: Großdemonstrator der TU Kaiserslautern |
Fig. 28: Prototype at TU Kaiserslautern

bly reduces the energy required by the drive. Fig. 28 shows the fully installed demonstrator on the roof of a TU Kaiserslautern laboratory building.

9.1.4 Surface measurement

The demonstrator was measured in cooperation with the German Aerospace Center (DLR) to check the shape accuracy and validate the previous investigations at the RUB. The measurement was carried out with the help of digital close-range photogrammetry, a non-contact measuring method with which the coordinates of characteristic points in space can be determined. These points were marked in advance on the reflector surface using a total of 200 measuring marks. By taking photographs from different angles, geometric relationships between the measuring points can be derived and the point coordinates precisely determined [59]. The coordinates measured at the demonstrator were compared with the nominal shape of an ideal one in order to determine the deviations. Fig. 29 (left) shows the measured deformation, which varies significantly in the range of ± 5 mm over the collector surface. Based on the deformation, the angular deviation of the reflected solar rays could be determined, which was evaluated with the acceptance function f_{PT} , Eq. (1), described in section 3, and thus the local optical efficiencies could be determined over the surface (Fig. 29, right). It is shown that some

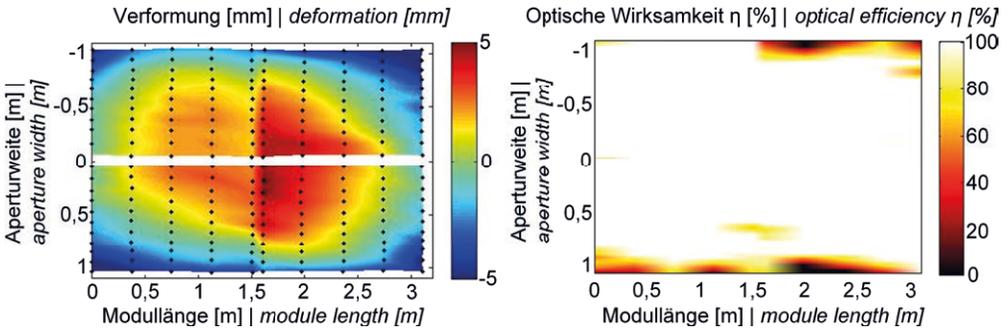


Bild 29: Gemessene Verformungen (links) und ermittelte optische Genauigkeit (rechts) | Fig. 29: Measured deformations (left) and optical efficiency (right)

strikationen im Labor, mit dem Faktor 0,3 skaliert. Die Geometrie und Abmessungen sind in Bild 30 dargestellt. Die Fokallänge, also der Abstand vom Scheitelpunkt der Spiegelfläche bis zum Brennpunkt der Parabelgeometrie beträgt 894 mm. Die Lagerung der Parabolrinne erfolgt auf Abrollsieheln, die an der Unterseite der Schale angebracht sind und auf einem Abrollhügel, der den Unterbau repräsentiert (Bild 31).

In den Querschnitt der Schale werden Hohlkörper integriert. Die Auswahl geeigneter Hohlkörper erfolgt ausschließlich für die Herstellung des Demonstrators. Marktübliche Hohlkörper, z. B. cobiax® Eco-Line, können aufgrund der skalierten Größe nicht verwendet werden. Die Ermittlung der Lage und Größe der anzuordnenden Hohlkörper wurde mithilfe der an der Ruhr-Universität Bochum entwickelten Methode (vgl. Abschnitt 7.1.4) durchgeführt. Der Querschnitt wird mit mehreren Lagen Mikrobewehrung, d. h. Matten aus normalfestem Stahldraht mit einem Durchmesser von 1,0 mm bei einer Maschenweite von 12,7 mm, bewehrt. Die Mikrobewehrung dient hierbei nicht der Sicherstellung der geforderten Struktursteifigkeit, sondern stellt die Robustheit des Systems im Grenzzustand der Tragfähigkeit sicher. Des Weiteren können die Hohlkörper zwischen den Bewehrungslagen zur Lagesicherung eingefasst werden. Zur einfachen Sonnennachführung wird, ähnlich wie bei dem bereits bestehenden Demonstrator, ein Linearantrieb installiert. Zur Verifizierung der Geometrie und der damit einhergehenden optischen Wirksamkeit wird die Spiegelfläche

edge areas no longer have any optical effectiveness, i.e. the reflected radiation for these areas cannot be bundled onto the absorber tube. Nevertheless, the demonstrator has a global optical effectiveness of 94%.

9.2 Demonstrator with void formers

A large-scale demonstrator made of Nanodur® concrete was also planned in the second phase of the project, now with integrated void formers. However, this is still in production at the time of the final report. The 1.5 m long demonstrator corresponds to the shape of the module treated in section 4 with an aperture width of 10 m and was scaled by a factor of 0.3 due to production restrictions in the laboratory. The geometry and dimensions are shown in Fig. 30. The focal length, i.e. the distance from the apex of the mirror surface to the focal point of the parabolic geometry, is 894 mm. The parabolic trough is mounted on sickles, which are attached to the underside of the shell, and on a hill representing the substructure (Fig. 31).

Void formers are integrated into the cross-section of the shell. The selection of suitable ones is made only for the production of the demonstrator. Due to the scaled size, commercially available void formers, e.g. cobiax® Eco-Line, cannot be used. The determination of the position and size of the void formers to be arranged was carried out using the method developed at RUB (cf. Section 7.1.4). The cross-section is reinforced with several layers of micro-reinforcement, i.e.

M 1 : 15 [mm]

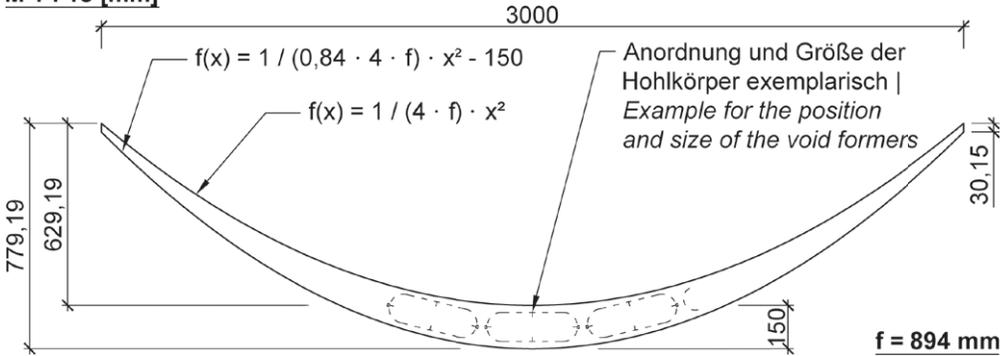


Bild 30: Abmessungen Demonstrator mit Hohlkörpern [mm] | Fig. 30: Dimensions of prototype with void formers [mm]

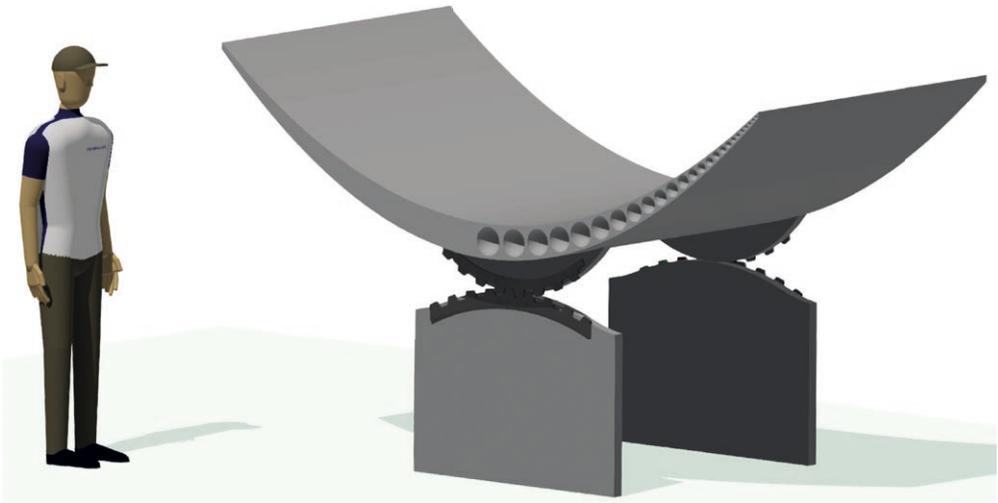


Bild 31: Computeranimation Demonstrator mit Hohlkörpern | Fig. 31: Computer animation of the prototype with void formers

abschließend mittels ATOS 3D-Scanner der Firma GOM Messtechnik vermessen und der Idealparabel gegenübergestellt.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt zielte auf die Entwicklung leichtgewichtiger und gleichzeitig verformungsarmer Schalenstrukturen am Beispiel von Parabolrinnenkollektoren für solarthermische Kraftwerke ab. Für die Entwicklung von Tragstrukturen wurden verschiedene Strukturkonzepte erarbeitet, welche sowohl die materialbedingten

meshes of normal-strength steel with a diameter of 1.0 mm and a mesh size of 12.7 mm. The micro-reinforcement does not serve to ensure the required structural stiffness, but ensures the robustness of the system in the ultimate limit state. Furthermore, the void formers can be enclosed between the reinforcement layers to secure the position. For simple sun tracking, a linear drive is installed, similar to the existing demonstrator. To verify the geometry and the associated optical effectiveness, the mirror surface is finally measured using an ATOS 3D scanner from GOM Messtechnik and compared with the ideal parabola.

Eigenschaften des im Rahmen des Projekts genutzten und auf den Anwendungsfall weiterentwickelten NANODUR®-Beton berücksichtigt, als auch die stark tragwerksbedingten Beanspruchungen, wie Eigenlasten, thermische Beanspruchungen und insbesondere auslenkungs- und anströmungsbedingte Windlasten, welche in Windkanaluntersuchungen – für die unterschiedlichen Geometrien der Förderphasen – abgeleitet wurden.

Die Herleitung geeigneter Strukturkonzepte ist eng verknüpft mit den forcierten Geometrieansprüchen bereits existierender Parabolrinnen-Kollektormodulen, sodass in erster Förderphase eine Optimierungsstrategie für die Abmessungen des *EuroTrough*-Moduls mit einer Apertur von $5,80 \times 12,00$ m entwickelt wurde. Diese basiert auf einer Formoptimierung mit vorgeschalteter Sensitivitätsanalyse und einer Erweiterung der numerischen Optimierung auf Ebene von analytischen Metamodellen. Begrenzt wurde der Optimierungsprozess durch materielle Randbedingungen, primär durch die zentrische Zugfestigkeit des Betons. Mithilfe eines hergeleiteten Wirksamkeitskriteriums auf Basis des Winkelfehlers der reflektierten Solarstrahlen konnte die Genauigkeit nachgewiesen werden, was der Zielsetzung einer leichten, verformungsarmen Schalenstruktur gerecht wird. Aufbauend auf den Erkenntnissen und Optimierungsstrategien aus Förderphase I wurden in Förderphase II Hohlstrukturen für Kollektormodule mit großer Aperturweite abgeleitet. Dazu sind Methoden auf Basis topologischer Optimierung zur inneren Strukturfindung entwickelt worden, um sowohl zentral im Querschnitt verlaufende, steifigkeitsspezifische Rippenverstärkungen als auch Hohlkörperverteilungen zu generieren. Robuste Dichtelayouts wurden durch Berücksichtigung mehrerer Lastfälle erzeugt. Mit der umfangreichen Datenbasis aus Windkanaluntersuchungen konnten Streuungen der Schalenbeanspruchungen simuliert und aufgezeigt werden.

In experimentellen Untersuchungen wurde der NANODUR®-Beton weiterentwickelt, indem durch Zugabe von Erhärtungsbeschleunigern und Verfeinerung der Rezeptur oder auch durch

10 Summary and outlook

The project aimed at the development of lightweight and simultaneously low-deformation shell structures using the example of parabolic trough collectors for solar thermal power plants. Various structural concepts were developed for the design of supporting structures, which take into account both the material-related properties of NANODUR® concrete, which is used within the framework of the project and enhanced for this specific application, as well as specific action effects, such as dead loads, temperature constraints and, in particular, wind loads, which were derived in wind tunnel tests – for the different geometries of the funding phases – and strongly depend on the wind flow direction and rotation of the collector.

The derivation of structural concepts is strictly related to the forced geometrical demands of already existing parabolic trough collector modules, so that an optimisation strategy for the dimensions of the *EuroTrough* module with an aperture of 5.80×12.00 m was developed in the first funding phase. It is based on a shape optimization with preliminary sensitivity analysis and an extension of the numerical optimisation on the level of analytical metamodels. The optimisation process was limited by material restrictions, primarily by the axial tensile strength of the concrete. By means of a derived accuracy criterion based on the slope error of the reflected solar rays, the efficiency could be proven with respect to the objective of a light, low-deformation shell structure. Based on the findings and optimisation strategies from funding phase I, hollow core structures for collector modules with large aperture width were derived in funding phase II. Therefore, methods based on topology optimisation have been developed for the inner form finding in order to generate stiffness-orientated ribs as well as void former distributions. Robust density distributions were generated by considering several load cases. With the comprehensive database from wind tunnel tests it was possible to simulate and demonstrate the variation of the loads.

Wärmebehandlung im jungen Betonalter bereits hohe Festigkeiten erzielt werden konnten. Dies wirkt sich günstig auf eine prozessorientierte, serielle Fertigung aus, bei simultanem Erhalt der einfachen Verarbeitbarkeit des Betons. Ein kleinformatiger Demonstrator mit nur 2 bis 3 cm Wandstärke verdeutlicht die praktische Umsetzung.

Die entwickelten Methoden wurden am Beispiel von Parabolschalen hergeleitet und an diesen numerisch sowie experimentell verifiziert. Dennoch lassen sie sich allgemein auf Tragstrukturen des klassischen Ingenieurbaus übertragen. Insbesondere der Fertigteilebau kann stark profitieren, indem mithilfe von Hochleistungsbetonen leichte Bauteile mit hoher Steifigkeit und Robustheit etabliert werden. Aber auch Scheiben-, Platten- und andere Schalenträgerwerke können mithilfe der hier vorgestellten Methoden entworfen, bemessen und hergestellt werden, sodass sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten erschließen.

Dank

Ein besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des DFG-SPP 1542 (Projektnummer 198176582). Dem Institut für Strömungsmechanik der Ruhr-Universität Bochum, insbesondere Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Höffer, sei für die Unterstützung bei den Windkanaluntersuchungen gedankt. Ein besonderer Dank geht an das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), insbesondere Dipl.-Ing. Klaus Hennecke, für die technische Beratung. Der Firma Dyckerhoff GmbH in Wiesbaden wird für die umfangreiche Unterstützung mit dem Bindemittel Nanodur® Compound 5941 gedankt. Ein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang der durcrete GmbH, im Speziellen Herrn Dr.-Ing. Bernhard Sagmeister, für die fachliche Unterstützung bei der Anwendung von Nanodur®-Beton. Für die Bereitstellung der Hohlkörper sei Herrn Dr.-Ing. Karsten Pfeffer der Heinze Cobiax Deutschland GmbH recht herzlich gedankt.

In experimental tests, NANODUR® concrete was enhanced by adding hardening accelerators and improving the concrete mixture or by heat treatment in order to achieve high strengths at a young concrete age. This has a positive effect on process-oriented, serial production while simultaneously maintaining the good workability of the concrete. A small-scale demonstrator with a thickness of only 2 to 3 cm shows the practical realisation.

The developed methods were derived from the example of parabolic shells and verified numerically and experimentally. Nevertheless, they can generally be applied to supporting structures of traditional civil engineering. In particular, prefabricated construction can benefit greatly by using high-performance concretes to establish lightweight components with high rigidity and robustness. However, the methods presented here can also be used to design, dimension and manufacture slabs, plates and other shell structures, thus opening up a wide range of possible applications.

Acknowledgement

The authors thank the German Research Foundation (DFG) for the financial support of this project no. 198176582 in the framework of the DFG Priority Programme SPP 1542. Special thanks go to the Institute of Wind Engineering and Flow Mechanics of RUB, especially Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Höffer, for the support during the wind tunnel tests, and the German Aerospace Center (DLR), especially Dipl.-Ing. Klaus Hennecke, for technical advice. We would like to thank the company Dyckerhoff GmbH in Wiesbaden for the support with the binder Nanodur® Compound 5941. Special thanks in this context go to durcrete GmbH, especially Dr.-Ing. Bernhard Sagmeister for the technical support in the usage of Nanodur® concrete. We would like to thank Dr.-Ing. Karsten Pfeffer of Heinze Cobiax Deutschland GmbH for providing the void formers.

Literatur | References

- [1] Pitz-Paal, R.; Elsner, P.: Solarthermische Kraftwerke – Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“. In: acatech/Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina/Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.): Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, München/Halle/Mainz, 2015
- [2] Quasching, V.: Regenerative Energiesysteme: Technologie – Berechnung – Simulation. Carl Hanser, 2011
- [3] Schabbach, T.; Leibbrandt, P.: Solarthermie – Wie Sonne zu Wärme wird. Berlin: Springer, 2014
- [4] Stieglitz, R.; Heinzel, V.: Thermische Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Berlin: Springer, 2012
- [5] Lüpfer, E.; Pottler, K.; Schiel, W.: Optimization of cost and efficiency in concentrating solar power technology through quality control in large production series for solar fields. In: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. – DGS, PSE GmbH (Hrsg.): Proc. of the ISES – EuroSun Congress, 20.–23.06.2004 in Freiburg, Freiburg: PSE GmbH, 2004, S. 1-911–1-917
- [6] Lüpfer, E.; Geyer, M.; Schiel, W.; Esteban, A.; Osuna, R.; Zarza, E.; Nava, P.: Eurotrough Design Issues and Prototype Testing at PSA. In: Campbell-Howe, R. (Hrsg.): Proc. of the ASME Int. Solar Energy Conf. – Forum 2001, Solar Energy: The Power to Choose, 21.–25.04.2001 in Washington, DC (USA), 2001, 5 S.
- [7] Schiel, W.: Kollektorentwicklung für solare Parabolrinnenkraftwerke. Bautechnik 89 (2012) 3, S. 182–191
- [8] Riffelmann, K.-J.; Richert, T.; Nava, P.; Schweitzer, A.: Ultimate Trough – A significant step towards cost competitive CSP. Energy Procedia 49 (2014) – Proc. of the 19th SolarPACES Conf., 17.–20.09.2013 in Las Vegas (USA), 2013, S. 1831–1839
- [9] Marcotte, P.; Manning, K.: Development of an advanced large-aperture parabolic trough collector. Energy Procedia 49 (2014) – Proc. of the 19th SolarPACES Conf., 17.–20.09.2013 in Las Vegas (USA), 2013, S. 145–154
- [10] Pedretti, A.: A 3 MW thermal concentrated solar power pilot plant in Morocco with the Airlight Energy Technology. In: Proc. of 18th SolarPACES Conf., 11.–14.09.2012 in Marrakesh (Marokko), 2012
- [11] Bendt, P.; Rabl, A.; Gaul, H. W.; Reed, K. A.: Optical Analysis and Optimization of Line Focus Solar Collectors. SERI/TR-34-092, Solar Energy Research Institute, Golden (Colorado, USA), 1979
- [12] Forman, P.: Optimierungsstrategien für Parabolschalen zur Solarstrahlenkonzentration aus Hochleistungs-beton. Diss., Ruhr-Universität Bochum, 2016
- [13] Weissbach, R.: Die abrollende Parabolspiegelrinne. Schutzrecht DE102011011805 A1. Industrial property right (23.08.2012)
- [14] Hennicke, J.; Matsushita, K.; Otto, F.; Sataka, K.; Schaur, E.; Shirayanagi, T.; Gröbner, G.: Gitterschalen | Grid Shells. Mitteilungen des Instituts für leichte Flächentragwerke (IL), IL 10, Universität Stuttgart, 1974
- [15] Isler, H.: Typologie und Technik moderner Schalen. Werk, Bauen + Wohnen 38 (1983) 12, S. 34–41
- [16] Schnellenbach-Held, M.; Pfeffer, K.: Tragverhalten zweiachsiger Hohlkörperdecken. Beton- und Stahlbetonbau 96 (2001) 9, S. 573–578
- [17] Abramski, M.; Albert, A.; Pfeffer, K.; Schnell, J.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Stahlbetondecken mit kugelförmigen Hohlkörpern. Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010) 6, S. 349–361
- [18] Albrecht, C.; Albert, A.; Pfeffer, K.; Schnell, J.: Bemessung und Konstruktion von zweiachsig gespannten Stahlbetondecken mit abgeflachten rotationssymmetrischen Hohlkörpern. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012) 9, S. 590–600
- [19] Kämper, C.; Forman, P.; Stallmann, T.; Ahrens, M. A.; Mark, P.; Schnell, J.: Optimised High-Performance Concrete Shells for Parabolic Trough Collectors. J. IASS 58 (2017) 1/191, S. 105–119
- [20] Forman, P.; Kämper, C.; Stallmann, T.; Schnell, J.; Mark, P.: Parabolschalen aus Hochleistungs-beton als Solarkollektoren. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 851–861
- [21] Chopradub, A.: Zur Tragfähigkeit von punktförmig gestützten filigranen Fassadenplatten aus faserverstärktem Feinkornbeton. Diss., TU Kaiserslautern, 2010
- [22] Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Leichte Schalen aus hochfestem Beton als Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 752–762
- [23] Forman, P.; Kämper, C.; Mark, P.; Schnell, J.: Parabolschalen als Unterkonstruktionen für Solarkollektoren. In: Ing. Ges. Niemann & Partner GbR (Hrsg.): Einwirkungen auf Ingenieurtragwerke und Sicherheitskonzepte – Festschrift Prof. Niemann, Bochum, 2015, S. 77–92
- [24] Forman, P.; Müller, S.; Ahrens, M. A.; Schnell, J.; Mark, P.; Höffer, R.; Hennecke, K.; Krüger, J.: Light concrete shells for parabolic trough collectors – Conceptual design, prototype and proof of accuracy. Solar Energy 111 (2015), S. 364–377
- [25] Forman, P.; Müller S.: Verformungsoptimierte Parabolrinnenkollektorschalen aus hochfestem Beton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Tagungsband des 54. Forschungskolloquiums des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), 07./08.11.2013 in Bochum, 2013, S. 15–22
- [26] Oya, J.; Kalender-Wevers, C.; Winkelmann, U.; Höffer, R.: Experimental and numerical investigation of the dust transport on the reflector panels of a parabolic trough power plant. In: Proc. of the European-African Conf. on Wind Engineering EACWE 2013, 07.–11.07.2013 in Cambridge (Großbritannien), 2013

- [27] Winkelmann, U.; Kämper, C.; Höffer, R.; Mark, P.: Wind tunnel experiments and numerical analysis on large-scale parabolic shells for solar trough collector modules. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 146 (2020), S. 2390–2407 – <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.057>
- [28] Cook, N. J.: *The designers guide to wind loading of building structures – part 2: Static structures*. London, Oxford: Butterworths, 1990
- [29] Taylor, G. I.: *The spectrum of turbulence*. Proc. of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 164 (1938) 919, S. 476–490
- [30] Hosoya, N.; Peterka, J. A.; Gee, R. C.; Kearney, D.: *Wind tunnel tests of parabolic trough solar collectors*. Subcontract Report NREL/SR-550-32282, National Renewable Energy Laboratory, 2008
- [31] Mangerig, I.: *Klimatische Temperaturbeanspruchung von Stahl- und Stahlverbundbrücken*. Diss., Ruhr-Universität Bochum, 1986 – erschienen in: *Technisch-wissenschaftliche Mitteilung Nr. 86-4*
- [32] Sanio, D.; Mark, P.; Ahrens, M. A.: *Temperaturfeldberechnung für Brücken: Umsetzung mit Tabellenkalkulationen*. *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017) 2, S. 85–95 – DOI: 10.1002/best.201600068
- [33] DIN EN 1991-1-5:2010-12: Eurocode 1: *Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen*; Deutsche Fassung EN 1991-1-5:2003 + AC:2009.
- [34] Yamazaki, F.; Shinozuka, M.; Dasgupta, G.: *Neumann Expansion for Stochastic Finite Element Analysis*. *Journal of Engineering Mechanics* 114 (1998) 8, S. 1335–1354
- [35] Arbeitskreis „Tübbingdesign“ des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB): *Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen – Maschinellem Tunnelbau*. In: *Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.): Tunnelbautaschenbuch*, Berlin: Ernst und Sohn, 2014, S. 17–121
- [36] Sagmeister, B.: *Maschinenteile aus zementgebundenem Beton*. Berlin: Beuth, 2017
- [37] Bažant, Z. (Hrsg.): *Mathematical modeling of creep and shrinkage of concrete*. John Wiley and Sons Ltd., 1988
- [38] Most, T.; Will, J.: *Metamodel of Optimal Prognosis – An automatic approach for variable reduction and optimal meta-model selection*. In: *Proc. of the Weimar Optimization and Stochastic Days 5.0, 20./21.11.2008 in Weimar*, 2008, 21 S. – DOI: 10.13140/2.1.2194.4007
- [39] Kämper, C.; Stallmann, T.; Mark, P.; Schnell, J.: *Hollow Core Concrete Shells for Large Aperture Parabolic Troughs*. In: *Hordijk, D. A.; Lukovic, M. (Hrsg.): High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet – Proc. of the 2017 fib Symp., 12.–14.06.2017 in Maastricht (Niederlande)*, 2017, S. 1119–1127
- [40] Hartung, D.; Sickinger, C.; Herbeck, L.; Kueppers, P.: *Homogenisierung einer Hohlkörperflächenstruktur*. In: *DGLR (Hrsg.): Proc. zum Deutschen Luft- und Raumfahrtkongress 2002, 24.09.2002 in Stuttgart*, 2002, 10 S.
- [41] Wiedemann, J.: *Leichtbau – Elemente und Konstruktion*. 3. Aufl., Springer, 2007
- [42] Bendsoe, M. P.; Sigmund, O.: *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*. 2. Aufl., Berlin: Springer, 2004
- [43] Andreassen, E.; Clausen, A.; Schevenels, M.; Lazarov, B.; Sigmund, O.: *Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code*. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 43 (2011), S. 1–16
- [44] Mindlin, R. D.: *Influence of rotary inertia and shear of flexural motion of isotropic elastic plates*, *J. Appl. Mech.* 18 (1951), S. 31–38
- [45] Kämper, C.; Forman, P.; Mark, P.: *Entwurf topologisch optimierter Schalentragwerke*. In: *Pahn, M.; Thiele, C.; Glock, C. (Hrsg.): Vielfalt im Massivbau – Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell*, Kaiserslautern, 2018, S. 675–692
- [46] Dyckerhoff AG: *Dyckerhoff NANODUR Compound 5941*. Product data sheet, 2016
- [47] Albrecht, C.: *Bemessung von Stahlbetondecken mit abgeflachten rotationssymmetrischen Hohlkörpern und ein Beitrag zum besseren Verständnis der Querkrafttragfähigkeit*. Diss., TU Kaiserslautern, 2014
- [48] Pfeffer, K.: *Untersuchungen zum Biege- und Durchstanzenverhalten von zweiachsigen Hohlkörperdecken*. In: *Fortschritt-Berichte, VDI-Reihe 4, Nr. 178*, Düsseldorf: VDI Verlag, 2002
- [49] Aldejohann, M.: *Zum Querkrafttragverhalten von Hohlkörperdecken mit zweiachsiger Lastabtragung*. Diss., Universität Duisburg-Essen, 2008
- [50] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [51] Müller, S.: *Zur Auslegung von innovativen Betonkollektorelementen für solarthermische Parabolrinnenkraftwerke*. Diss., TU Kaiserslautern, 2016
- [52] DIN EN 12390-3:2009-07: *Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*; Dt. Fassung EN 12390-3:2009.
- [53] DIN EN 196-1:2016-11: *Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*; Deutsche Fassung EN 196-1:2016.
- [54] *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb, Hrsg.): Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2)*. Erschienen in: *Schriftenreihe des DAfStb, Heft 600*, Berlin Wien Zürich: Beuth, 2012
- [55] *Zulassung Z-15.1-307: Hohlkörperperdecke System "COBIAX SLIM-LINE"*. DIBt, Berlin, 27.02.2013
- [56] *Zulassung Z-15.1-282: Hohlkörperperdecke System "COBIAX"*. DIBt, Berlin, 01.03.2015
- [57] Görtz, S.: *Zum Schubrissverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken aus Normal- und Hochleistungsbeton*. Diss., RWTH Aachen, 2004

[58] Hennecke, K.; Krüger, D.; Dokupil, M.: Test of a Parabolic Trough System for Process Heat in a Climate with Low Direct Radiation. In: Sayigh, A. A. M. (Hrsg.): Proc. of the World Renewable Energy Congress VI – Renewables: The Energy for the 21st Century, 01.–07.07.2000 in Brighton (UK), 2000, S. 994–997 – <https://doi.org/10.1016/B978-008043865-8/50200-2>

[59] Pottler, K.; Lüpfer, E.; Johnston, G. H. G.; Shortis, M. R.: Photogrammetry: A Powerful Tool for Geometric Analysis of Solar Concentrators and Their Components, Journal of Solar Energy Engineering 127 (2005) 1, S. 94–101

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Fig. 1, 6, 7, 8+9 (rechts | right), 10, 13–19: Christoph Kämper
- Bilder | Fig. 2–4, 8+9 (links | left), 11, 12, 27, 29: Patrick Forman
- Bilder | Fig. 5, 21, 22 (Foto | photo), 23–26, 30, 31: Tobias Stallmann
- Bild | Fig. 20: Christian Albrecht [18], mod.
- Bild | Fig. 22 (Grafik | graphic): Heinze Cobiach Deutschland GmbH
- Bild | Fig. 28: Thomas Brenner

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Leichte verformungsoptimierte Schalenträgerwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke | Light, microreinforced UHPC shell structures optimised to deformations using the example of parabolic trough collectors in concentrating solar power plants

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark Lehrstuhlinhaber Chair holder
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	MA 2074/5-1/2 (Projektnummer Project number: 198176582)
Adresse Address:	Ruhr-Universität Bochum (RUB), Lehrstuhl für Massivbau, Universitätsstraße 150, Gebäude IC 5 – 179, 44780 Bochum
Kontakt Contact:	+49 234 32 25980 massivbau@rub.de www.kib1.ruhr-uni-bochum.de
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell Leiter Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion Head of Department Concrete Structures and Structural Design
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	SCHN 771/7-1/2 (Projektnummer Project number: 198176582)
Adresse Address:	Technische Universität Kaiserslautern (TU KL), Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion, Paul-Ehrlich-Straße, Gebäude 14, 67663 Kaiserslautern
Kontakt Contact:	+49 631 205-2157 juergen.schnell@bauing.uni-kl.de www.massivbau-kl.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Förderphase I Funding period I: 07/2011–06/2014 Förderphase II Funding period II: 10/2014–09/2017 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 30.06.2018
Team Team:	Patrick Forman (RUB, 07/2011–10/2014) Christoph Kämper (RUB, ab since 10/2014) Sören Müller (TU KL, 07/2011–10/2014) Tobias Stallmann (TU KL, ab since 08/2015) Janna Krumpfenacker (TU KL, 10/2014–08/2015)
Partner Partners:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Solarforschung, Linienfokussierende Systeme, Köln Solarlite CSP Technology GmbH, Duckwitz Heinze Cobiach Deutschland GmbH, Wiesbaden Dyckerhoff GmbH, Wiesbaden durcrete GmbH, Limburg an der Lahn

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Forman, P.; Müller, S.: Shape-optimised Parabolic Trough Collectors made of micro reinforced Ultra High Performance Concrete. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.) Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.-25.07.2012 in Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012, S. 297–302
- Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Collectors for solar parabolic trough power plants made of micro reinforced Ultra High Performance Concrete. In: Uzoegbo, H. C.; Schmidt, W. (Hrsg.): Proc. of the Int. Conf. on Advances in Cement and Concrete Technology in Africa (ACCTA 2013), 28.-30.01.2013 in Johannesburg (Südafrika), 2013, S. 491–498, publ. on CD-ROM
- Forman, P.; Müller S.: Verformungsoptimierte Parabolrinnenkollektorschalen aus hochfestem Beton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Tagungsband des 54. Forschungskolloquiums des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), 07./08.11.2013 in Bochum, 2013, S. 15–22
- Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Leichte Schalen aus hochfestem Beton als Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 752–762
- Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Innovative concrete parabolic trough collectors for solar power plants as an example for concrete in mechanical engineering. In: Proc. of the 1st Concrete Innovation Conf. (CIC), 11.-13.06.2014 in Oslo (Norwegen), 2014, 8 S. (flash drive)
- Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Concrete collectors for parabolic trough solar power plants. In: Bastien, J.; Rouleau, N.; Fiset, M.; Thomassin, M. (Hrsg.): Proc. of the 10th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.07.2014 in Quebec City (Kanada), Québec: Research Centre on Concrete Infrastructure (CRIB), Université Laval, 2014, S. 309–314
- Müller, S.; Schnell, J.: Parabolrinnen für solarthermische Kraftwerke. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 94–101 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171407>
- Forman, P.; Mark, P.: Numerische Simulation und Optimierungsstrategien für Betonschalen von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 242–253 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171546>
- Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Kollektorelemente solarthermischer Kraftwerke aus innovativen hochfesten Betonfertigteilen. BetonWerk International (2014) 5, S. 182–188 – <http://www.cpi-worldwide.com/de/journals/artikel/36767>
- Forman, P.; Müller, S.; Mark, P.; Schnell, J.: Design, detailing and future potential of high-strength concrete collector modules for parabolic troughs. ALITinform International Analytical Review 36 (2014) 4–5, S. 48–58
- Schnell, J.; Kämper, C.; Krummenacker, J.; Mark, P.: Design of light-weight, large-scale Parabolic Troughs made of high-strength Concrete. In: Proc. of the 11th Central European Congress on Concrete Engineering, 01.10.2015 in Hainburg (Österreich), 2015, S. 18–21
- Forman, P.; Müller, S.; Ahrens, M. A.; Schnell, J.; Mark, P.; Höffer, R.; Hennecke, K.; Krüger, J.: Light concrete shells for parabolic trough collectors – Conceptual design, prototype and proof of accuracy. Solar Energy 111 (2015), S. 364–377 – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14005349>
- Kämper, C.; Krummenacker, J.; Forman, P.; Mark, P.; Schnell, J.: Slender large-scale parabolic troughs using shape-optimized hollow structures made of high-strength concrete. In: Papadrakakis, M.; Papadopoulos, V.; Plevris, V. (Hrsg.): Proc. of the 5th Int. Conf. on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPdyn 2015), ECCOMAS Thematic Conf., 25.–27.05.2015 in Kreta (Griechenland), 2015, 8 S.
- Kämper, C.; Krummenacker, J.; Forman, P.; Mark, P.; Schnell, J.: Lightweight thin-walled shell structures made of high-strength concrete for parabolic trough collectors. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), paper No. IASS2015-504012, 10 S. (flash drive)
- Forman, P.; Kämper, C.; Mark, P.; Schnell, J.: Parabolrinnen als Unterkonstruktionen für Solarkollektoren. In: Ing. Ges. Niemann & Partner GbR (Hrsg.): Einwirkungen auf Ingenieurtragwerke und Sicherheitskonzepte – Festschrift Prof. Niemann, Bochum, 2015, S. 77–92
- Smarslik, M.; Kämper, C.; Forman, P.; Stallmann, T.; Mark, P.; Schnell, J.: Topologische Optimierung von Betonstrukturen. In: Scheerer, S.; van Stipriaan, U. (Hrsg.): Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach. Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2016, S. 234–255

- Forman, P.; Kämper, C.; Stallmann, T.; Schnell, J.; Mark, P.: Parabolshalen aus Hochleistungsbeton als Solar-kollektoren. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 12, S. 851–861 – DOI: 10.1002/best.201600051
- Stallmann, T.; Kämper, C.; Schnell, J.; Mark, P.: Design of light-weight, slender parabolic troughs made of high-strength concrete. In: Middendorf, B.; Fehling, E. (Hrsg.): *Proc. 4th Int. Symp. on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials – HiPerMat 2016*, 11.03.2016 in Kassel, 2016, 9 S. (flash drive)
- Kämper, C.; Stallmann, T.; Mark, P.; Schnell, J.: Hollow Core Concrete Shells for Large Aperture Parabolic Troughs. In: Hordijk, D. A.; Lukovic, M. (Hrsg.): *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet – Proc. of the 2017 fib Symp.*, 12.–14.06.2017 in Maastricht (Niederlande), 2017, S. 1119–1127 – DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2_130
- Stallmann, T.; Forman, P.; Kämper, C.; Schnell, J.; Mark, P.: Development and Construction of Light-Weight Parabolic Troughs made of High-Performance-Concrete. In: Abramski, M.; Korzeniowski, P. (Hrsg.): *Current Scientific Challenges in Concrete and Steel Structures*, 19.06.2017 in Gdansk (Polen), 2017, S. 123–133
- Kämper, C.; Forman, P.; Stallmann, T.; Ahrens, M. A.; Mark, P.; Schnell, J.: Optimised High-Performance Concrete Shells for Parabolic Trough Collectors. *J. IASS* 58 (2017) 1/191, S. 105–119 – <https://doi.org/10.20898/j.iass.2017.191.843>
- Kämper, C.; Forman, P.; Mark, P.: Entwurf topologisch optimierter Schalentragerwerke. In: Pahn, M.; Thiele, C.; Glock, C. (Hrsg.): *Vielfalt im Massivbau – Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell*, Kaiserslautern, 2018, S. 675–692
- Winkelmann, U.; Kämper, C.; Höffer, R.; Mark, P.: Wind tunnel experiments and numerical analysis on large-scale parabolic shells for solar trough collector modules. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 146 (2020), S. 2390–2407 – <https://doi.org/10.1016/j.jrenene.2019.08.057>

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertationen | Dissertations

- Müller, S.: Zur Auslegung von innovativen Betonkollektorelementen für solarthermische Parabolrinnenkraftwerke. TU KL, 2016 – <https://kluedo.ub.uni-kl.de/frontdoor/index/index/docId/4362>
- Forman, P.: Optimierungsstrategien für Parabolshalen zur Solarstrahlenkonzentration aus Hochleistungsbeton. RUB, 2016 – <http://hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/5132>
- Stallmann, T.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Hohlkörperdecken aus Hochleistungs-Feinkornbeton. TU KL, 2020 – urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-60767
- Kämper, C.: Entwurf gewichtsminimierter Flächentragerwerke aus Hochleistungsbeton. RUB, 2022

Studienarbeiten | Student's research projects (alle | all RUB)

- Kremer, K.: Optimierungsstrategien für Strukturen aus dem Bereich der erneuerbaren Energien am Beispiel einfacher Tragwerke. Bachelorarbeit, 2012
- Vasilev, G.: Strukturoptimierung einer Parabolrinnenschale aus UHPC auf Querschnittsebene. Bachelorarbeit, 2013
- Tscheplanski, K.: Versuchsbiertierte Ermittlung von Druckbeiwerten für die statische Bemessung von Parabolrinnen. Masterarbeit, 2014
- Pouyafar, T.: Experimentelle Ermittlung von windinduzierten Oberflächendrücken zur statischen und dynamischen Analyse von großformatigen Parabolrinnenmodulen. Masterarbeit, 2016.
- Reimann, P.: Entwicklung parametrisierter Simulationsmodelle zur numerischen Analyse gekrümmter Tragstrukturen aus Hochleistungsbeton für Kollektormodule von Parabolrinnen großer Aperturweiten. Masterarbeit, 2016
- Uszball, S.: Topologische Optimierung von Endschotten zur Lagerung von Kollektormodulen aus Hochleistungsbeton für Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. Bachelorarbeit, 2016
- Grünig, F.: Entwicklung eines Software-Interfaces zur Kopplung der kommerziellen Programme Matlab und Ansys für die topologische Optimierung geometrisch beliebiger Strukturelemente. Masterarbeit, 2017

Patent | Patent

- Weissbach, R.: Die abrollende Parabolspiegelrinne. Schutzrecht DE102011011805 A1, Industrial property right (23.08.2012)

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Auslegung von Parabolrinnen Typ EuroTrough für Solarkraftwerke im Originalmaßstab | Designing of parabolic troughs type EuroTrough in full-scale as a concrete construction for solar power plants

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project
Laufzeit Period:	03/2015–06/2018

- Adaptive Präzisionsstrukturen von Heliostaten aus Hochleistungsbeton für punktfokussierende Solarkraftwerke | Pinpoint accurate adaptive structures for heliostats made from high performance concrete for central tower power plants

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project
Laufzeit Period:	01/2018–06/2020

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation des 1. Arbeitstreffens des SPP 1542, Kurhaus Trifels, Anweiler-Bindersbach, 14./15.11.2011 | Organization of the 1st Annual Meeting of SPP 1542, Kurhaus Trifels, Anweiler-Bindersbach, 14./15.11.2011
- Organisation des 5. Arbeitstreffens des SPP 1542, Ruhr-Universität Bochum, 07.–09.10.2015 | Organization of the 5th Annual Meeting of SPP 1542, Ruhr University Bochum, 07.–09.10.2015
- Workshop „Praktische Formfindung“ mit Prof. Adriaenssens, 08.10.2015 an der Ruhr-Universität Bochum | Workshop “Practical Form Finding Techniques” with Prof. Adriaenssens, 08.10.2015 at Ruhr University Bochum
- Workshop „(Struktur-)Optimierung“ mit Prof. Hartmann, Prof. Bletzinger und Prof. Bucher, 06.09.2013 an der Ruhr-Universität Bochum | Workshop “Structural Optimization” with Prof. Hartmann, Prof. Bletzinger and Prof. Bucher, 06.09.2013 at Ruhr University Bochum
- Workshop „Windlasten auf Parabolrinnen“ mit Prof. Höffer, 17.11.2017 an der Ruhr-Universität Bochum | Workshop “Wind Loads on Parabolic Troughs” with Prof. Höffer, 17.11.2017 at Ruhr University Bochum

Modellreduktion und Substrukturtechnik am Beispiel von modularen Schalentragerwerken aus ultrahochfestem Beton | Model order reduction and substructures – application to modular shell structures made of ultra-high performance concrete

- ▶ Lei Zhou, Jaan Simon, Stefanie Reese
- ▶ Institut für Angewandte Mechanik, RWTH Aachen University

1 Einleitung

Schalentragerwerke sind aufgrund ihres vorteilhaften Lastabtragverhaltens im Membranzustand sehr geeignet für die Herstellung leichter Tragwerke. Der Schwerpunkt dieses Projekts liegt auf der Entwicklung einer geeigneten numerischen Methode, um möglichst effizient statische und dynamische Berechnungen durchzuführen und damit den Entwurf zu erleichtern. Für Entwurf und Analyse wird eine neuartige Kombination von Substrukturtechnik und Modellreduktion eingesetzt, um den notwendigen Rechenaufwand zu minimieren.

Die Finite-Elemente-Analyse komplexer Strukturen erfordert eine hohe Rechenintensität, da Gleichungssysteme mit einer großen Anzahl von Freiheitsgraden gelöst werden müssen. Das ist besonders bei der nichtlinearen Finite-Elemente-Analyse der Fall. Um den numerischen Aufwand zu reduzieren, wird das globale System in viele Substrukturen unterteilt, die unabhängig voneinander untersucht werden. Die Rechenzeit lässt sich weiter reduzieren, wenn die Anzahl der Freiheitsgrade einzelner Substrukturen verkleinert wird, so dass die Dimension des globalen Gleichungssystems ebenfalls deutlich kleiner wird. Dieses Ziel kann mit projektionsbasierter Modellreduktion erreicht werden, die auf der Substruktur-Ebene angewandt wird. Durch die Kombination von Modellreduktion und Substrukturtech-

1 Introduction

Shell structures are very suitable for the construction of lightweight structures, especially because of the load bearing behaviour in the membrane state. Based on this concept, the main focus of this project is to develop suitable numerical methods to carry out the static and dynamic analysis efficiently, with the target of simplifying the design. For the design and analysis, a new methodology has been developed which couples substructuring and model order reduction. This allows to reduce the degrees of freedom of the system as well as the computational effort significantly.

The finite element analysis of complex structures involves a high computational effort, since the equation system to be solved includes a large number of degrees of freedom. This holds particularly in non-linear finite element analysis. In order to reduce the numerical effort, the total system is subdivided into substructures which are analyzed separately from each other. The computing time can be further reduced, if the number of degrees of freedom of the substructure and thereby the dimension of the global equation system is decreased. This can be achieved by projection-based model order reduction applied at the level of the substructures. Through combination of the model order reduction and substructure techniques, a

nik wird eine recheneffiziente neue numerische Methode für die Strukturanalyse entwickelt.

computationally efficient numerical method is achieved.

2 Motivation

Häufig bestehen die betrachteten komplexen Strukturen aus vielen Teilen, die als Substrukturen bezeichnet werden, welche separat analysiert werden können (Bild 1). Für die Analyse der kompletten Struktur ist dann eine Kopplungsmethode erforderlich, um die Interaktion zwischen den Substrukturen zu betrachten.

2 Motivation

Frequently, complex structural systems consist of several parts, often called substructures, which can be analyzed separately, see Fig. 1. For the analysis of the complete structure, coupling methods are needed to consider the interaction between the substructures.

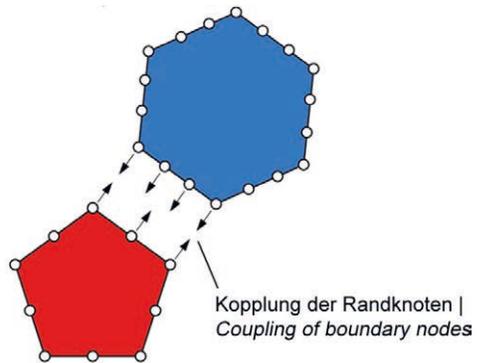
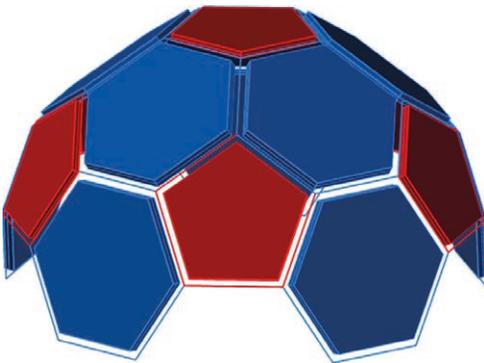


Bild 1: Typische modulare Struktur; links: geodätische Kuppel, rechts: Kopplung der Substrukturen | **Fig. 1:** Typical modular structure; left: geodesic dome, right: coupling of substructures

Die Modellreduktion (oder auch Modellordnungsreduktion, MOR), die auf das Gesamtsystem angewandt wird, kann die große Dimension des Gleichungssystems reduzieren. Eine weitere Herausforderung ist es, die MOR auf Substrukturen anzuwenden, um die Dimension einzelner Substrukturen zu reduzieren. Diese neue Methode wird als Modellreduktion von Substrukturen (MORS) bezeichnet.

Model order reduction (MOR) applied at the level of the complete structure can reduce the large dimension of the global equation system. Another challenging task is to apply model order reduction at the substructure level in order to reduce the dimension of the substructure individually. This method is denoted as model order reduction on substructures (MORS).

3 Konzept

Die Idee der MORS ist in Bild 2 schematisch dargestellt. Sie besteht aus drei wesentlichen Schritten: Dekomposition, Reduktion und Assemblierung. Zuerst wird das Gesamtsystem in eine Reihe von Substrukturen unterteilt. Danach werden diese Substrukturen auf eine jeweils kleinere Dimension reduziert. Diese

3 Concept

The concept of MORS is presented in Fig. 2. It consists of three steps: decomposition, reduction, and reassembly. First of all, a global structural system is decomposed into a number of substructures. Secondly, the substructures are reduced to smaller dimension. This can be carried out either individually for each substructure

Reduktion im zweiten Schritt kann entweder individuell für jede einzelne Substruktur (Strategie A) oder repräsentativ für eine Substruktur (Strategie B) durchgeführt werden. Abschließend werden die reduzierten Substrukturen zu einem reduzierten Gesamtmodell assembliert, um das originale Modell gut zu approximieren. Dabei ist Strategie B grundsätzlich zu bevorzugen, falls sie zu einem reduzierten Modell führt, welches das ursprüngliche Modell mit genügender Genauigkeit approximiert.

Die Kopplung zwischen Substrukturen kann als eine zusätzliche Bedingung auf den Rändern betrachtet werden. Die wesentliche Schwierigkeit besteht darin, eine geeignete Kopplungsmethode zu finden, um die Substrukturen mit nicht zusammenpassender Vernetzung zu koppeln. Darüber hinaus soll die Methode in der Lage sein, unterschiedlich reduzierte Substrukturen miteinander zu koppeln. Deshalb sollen drei Kopplungsfälle in der neuen Methode berücksichtigt werden: die Kopplung von (1) zwei reduzierten, (2) zwei nicht reduzierten oder (3) zwischen reduzierten und nicht reduzierten Substrukturen.

ture (strategy A) or only for one representative substructure (strategy B). The idea of strategy B is to build up a 'catalogue' of modules which can be put together in various ways to obtain different global systems. At last, the reduced substructures are reassembled to form a reduced order model which represents the original full order model in the best possible way. In fact, strategy B would be preferred, if it resulted into a reduced order model which approximates the original system with sufficient accuracy.

The coupling of the substructures is considered as additional condition on the boundaries and is thus independent of the reduction process. The main difficulty is to find a suitable coupling method to couple the reduced order substructures which might be discretized by non-matching meshes. Additionally, the method must be also capable of dealing with unreduced substructures. Therefore, all three coupling situations should be embedded into the new method: (1) the coupling of two reduced, (2) two unreduced, or (3) between reduced and unreduced substructures.

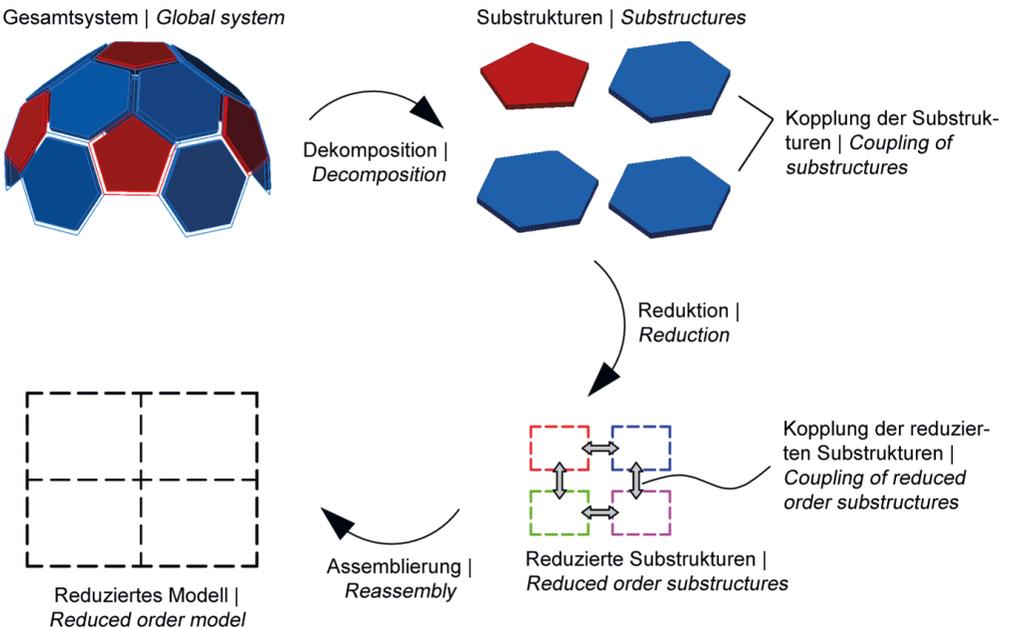


Bild 2: Konzept der Modellreduktion von Substrukturen (MORS) | **Fig. 2:** Concept of model order reduction on substructures (MORS)

In der Literatur werden unterschiedliche Kopplungsmethoden diskutiert, z. B. in der Standardliteratur [1] und [2] oder in [3]. Die sogenannte Standardkopplung koppelt die Randknoten der Substrukturen direkt. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, die Ränder mit Hilfe Lagrange'scher Multiplikatoren streng zu koppeln. Die dritte Möglichkeit ist, mittels Kontaktalgorithmen, z. B. der sogenannten *Bonded Contact Method*, siehe bspw. [4]–[6], eine schwache Kopplung zu erreichen. Diese dritte Methode wird im vorliegenden Projekt angewendet.

In the literature, various types of coupling are discussed, e.g. in standard literature [1] and [2] or in [3]. The so-called standard coupling simply uses the boundary nodes of the substructures for the assembly of the equation system. It is also possible to couple the non-matching boundary nodes of two opposite surfaces by means of additional constraint equations, e.g. the multi-points constraint. The third possibility, which is applied in this project, is to use contact algorithms to hold the boundary nodes together, e.g. [4]–[6]. The proposed numerical method combines the model order reduction and substructure techniques by means of a contact method.

4 Numerische Formulierung

4 Numerical formulation

4.1 Nichtlineare Analyse mit gekoppelten Substrukturen

4.1 Nonlinear analysis with coupled substructures

Für nichtlineare quasi-statische Probleme lautet die maßgebende zu lösende Gleichung:

For nonlinear quasi-static problems, the equation to be solved reads:

$$\mathbf{G} := \mathbf{R}(\mathbf{u}) + \mathbf{R}_c(\mathbf{u}) - \mathbf{P} = 0 \tag{1}$$

Mit:

With:

- G** unausgeglichene Kraft
- u** unbekannter globaler Verschiebungsvektor
- R** innerer Kraftvektor ohne Kopplungsanteil
- P** äußerer Kraftvektor
- R_c** Kontaktkraft infolge der Kopplung der Substrukturen

- G** unbalanced force
- u** unknown global displacement vector
- R** internal force vector without the coupling contribution
- P** external force vector
- R_c** contact force due to the coupling of the substructures

Die Verwendung des Newton-Raphson-Algorithmus führt dann zum Gleichungssystem (2), das in jeder Iteration eines Lastinkrements zu lösen ist. Um die Gleichung zu vereinfachen, wurde auf die Angabe von Indizes verzichtet.

Applying the Newton-Raphson algorithm to solve the equation, one arrives at the equation system (2) which has to be solved in each iteration of one load step. It should be mentioned that the iteration index has been omitted for simplicity.

$$(\mathbf{K} + \mathbf{K}_c) \Delta \mathbf{u} = -\mathbf{G} \tag{2}$$

Mit:

With:

- K** Standard-Tangentensteifigkeitsmatrix
- K_c** Kontaktsteifigkeitsmatrix, sie beinhaltet den Kopplungsanteil.

- K** standard tangential stiffness matrix
- K_c** contact stiffness matrix with coupling contribution

Die Formulierung der vorgeschlagenen Kontaktmethode wird hier nicht detailliert präsentiert. Grundsätzlich basiert der Kontaktalgorithmus auf der Penaltymethode [1], d. h. die Ränder werden schwach miteinander gekoppelt. Zusätzlich wird während der Diskretisierung die nicht zusammenpassende Vernetzung berücksichtigt, damit zwei Substrukturen beliebig zugeordnet werden können. Ansonsten ist die Kopplungsmethode unabhängig von der Modellreduktionsprozedur. Mehr Details zur Formulierung finden sich in [7].

Wegen der Dekomposition der Substrukturen können die Tangentensteifigkeitsmatrizen in Block-diagonaler Form dargestellt werden; die Indizes s und t beziehen sich auf zwei beliebige Substrukturen, die miteinander verbunden sind:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \ddots & & & & & \\ & \mathbf{K}^{(s)} & & & & \\ & & \mathbf{K}^{(t)} & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \ddots \end{bmatrix}$$

The formulation of the proposed contact method is not presented here in detail. In principle, the contact algorithm is based on the penalty method [1], which means that the interfaces are weakly coupled to each other. In addition, for the discretization non-matching meshes are taken into consideration, so that two substructures can be arranged arbitrarily. The handling of the coupling method is independent of the model order reduction procedure. More details of the formulation can be found in [7].

Due to the decomposition into substructures, the tangential stiffness matrix can be expressed in block-diagonal form. This is shown in Eq. (3), where the indices s and t refer to two arbitrary substructures that are interconnected:

$$\mathbf{K}_c = \begin{bmatrix} \ddots & & & & & \\ & \mathbf{K}_c^{(s,s)} & \mathbf{K}_c^{(s,t)} & & & \\ & \mathbf{K}_c^{(t,s)} & \mathbf{K}_c^{(t,t)} & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \ddots \end{bmatrix} \quad (3)$$

Die Zahl der Freiheitsgrade beider Substrukturen wird mit $n^{(s)}$ bzw. $n^{(t)}$ bezeichnet. Diese beiden Werte sind normalerweise unterschiedlich. Die Matrix $\mathbf{K}^{(s)}$ hat die Dimension $n^{(s)} \times n^{(s)}$, die Matrix $\mathbf{K}^{(t)}$ die Dimension $n^{(t)} \times n^{(t)}$. Die Struktur der Kontaktsteifigkeitsmatrix \mathbf{K}_c wird durch die Kopplung zweier Substrukturen bestimmt.

The degrees of freedom of both substructures are denoted as $n^{(s)}$ and $n^{(t)}$ which are different in general, so that the matrix $\mathbf{K}^{(s)}$ has a dimension of $n^{(s)} \times n^{(s)}$, and the matrix $\mathbf{K}^{(t)}$ of $n^{(t)} \times n^{(t)}$. The structure of the contact stiffness matrix \mathbf{K}_c is given by the coupling of each two neighbouring substructures.

Das nichtreduzierte Modell hat die Dimension $n = \sum n^{(s)}$, die normalerweise für komplexe Strukturen sehr groß ist. Wie bereits erwähnt, besteht die Idee der MORS darin, die Modellreduktion auf die Substrukturen anzuwenden, um die Freiheitsgrade jeder Substruktur $n^{(s)}$ auf eine kleinere Dimension $m^{(s)}$ (mit $m^{(s)} \ll n^{(s)}$) zu reduzieren. Dadurch wird das globale Gleichungssystem zu einer Größe von $m = \sum m^{(s)}$ reduziert, die viel kleiner als n ist (d. h. $m \ll n$).

The full order model has a dimension of $n = \sum n^{(s)}$ which is usually very large for complex structures. As mentioned before, the idea of the MORS method is to apply model order reduction at the level of the substructures to reduce the degrees of freedom of each substructure $n^{(s)}$ to a smaller dimension $m^{(s)}$ (with $m^{(s)} \ll n^{(s)}$). Hence the global equation system is reduced to a size of $m = \sum m^{(s)}$, which is much smaller than n ($m \ll n$).

4.2 Modellreduktion von Substrukturen (MORS)

Die Projektionsbasierte Modellreduktion von Substrukturen basiert auf der Approximation des unbekannt globalen Verschiebungsvektors \mathbf{u} durch

$$\mathbf{u} \approx \hat{\mathbf{u}} = \bigcup_{s=1}^{n_s} \hat{\mathbf{u}}^{(s)} = \bigcup_{s=1}^{n_s} \Psi^{(s)} \mathbf{p}^{(s)} = \Psi \mathbf{p} \quad (4)$$

wobei $\hat{\mathbf{u}}$ der approximierten globale Verschiebungsvektor ist, der aus den approximierten Verschiebungsvektoren $\hat{\mathbf{u}}^{(s)} = \Psi^{(s)} \mathbf{p}^{(s)}$ der Substrukturen zusammengesetzt ist. Der Vereinigungsoperator wird genutzt, um anzuzeigen, dass die approximierten Verschiebungsvektoren unabhängig voneinander sind. $\Psi^{(s)}$ ist die Projektionsmatrix mit der Dimension $n^{(s)} \times m^{(s)}$ und $\mathbf{p}^{(s)}$ ist der verallgemeinerte Koordinatenvektor mit Dimension $m^{(s)}$. Zum Schluss kann die Approximation einfach mit der globalen Projektionsmatrix Ψ und dem globalen verallgemeinerten Koordinatenvektor \mathbf{p} dargestellt werden.

Der inkrementelle globale Verschiebungsvektor kann entsprechend formuliert werden:

$$\Delta \mathbf{u} \approx \Delta \hat{\mathbf{u}} = \bigcup_{s=1}^{n_s} \Delta \hat{\mathbf{u}}^{(s)} = \bigcup_{s=1}^{n_s} \Psi^{(s)} \Delta \mathbf{p}^{(s)} = \Psi \Delta \mathbf{p} \quad (5)$$

Die Galerkin-Projektion wird auf das inkrementelle Gleichungssystem angewendet, dies führt zu

$$\Psi^T \{(\mathbf{K} + \mathbf{K}_c) \Psi \Delta \mathbf{p}\} = \Psi^T \{-\mathbf{G}\} \quad (6)$$

und schließlich zu dem reduzierten Gleichungssystem (7) mit dem inkrementellen verallgemeinerten Koordinatenvektor $\Delta \mathbf{p}$ als einziger Unbekannte.

$$(\hat{\mathbf{K}} + \hat{\mathbf{K}}_c) \Delta \mathbf{p} = -\hat{\mathbf{G}} \quad (7)$$

4.2 Model order reduction on substructures (MORS)

Projection-based model order reduction at the substructure level means to approximate the unknown global displacement vector \mathbf{u} by means of

where $\hat{\mathbf{u}}$ is the approximated global displacement vector which consists of the approximated displacement vectors $\hat{\mathbf{u}}^{(s)} = \Psi^{(s)} \mathbf{p}^{(s)}$ of the substructures. The union operator is used to show that the approximated substructure displacement vectors are independent of each other. $\Psi^{(s)}$ is the projection matrix with the dimension $n^{(s)} \times m^{(s)}$. $\mathbf{p}^{(s)}$ is the generalized coordinate vector with dimension $m^{(s)}$. At the end, the approximation can be simply expressed in terms of Ψ and \mathbf{p} , which are the global projection matrix and the global generalized coordinate vector, respectively.

The incremental global displacement vector is expressed accordingly:

The Galerkin projection is applied on the incremental equation system

which results into the reduced equation system (7) where the incremental generalized coordinate vector $\Delta \mathbf{p}$ is the only unknown.

Mit:

$\hat{\mathbf{G}} = \Psi^{(T)} \mathbf{G}$ reduzierter oder projizierter Restkraftvektor

$\hat{\mathbf{K}} = \Psi^{(T)} \mathbf{K} \Psi$ reduzierte Tangentensteifigkeitsmatrix

$\hat{\mathbf{K}}_c = \Psi^{(T)} \mathbf{K}_c \Psi$ reduzierte Kontaktsteifigkeitsmatrix

With:

$\hat{\mathbf{G}} = \Psi^{(T)} \mathbf{G}$ reduced or projected residual force vector

$\hat{\mathbf{K}} = \Psi^{(T)} \mathbf{K} \Psi$ reduced tangential stiffness matrix

$\hat{\mathbf{K}}_c = \Psi^{(T)} \mathbf{K}_c \Psi$ reduced contact stiffness matrix

Nach der Lösung des Gleichungssystems kann der inkrementelle globale Verschiebungsvektor mit folgender Gleichung bestimmt werden:

After the equation system has been solved, the incremental global displacement vector is determined by means of the relation:

$$\Delta \hat{\mathbf{u}} = \Psi \Delta \mathbf{p} \tag{8}$$

Anschließend werden der globale Verschiebungsvektor aktualisiert und der Restkraftvektor analog zur Standardprozedur in der Finite-Elemente-Methode erneut berechnet, um die Konvergenz zu überprüfen.

Then the global displacement vector is updated and the residual force vector is recomputed for the convergence check in the standard finite element approach.

Die Formulierung zeigt eindeutig, dass die Klassifizierung der Knoten in interne und Randknoten nicht mehr nötig ist. Jede Substruktur kann mit ihren kompletten Moden approximiert werden. Im folgenden Abschnitt wird die Berechnung der Projektionsmatrix auf der Substrukturebene präsentiert.

The formulation shows clearly that the separation of the nodes into internal and boundary ones is not needed here. Each substructure can be approximated with its complete modes. In the next section the computation of the projection matrix is presented at the substructure level.

4.3 Strategien A und B der MORS-Methode

4.3 Strategies A and B of the MORS method

Die Snapshot-POD-Methode (vgl. [8]) wird auf der Substrukturebene durchgeführt, d. h. in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird die Offline-Berechnung durchgeführt, wobei die charakteristischen Verschiebungszustände als Snapshots gewählt werden. Die Snapshots werden in einer Matrix gespeichert, was nach einigen Rechenschritten inklusive einer Singulärwertzerlegung zur globalen Projektionsmatrix führt:

The snapshot-POD method (see [8]) at the substructure level is carried out in the standard way, i.e. in two steps. In the first step, an offline computation is carried out, where characteristic displacement states are chosen as snapshots. The latter are stored into a matrix which leads after several calculation steps including singular value decomposition to the global projection matrix:

$$\Psi^{(s)} = [\Phi_1^{(s)}, \dots, \Phi_m^{(s)}] \tag{9}$$

Basierend auf dieser Snapshot-POD-Methode auf Substrukturebene können zwei Strategien

Based on this snapshot-POD method at the substructure level, two strategies A and B for the

alle Substrukturen zum gleichen Level reduziert, d. h. $m^{(s)} = m^{(t)} = m^{(1)}$, da die Anzahl der reduzierten Freiheitsgrade bereits in der Vorrechnung bestimmt werden muss.

Zusammenfassend gilt, dass die Vorrechnung der Strategie A rechenintensiver ist, aber dafür die Substrukturen mit unterschiedlicher Anzahl reduziert werden können ($m^{(s)} \neq m^{(t)}$). Deshalb wird Strategie A für Strukturen mit starken lokal auftretenden Nichtlinearitäten bevorzugt. Darüber hinaus ist für Strategie A eine größere Genauigkeit zu erwarten, da die Generierung der Snapshots auf dem Gesamtsystem basiert. Im Gegensatz dazu ist die Vorrechnung der Strategie B weniger rechenintensiv, aber dafür können alle Substrukturen nur mit einer einzigen Projektionsmatrix basierend auf den gleichen Freiheitsgraden reduziert werden. Solange die Strategie B nicht auf ein spezifisches globales System beschränkt ist, können die Substrukturen beliebig kombiniert werden. Diese Betrachtung macht Strategie B speziell attraktiv für Entwürfe, wenn die Genauigkeit einer Rechnung noch nicht die entscheidende Rolle spielt.

In folgendem Abschnitt wird die MORS mit beiden Strategien A und B anhand von zwei Beispielen präsentiert.

4.4 Numerische Beispiele

4.4.1 Anwendung der MORS auf einen Kragarm mit elasto-plastischer Verformung (Strategie A)

In diesem Beispiel wird die vorgestellte MORS-Methode in Strategie A auf einen Kragarm mit elasto-plastischem Verhalten angewendet. Die materiellen und geometrischen Nichtlinearitäten werden gleichzeitig berücksichtigt. Der Kragarm mit der Geometrie $L \times H \times T = 160 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ wird in vier Substrukturen unterteilt (Bild 3). Das Material ist elasto-plastisch unter Berücksichtigung des Von-Mises-Fließkriteriums ohne Verfestigung. Hyperelastizität wird durch Verwendung logarithmischer Dehnung nach Hencky [9] erfasst. Die Materialparameter können Tabelle 1 entnommen werden.

all substructures are reduced to the same level, which means $m^{(s)} = m^{(t)} = m^{(1)}$ because the number of reduced degrees of freedom $m^{(1)}$ has to be determined in the precomputation.

In summary, the precomputation of strategy A is computationally expensive, but the substructures can be reduced with different numbers ($m^{(s)} \neq m^{(t)}$). Thus, the strategy A is preferred for structures with high nonlinearities. Further, due to the fact that the snapshot generation is based on the global system, it is to be expected that strategy A leads to better accuracies. On the contrary, the precomputation of the strategy B is computationally cheaper, but the substructures can only be reduced with the same reduced degrees of freedom based on the only projection matrix. Since the strategy B is not based on a specific global system, the substructures can be still combined in an arbitrary way. This makes strategy B especially attractive for design purposes where the accuracy of a computation does not play the most important role yet.

In the following section the MORS method with strategies A and B is presented by investigating two numerical examples.

4.4 Numerical examples

4.4.1 MORS on cantilever beam including plastic deformation (strategy A)

In this numerical example, the proposed MORS method with strategy A is applied to a cantilever beam containing elastoplastic material, considering both geometrical and material nonlinearities. A cantilever beam with the geometry of $L \times H \times T = 160 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ is subdivided into four substructures, see Fig. 3. The material is the standard material in FEAP which is based on the logarithmic strain energy function, which is also called Hencky strain energy [9]. The multiplicative decomposition of elastoplastic deformation is considered in this material model for considering large deformation. In addition, the von Mises yield criterion

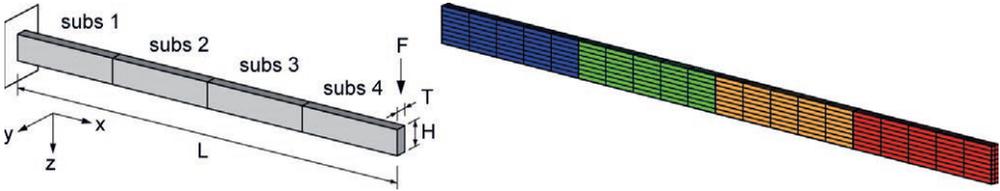


Bild 3: Geometrie und Dekomposition (links) sowie Modellierung eines Kragarms (FEAP-Modell mit vier Substrukturen, rechts) | Fig. 3: Geometry and decomposition (left) and finite element model of the cantilever beam (FEAP-model with four substructures, right)

Elastizitätsmodul Young's modulus	$E = 210.000 \text{ N/mm}^2$
Querkontraktionszahl Poisson's ratio	$\nu = 0,3$
Fließspannung Yield stress	$\sigma_y = 2.500 \text{ N/mm}^2$

Tabelle 1: Materialeigenschaften für die Modellierung des Kragarms | Table 1: Material properties for the modeling of the cantilever beam

Vorrechnung (Offline-Phase). Die rein elastische und elasto-plastische Vorrechnung werden separat durchgeführt. Die zugehörigen Kraft-Verformungskurven sind in Bild 4 dargestellt. Für den elastischen Fall werden 20 Snapshots gewählt, für den elasto-plastischen Fall 40.

In Bild 5 werden die tatsächlichen Verformungen jedes fünften Schritts dargestellt. Durch den Vergleich ist die plastische Verformung im zweiten Fall eindeutig zu sehen.

Während der Vorrechnung werden die Snapshots einzelner Substrukturen separat in einer sogenannten Snapshot-Matrix gespeichert. Anschließend wird für diese die Singulärwertzerlegung durchgeführt. Die zugehörigen singulären Werte aller Substrukturen zeigt Bild 6.

without hardening and the associated flow rule are taken into consideration in this material formulation. The corresponding material properties are given in Table 1.

Precomputation (offline phase). For this example the strategy A is applied. The purely elastic and elastoplastic precomputations are carried out separately, yielding the force-displacement curves shown in Fig. 4. For the elastic case, 20 snapshots are selected, while 40 snapshots are used for the elastoplastic case.

The deformations of both cases are plotted in Fig. 5. The plastic deformation is well captured.

The snapshot matrices of the four substructures are evaluated separately by means of singular value decomposition. The resulting eigenvalues are sorted, normalized, and truncated. The

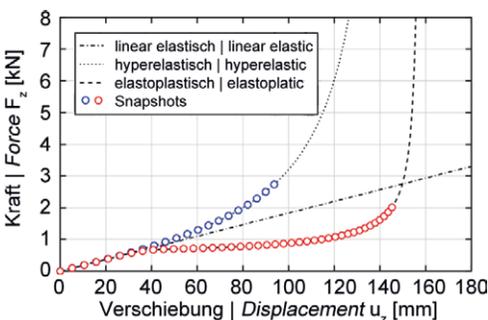


Bild 4: Kraft-Verschiebungskurve der Vorrechnung zur Bestimmung der Snapshots | Fig. 4: Force-displacement curves and snapshots

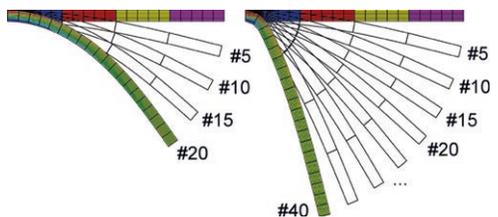


Bild 5: Verformungen für den elastischen Fall mit 20 Snapshots (links) und den elasto-plastischen Fall mit 40 Snapshots (rechts) | Fig. 5: Collected snapshots for the elastic case with 20 snapshots (left) and the plastic case with 40 snapshots (right)

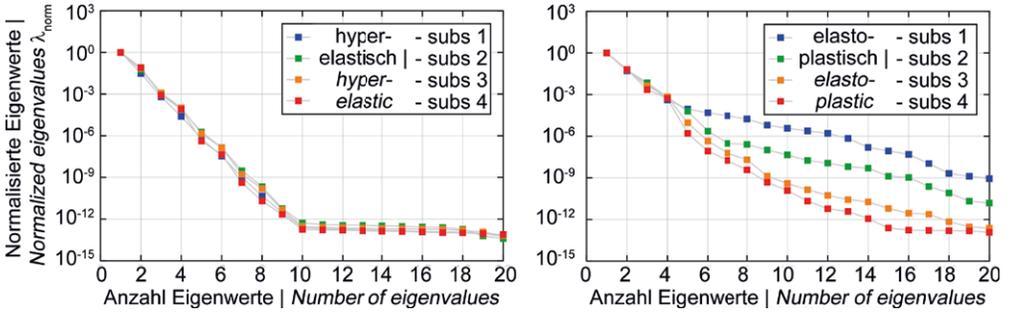


Bild 6: Singulärwertzerlegung für den elastischen (links) und den elasto-plastischen Fall | Fig. 6: Singular values of elastic (left) and elasto-plastic case (right)

Reduzierte Rechnung (Online-Phase). Für die reduzierte Rechnung in der Onlinephase wird die MORS für den elastischen und den elasto-plastischen Fall separat durchgeführt. Unterschiedliche Moden werden für alle Substrukturen gewählt. Die Kraft-Verschiebungskurven werden in Bild 7 dargestellt und verglichen.

Für den elastischen Fall sind vier Moden pro Substruktur notwendig, um ein gutes Ergebnis mit akzeptabler Genauigkeit zu erhalten. Im Gegensatz dazu sind für den elasto-plastischen Fall acht Moden erforderlich. Die Größe des Gleichungssystems in der reduzierten Rechnung beträgt nur 1 % des ursprünglichen Systems im elastischen bzw. 2 % im elasto-plastischen Fall.

Reduzierte Rechnung mit unterschiedlichen Freiheitsgraden. Im Folgenden wird eine adaptive Selektionsstrategie vorgestellt, welche durch die Wahl unterschiedlicher Anzahl von

20 most significant singular values of both cases are shown separately in Fig. 6.

Reduced computation (online phase). MORS is carried out on the cantilever beam for the elastic and elastoplastic cases separately, with the same number of modes for all substructures. The force-displacement curves are compared with the reference solution in Fig. 7.

For the elastic case, four modes per substructure are necessary to obtain a good result with acceptable accuracy. In contrast, eight modes are required for the elastoplastic case. The size of the equation system in the reduced calculation is only 1% of the original system in the elastic case and 2% in the elastoplastic case.

Reduced computation with different numbers of modes. In the following, an adaptive selection strategy is presented which, by selecting

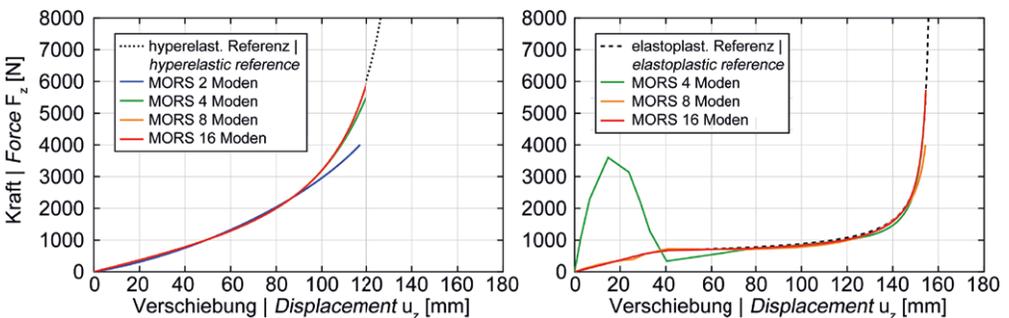


Bild 7: Reduzierte Rechnungen mit MORS und Vergleich der Genauigkeit; elastischer (links) und elasto-plastischer Fall (rechts) | Fig. 7: Reduced computation with MORS and comparison of accuracy; elastic (left) and elastoplastic case (right)

Moden für unterschiedliche Substrukturen dazu führt, dass jede Substruktur ungefähr die gleiche Genauigkeit aufweist. Das ist hier besonders für den elasto-plastischen Fall von Interesse.

Die Anzahl der reduzierten Freiheitsgrade für die beiden Fälle, die separat mit der MORS analysiert werden, sind jeweils 32 und 41. Die Ergebnisse werden in Bild 8) präsentiert. Alle Rechnungen stimmen gut mit der Referenzlösung überein. Es ist bemerkenswert, dass trotz gleicher Anzahl der reduzierten Freiheitsgrade der Fall mit 13/7/6/6 Moden pro Substruktur bessere Ergebnisse liefert als der Fall mit 8/8/8/8.

4.4.2 MORS mit einer Substruktur (Strategie B)

Im vorangegangenen Beispiel wurde die Vorrechnung am Gesamtsystem durchgeführt, d. h. Strategie A wurde verwendet. Deshalb hängen die Moden der Substrukturen stark von dem Verhalten des globalen Systems ab. Falls man eine modulare Struktur entwerfen möchte, ist es jedoch nicht möglich, mit einem globalen System anzufangen, da dieses noch zu konstruieren ist und daher noch nicht existiert. Die geeignete Strategie ist dann, die Vorrechnung auf Substrukturebene durchzuführen (Strategie B). Diese Strategie ist relevant für realistische Strukturen, die sehr komplex sind. Es müssen nur einige repräsentative Substrukturen ausgewählt werden, für die die Vorrechnung

different numbers of modes for different substructures, results in each substructure having approximately the same accuracy. This is of particular interest for the elastoplastic case.

The total numbers of reduced degrees of freedom for the two cases, which are analyzed separately with the MORS, are $m = 32$ and $m = 41$, respectively. The results are presented in Fig. 8), which show good agreement with the reference solution. Interestingly, by using the same number of reduced degrees of freedom (here $m = 32$), the choice with 13/7/6/6 modes per substructure gives more accurate results than the case with 8/8/8/8.

4.4.2 MORS with one substructure (strategy B)

In the previous example, the precomputation has been carried out on the global system (strategy A as mentioned in the introduction). Therefore, the modes of the substructures depend strongly on the behaviour of the global system. If one aims at a design method for modular structures, it is not reasonable to take the global system as starting point, because this has still to be designed and does not exist yet. It is then a suitable strategy to carry out the precomputation at the level of the substructures (strategy B). In systems of higher complexity as they are relevant for realistic applications, one would need to select representative substructures and carry out the offline precomputation for each of these sub-

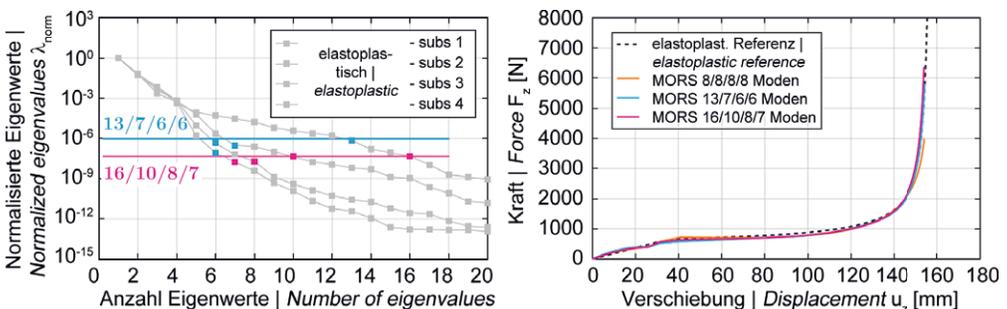


Bild 8: Reduzierte Rechnung mit unterschiedlicher Anzahl der Moden; links: zwei gewählte Fälle mit unterschiedlichen Moden, rechts: reduzierte Rechnung | Fig. 8: Reduced computation with different numbers of modes; left: two selected cases with different modes, right: MORS with different modes

in der Offline-Phase durchgeführt wird. Diese Substrukturen können dann zu beliebigen Gesamtsystemen zusammengesetzt werden. Der Hauptvorteil ist, dass in der Vorrechnung nicht das gesamte System untersucht werden muss. In der Onlinephase wird nur ein kleines reduziertes Gleichungssystem auf der globalen Ebene gelöst.

Vorrechnung der Substruktur. Eine Substruktur mit der Geometrie $L / H / T = 12,5 / 8,0 / 1,0$ [mm] wird als eine Grundsubstruktur gewählt (Bild 9, links). Die Materialeigenschaften entsprechen denen des vorherigen Beispiels. Für die Generierung von Biege-Moden wird eine lineare Flächenlast auf zwei gegenüberliegende Flächen der Substruktur aufgebracht (Bild 9, Mitte). Die Substruktur wird in FEAP mit $8 \times 8 \times 1$ -Brick-Elementen modelliert (Bild 9, rechts).

In der Vorrechnung werden acht Grundmoden berücksichtigt, die aus drei Starrkörper-Moden, einer Schub-Mode und je zwei Zug- und Biege-Moden bestehen. Die ersten sechs Moden werden mit vorgegebener Verformung gerechnet, die letzten zwei Biege-Moden mit Flächenbelastung (Bild 9, Mitte). Die acht Grundmoden werden im Bild 10 dargestellt.

Für den nichtlinearen Fall müssen die Grundmoden unter Berücksichtigung von großen Deformationen gerechnet werden. Das hat insbesondere einen signifikanten Einfluss auf die Biege-Moden, da die Spannungsverteilung anders ist als im linearen Fall. Die Richtung der Flächenlasten muss zusätzlich geändert werden, sodass schließlich vier Biege-Moden zu betrachten sind (Bild 11).

structures. The major advantage of strategy B is that the large global system does not have to be analyzed in the precomputation, instead only a few substructures are to be investigated.

Precomputation of the substructure. A substructure of cuboid shape with the geometry $L / H / T = 12.5 / 8.0 / 1.0$ [mm] is chosen as the basic substructure (Fig. 9, left). We use the same material parameters as in the previous example. For the generation of the bending modes, linear surface pressure is applied on the opposite sides of the basic substructure (Fig. 9, middle). The substructure is modeled in FEAP by $8 \times 8 \times 1$ brick elements (Fig. 9, right).

In the preliminary calculation eight basic modes are considered, which consist of three rigid body modes, one shear mode and two tension and two bending modes each. The first six modes are calculated with given deformation, the last two bending modes with surface loading (Fig. 9, middle). The eight basic modes are shown in Fig. 10.

In the nonlinear case, the basic modes must be calculated taking into account large deformations. This has in particular a significant influence on the bending modes, since the stress distribution is different than in the linear case. The direction of the surface loads must also be changed so that finally four bending modes can be considered (Fig. 11).

Together with the other six modes, ten nonlinear basic modes are considered in the precomputation. Each basic mode is computed with

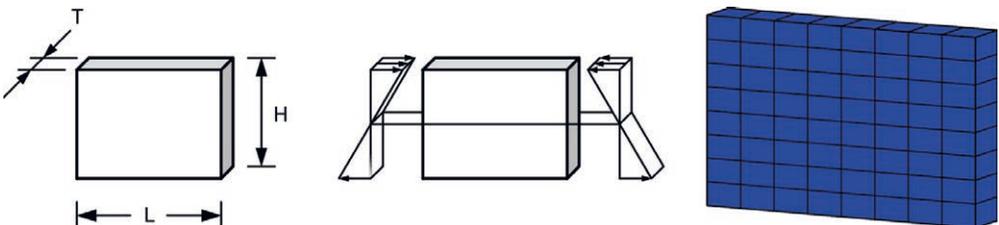


Bild 9: Substruktur als repräsentativer Baustein; links: Geometrie, Mitte: Flächenlast, rechts: FEAP-Modell | **Fig. 9:** Basic substructure; left: geometry, middle: area load, right: FEAP model

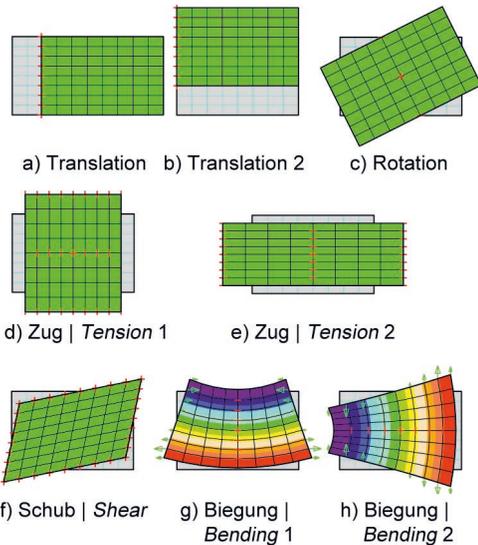
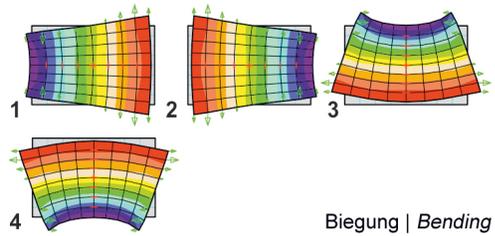


Bild 10: Deformation der 8 Grundmoden | Fig. 10: Deformation of 8 basic modes

Zusammen mit den anderen sechs Moden werden insgesamt zehn nichtlineare Grundmoden in der Vorrechnung berücksichtigt. Jeder Grundmode wird in fünf Lastschritten gerechnet, so dass jeweils fünf Snapshots gesammelt werden. Die Singulärwertzerlegung wird für 50 Snapshots durchgeführt. Die resultierenden singulären Werte sind in Bild 12 dargestellt.

Modellreduktion angewendet auf einen Z-förmigen Kragarm. Der betrachtete Z-förmige Kragarm besteht, wie in Bild 13 dargestellt, aus vier Substrukturen. Das Ziel dieses Beispiels ist, einen weiteren Vorteil der MORS-Methode in Strategie B zu zeigen. Wenn eine bedeutende Nichtlinearität in einer Substruktur auftritt, dann ist es erwünscht, diese Substruktur ohne Reduktion zu berechnen. Das ist speziell für modulare Strukturen mit komplexer Geometrie von Interesse. Die nicht reduzierten und die reduzierten Substrukturen müssen dann gekoppelt und gleichzeitig analysiert werden.

Das Verhalten der Substruktur 2 ist sehr komplex, so dass diese Substruktur ohne Reduktion gerechnet wird. Die restlichen Substrukturen 1, 3 und 4 werden – wie im vorherigen Beispiel



Biegung | Bending

Bild 11: Grundmoden in nichtlinearer Rechnung für Biegung | Fig. 11: Nonlinear bending modes of the basic substructure

5 load steps and thus 5 snapshots are collected. The singular value decomposition is then performed on the 50 collected snapshots and the singular values are shown in Fig. 12.

MORS of a Z-form cantilever beam. A Z-form cantilever beam is shown in Fig. 13, which consists of four substructures. The aim of this example is to show a further advantage of the MORS method with strategy B. If high nonlinearity occurs in one substructure, it is then desired to be computed in a standard way, in other words, without reduction. This is especially useful for modular structures with complex geometry. The unreduced and reduced substructures have to be coupled and analyzed simultaneously.

The connection of substructure 2 is very complex, so that it should be computed without reduction. The remaining three substructures 1, 3 and 4 are reduced with strategy B. In Fig. 14 the Cauchy stress component σ_{xx} and the stress error are compared with respect to different

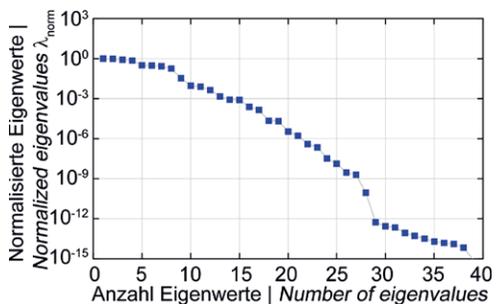


Bild 12: Singuläre Werte einer einzelnen Substruktur aus nichtlinearer Vorrechnung | Fig. 12: Singular values of a single substructure based on nonlinear calculations

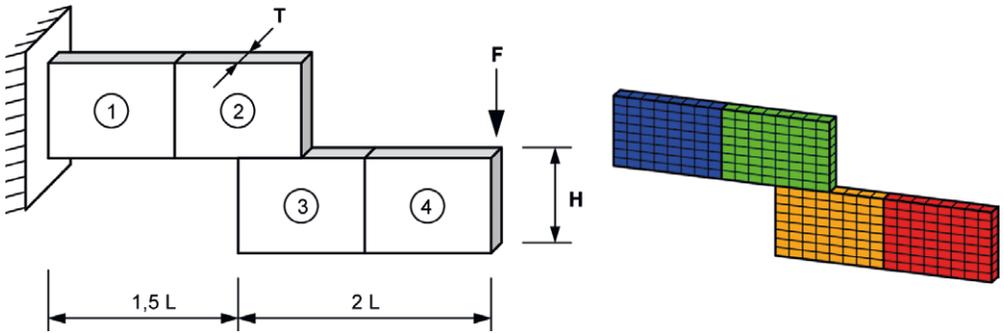


Bild 13: Modell und Vernetzung eines Z-förmigen Kragarms, links: Geometrie und Substrukturen, rechts: FEAP-Modell in 3D | **Fig. 13:** Model and mesh of cantilever beam in Z-form; left: geometry and substructures; right: 3D FEAP model

präsentiert – mit Strategie B reduziert berechnet. In Bild 14 werden jeweils die Verteilungen der σ_{xx} -Komponente der Cauchy-Spannung und der Spannungsfehler mit unterschiedlichem Reduktionslevel verglichen. Der Spannungsfehler ist hier definiert als $\eta = (\sigma_{xx} - \sigma_{xx,ref}) / \max(\sigma_{xx,ref})$, wobei σ_{xx} die Spannung in der reduzierten Rechnung und $\sigma_{xx,ref}$ die Spannung in der nicht reduzierten Rechnung sind. Die maximale Spannung in der Referenzlösung $\max \sigma_{xx,ref}$ wird gewählt, um die Spannungsfehler in unterschiedlich reduzierten Rechnungen zu vergleichen. Zusätzlich wird der Spannungsfehler mit gleicher Skalierung in der Legende dargestellt.

In der Darstellung der Spannung wird der Unterschied kaum deutlich. Mit zunehmender Anzahl der Moden reduziert sich der Spannungsfehler wie erwartet. Der maximale Spannungsfehler taucht nur in lokal eingeschränkten Bereichen auf. In diesem Beispiel werden die reduzierten und nicht reduzierten Substrukturen flexibel miteinander gekoppelt, was als ein weiterer Vorteil dieser Methode zu betrachten ist.

5 Zusammenfassung

In diesem Projekt wurde eine neue numerische Methode – Substrukturierung basierend auf „bonded contact“ in Kombination mit Modellreduktion (MORS) – entwickelt und auf nichtlineare quasi-statische Finite-Elemente-Analysen angewandt. Die zwei wesentlichen Ziele, zum

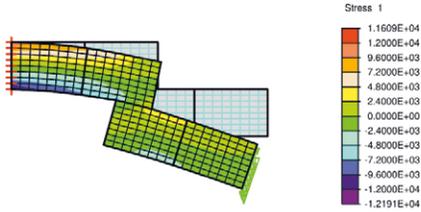
levels of reduction. The stress error is defined as $\eta = (\sigma_{xx} - \sigma_{xx,ref}) / \max(\sigma_{xx,ref})$, with σ_{xx} as the stress in the reduced computation and $\sigma_{xx,ref}$ the stress in the unreduced computation. The maximum stress in the reference solution $\max \sigma_{xx,ref}$ is considered for the comparison of the absolute value of the stress differences in different reduced computations. Additionally, the stress errors are also plotted with the same legends.

The stress plots do not show the significant differences, which shows that strategy B can be applied successfully. By increasing the numbers of the modes the stress errors decrease as expected. The large stress errors are only located in small areas. The overall structural behaviors are well captured in all cases. In this example, the reduced and unreduced substructures are coupled flexibly and analyzed together which is a further considerable advantage.

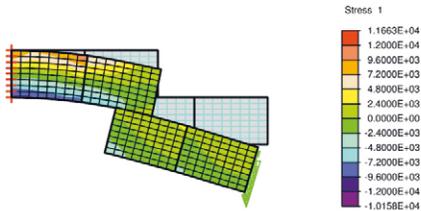
5 Conclusion

A novel method of model order reduction on substructures (MORS) is developed and applied in the context of nonlinear quasi-static analysis. Two main targets, namely the efficient reduction at the substructure level, and the flexible coupling of arbitrary substructures, are achieved.

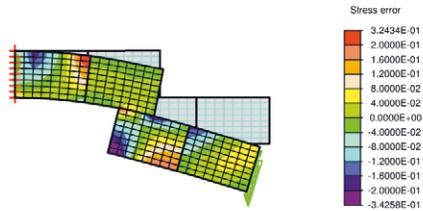
Considering the reduction as one main target, two strategies A and B were presented. Each



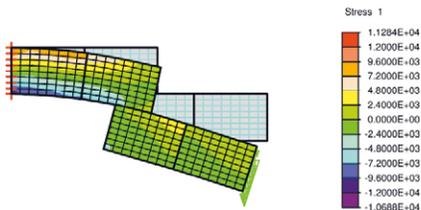
a) Originale Berechnung ohne MORS (Referenzlösung) | *Original calculation without MORS (reference)*



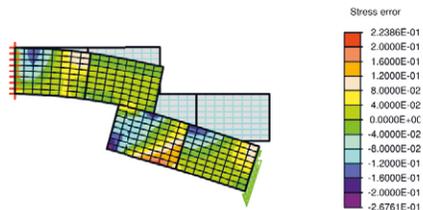
b) MORS mit 8 Moden | *MORS with 8 modes*



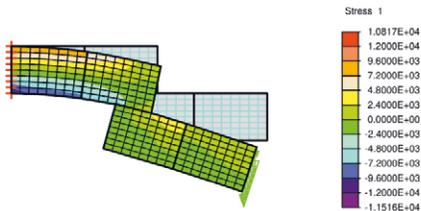
c) Spannungsfehler mit 8 Moden | *Stress error with 8 modes*



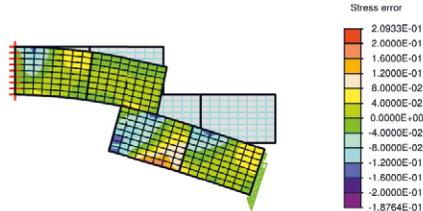
d) MORS mit 16 Moden | *MORS with 16 modes*



e) Spannungsfehler mit 16 Moden | *Stress error with 16 modes*



f) MORS mit 32 Moden | *MORS with 32 modes*



g) Spannungsfehler mit 32 Moden | *Stress error with 32 modes*

Bild 14: MORS mit verschiedenen Moden | Fig. 14: MORS with different modes

einen die effiziente Reduktion auf Substrukturebene und zum anderen die flexible Kopplung beliebiger Substrukturen, wurden erreicht.

Für die Reduktion werden zwei Strategien A und B präsentiert. Beide Strategien haben Vor- und Nachteile. Strategie A basiert auf der Vorrechnung des globalen Systems. Der Aufwand in der Vorrechnung ist deshalb nicht vernachlässigbar.

of them has its own advantages and disadvantages. Strategy A relies on the precomputation of the global system. The effort in the precomputation is high, but the substructures can be individually reduced with a small number of unknowns. On the contrary, the strategy B demands only the precomputation of one substructure or a few substructures, which is computationally very cheap, but the reduction

Die Substrukturen können individuell zu einer kleinen Dimension reduziert werden. Im Gegensatz dazu erfordert die Strategie B nur die Vorrechnung einer einzigen Substruktur oder weniger Substrukturen. Die Vorrechnung ist einfach, aber das reduzierte System zeigt größere Abweichungen zum Originalsystem als bei Strategie A. Die Strategie A ist für schon entworfene Strukturen geeignet, insbesondere für die Analyse von Strukturen mit höheren Nichtlinearitäten. Die Strategie B ist insbesondere in der Designphase eines Systems von Interesse. Darüber hinaus können beide Strategien, wie in den numerischen Beispielen präsentiert, durch zusätzliche numerische Erweiterungen verbessert werden. In Strategie A können die Moden adaptiv selektiert werden, um das gleiche Level der Genauigkeit zu erreichen. In Strategie B ermöglicht die Kopplung von reduzierten und nicht reduzierten Substrukturen eine Verbesserung der Ergebnisse.

Einige numerische Beispiele mit Berücksichtigung hyperelastischen und elasto-plastischen Materialverhaltens und großer Deformationen wurden präsentiert. Die Beispiele zeigen, dass die auf der Snapshot-POD basierende MORS-Methode für die nichtlineare Analyse mit materiellen und geometrischen Nichtlinearitäten sehr gut geeignet ist.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 257611820 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

is less efficient. Strategy A is preferred for already designed structures with high nonlinearities. Strategy B is especially suitable in the design stage. Furthermore, both strategies are improved with additional treatments, which are shown in the numerical examples. In strategy A, an adaptive selecting method can be applied to achieve the same level of accuracy in all substructures. In strategy B, the coupling of reduced and unreduced substructure is capable to improve the results so that errors can be noticeably reduced.

Numerical examples including hyperelastic and elastoplastic material behaviour as well as large deformation are presented. The examples show that the proposed snapshot-POD based MORS method is well suited for nonlinear analyses considering material as well as geometrical nonlinearities.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (number 257611820) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Wriggers, P.: Computational Contact Mechanics. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006
- [2] Laursen, T.: Computational Contact and Impact Mechanics. Berlin, New York, Heidelberg: Springer, 2002
Wriggers; P.; Zavarise, G.: Computational contact mechanics. Encyclopedia of computational mechanics (2004), 195–226 – DOI: <https://doi.org/10.1002/0470091355.ecm033>
- [3] Zhou, L.; Reese, S.: Substructuring through bonded contact and a study of convergence. In: Elgeti, S.; Simon, J.-W. (Hrsg.): Proc. of the 3rd ECCOMAS Young Investigators Conf. on Computational Methods in Applied Sciences and 6th GACM Coll. on Computational Mechanics (YIC GACM 2015), 20.–23.07.2015 in Aachen, 2015, S. 268–271 – DOI: 10.13140/RG.2.1.4187.3761
- [4] Zhou, L.; Reese, S.: A computationally efficient numerical method for the analysis of a geodesic dome using modular plane shell substructures. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-520449, publ. auf USB-Stick: 15 S.
- [5] Hesch, C.; Betsch, P.: Isogeometric analysis and domain decomposition methods. In: Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 213 (2012), S. 104–112 – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2011.12.003>
- [6] Zhou, L.; Simon, J.; Reese, S.: Proper orthogonal decomposition for substructures in non-linear finite element analysis – coupling by means of tied contact. Archive of Applied Mechanics 88 (2018) 11, S. 1975–2001
- [7] Radermacher, A.; Bednarczyk, B. A.; Stier, B.; Simon, J.; Zhou, L.; Reese, S.: Displacement-based multiscale modeling of fiber-reinforced composites by means of proper orthogonal decomposition. Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences 3 (2016) 1, 23 S. – DOI: 10.1186/s40323-016-0082-8
- [8] De Souza Neto, E. A.; Perić, D.; Owen, D. R. J.: Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications. John Wiley & Sons Ltd., 2008

Bildnachweise | Picture credits

Alle Bilder | All figures: Lei Zhou

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Modellreduktion und Substrukturtechnik am Beispiel von modularen Schalentragwerken aus ultrahochfestem Beton

Model reduction and substructure technique – application to modular shell structures made of ultra-high performance concrete

Antragstellerin Applicant:	Prof. Dr.-Ing. habil. Stefanie Reese Professorin und Institutsleiterin Professor and head of institute
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	RE 1057/32-1 (Projektnummer Project number: 257611820)
Adresse Address:	RWTH Aachen University, Institut für Angewandte Mechanik (ifam), Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
Kontakt Contact:	+49 241 80 25001 stefanie.reese@rwth-aachen.de www.ifam.rwth-aachen.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	10/2014–12/2017
Team Team:	Lei Zhou Jaan Simon

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Zhou, L.; Simon, J. W.; Reese, S.: Proper orthogonal decomposition for substructures in non-linear finite element analysis – coupling by means of tied contact. *Archive of Applied Mechanics* 88 (2018) 11, S. 1975–2001 – DOI: 10.1007/s00419-018-1427-1
- Radermacher, A.; Bednarczyk, B. A.; Stier, B.; Simon, J. W.; Reese, S.: Displacement-based multiscale modeling of fiber-reinforced composites by means of proper orthogonal decomposition. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences* 3 (2016) 1, 29, 23 S. – DOI: 10.1186/s40323-016-0082-8
- Zhou, L.; Reese, S.: Substructuring through bonded contact and a study of convergence. In: Elgeti, S.; Simon, J. W. (Hrsg.): *Proc. of the 3rd ECCOMAS Young Investigators Conf. on Computational Methods in Applied Sciences and 6th GACM Coll. on Computational Mechanics (YIC GACM 2015)*, 20.–23.07.2015 in Aachen, 2015, S. 268–271 (online publiziert) – urn:nbn:de:hbz:82-rwth-2015-039806
- Zhou, L.; Reese, S.: A computationally efficient numerical method for the analysis of a geodesic dome using modular plane shell substructures. *Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015*, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-520449, publ. auf USB-Stick, 15 S.
- Reese, S.; Kastian, S.; Zhou, L.: Proper Orthogonal Decomposition – APOD / MORS and a quite different topic: forecasting. Keynote lecture, 4th Int. Workshop on Reduced Basis, POD and PGD Model Reduction Techniques, 08.–10.11.2017 in Sevilla (Spanien), 2017
- Reese, S.; Kochmann, J.; Rezaei, S.; Wulfinghoff, S.; Zhou, L.; Cavaliere, F.; Simon, J.; Radermacher, A.: Multi-scale modeling using finite elements, fast Fourier transforms and proper orthogonal decomposition in production and medical technology. Plenary lecture, *Computational Modelling of Multi-Uncertainty and Multi-Scale Problems (COMUS)*, 12.–14.09.2017 in Porto (Portugal), 2017
- Reese, S.; Zhou, L.; Kastian, S.; Simon, J. W.; Radermacher, A.: Proper orthogonal decomposition at finite strains – APOD / MORS / FE*POD. 14th Int. Conf. on Computational Plasticity (COMPLAS 2017), 05.–07.09.2017 in Barcelona (Spanien), 2017
- Zhou, L.; Simon, J. W.; Reese, S.: Model order reduction on the substructure level applied in nonlinear static and dynamic analysis. 2nd Exploratory Workshop on Applications of Model Order Reduction Methods in Industrial Research and Development, 10.03.2017 in Luxembourg (Luxemburg), 2017
- Zhou, L.; Simon, J. W.; Reese, S.: A novel POD-based model order reduction at the substructure level for non-linear structural analysis. 3rd Workshop on Model Reduction of Complex Dynamical Systems (MODRED 2017), 11.–13.01.2017 in Odense (Denmark), 2017

- Zhou, L.; Simon, J. W.; Reese, S.: Nonlinear POD-based Model Order Reduction on the substructures with bonded contact for the interface coupling problems. Poster by Conf. on Data-driven Model Order Reduction and Machine Learning (MORML 2016), 30.03.–01.04.2016 in Stuttgart, 2016
- Reese, S.; Bednarczyk, B.; Kochmann, J.; Radermacher, A.; Simon, J. W.; Wulfinghoff, S.; Zhou, L.: Displacement-based multiscale modelling and substructuring by means of POD. keynote lecture, 3rd Workshop on Reduced basis, Proper Orthogonal Decomposition & Proper Generalized Decomposition, Nov. 2015 in Paris (Frankreich), 2015 – Vortrag | Oral presentation
- Zhou, L.; Reese, S.: Shell structure analysis with model order reduction and substructure techniques. 3rd ECCOMAS Young Investigators Conf. and 6th GACM Colloquium, 20.–23.07.2015 in Aachen, 2015 – Vortrag | Oral presentation
- Zhou, L.; Reese, S.: Model order reduction and substructure techniques through bonded contact. 9th European Solid Mechanics Conference (ESMC9), 06.–10.07.2015 in Madrid (Spanien), 2015 – Vortrag | Oral presentation

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Modellreduktion in Raum und Parameterdimension – Schädigungs-basierte Modellierung polymorpher Unschärfen im Zusammenhang mit Robustheit und Zuverlässigkeit | Model order reduction in space and parameter dimension – towards damage-based modeling of polymorphic uncertainty in the context of robustness and reliability

Antragstellerin Applicant:	Prof. Dr.-Ing. habil. Stefanie Reese
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 1886
Laufzeit Period:	01.10.2016–31.12.2022

- A01: Eine neue Methodologie zur Übertragung effizienter Lastabtragsmechanismen aus der Natur auf Strukturen aus Carbonbeton | A01: A new methodology to transfer efficient mechanisms of load transmission from nature to structures made of carbon reinforced concrete

Antragsteller:in Applicants:	Prof. Dr.-Ing. habil. Stefanie Reese, Prof. Dr.-Ing. habil. Jaan Simon (ifam, RWTH Aachen University)
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 280
Laufzeit Period:	seit since: 01.07.2020

- B05: Kopplung von intrusiven und nichtintrusiven lokal zerlegten Modellreduktionsverfahren für schnelle Simulationen von Straßensystemen | B05: Coupling of intrusive and non-intrusive locally decomposed model order reduction techniques for rap-id simulations of road systems

Antragstellerin Applicant:	Prof. Dr.-Ing. habil. Stefanie Reese
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 339
Laufzeit Period:	seit since: 01.01.2022

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation eines Minisymposiums „Model order reduction with emphasis on non-linear and multi-scale problems“ bei der COMPLAS 2017, 05.–07.09.2017 in Barcelona (Spanien) | Organization of a mini symposium “Model order reduction with emphasis on non-linear and multi-scale problems“ at COMPLAS 2017, 05.–07.09.2017

Leichte Platten aus Beton mit biaxialem Lastabtrag als bionische Strukturen

- ▶ Martina Schnellenbach-Held, Jan-Eric Habersaat
- ▶ Institut für Massivbau (IfM), Universität Duisburg-Essen

1 Forschungsanlass

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von leichten, ressourcenschonenden und tragfähigen Stahlbetonplatten als bionische Struktur, die durch Adaption natürlicher Formen und Prinzipien einen naturähnlichen Kraftfluss aufweisen. Es wurden drei voneinander unabhängige bionische Stahlbetonplattenstrukturen entwickelt und hinsichtlich des Tragverhaltens untersucht.

Das Forschungsprojekt gliedert sich in die drei Arbeitsphasen:

1. Untersuchung und Optimierung einer spinnennetzartigen Bewehrungsanordnung,
2. Entwicklung einer bionischen Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite,
3. Optimierung des Kraftflusses durch die Form und die Anordnung von Hohlkörpern im Platteninneren.

Die naturinspierte Gestaltung der Plattenunterseite führt neben der veränderten Tragstruktur zu einer innovativen Formgebung, die die überwiegend kantigen und „langweiligen“ Betonstrukturen ersetzen kann.

1.1 Methodik zur Entwicklung bionischer Strukturen

Als Methoden zur Entwicklung von bionischen Strukturen sowie zur Berechnung der neuartigen Stahlbetonplatten wurden evolutionäre Optimierungsalgorithmen in Kombination mit

physikalisch nichtlinearen Finite-Elemente Analysen eingesetzt.

1.2 Optimierungsalgorithmen

Die Entwicklung der bionischen Strukturen in den einzelnen Arbeitsphasen basiert auf Optimierungsalgorithmen der biologischen Evolution in Kombination mit numerischen Analysen. Evolutionäre Algorithmen (EA) [1] bilden den biologischen Evolutionsprozess in einem Softwaresystem ab, um beispielsweise technische Probleme zu lösen. Basis für die Optimierungsaufgaben im Rahmen des Forschungsvorhabens stellt ein am Institut für Massivbau (IfM) selbstentwickelter EA „GPCore“ [2] dar.

Unter Einsatz von EA wurden eine spinnennetzartige Bewehrungsführung und eine naturinspierte Anordnung von Rippen und Querrippen entwickelt. Der evolutionäre Optimierungsalgorithmus GPCore wurde für die jeweilige Problemstellung erfolgreich weiterentwickelt.

1.3 Finite-Elemente-Analysen

Die physikalisch nichtlinearen Berechnungen in den einzelnen Arbeitsphasen wurden mit dem Finite-Elemente-Programmsystem TNO DIANA [3] durchgeführt. Es wurde eine 3D-Modellierung mit isoparametrischen Volumenelementen (20-knotige Brickelemente sowie zehnknotige Tetraederelemente) mit quadratischen Ansatzfunktionen gewählt.

Die numerischen Untersuchungen der Stahlbetonplatten erfolgten für den Druck- und Zugbereich mit dem *Total-Strain*-Konzept. Die Bauteiluntersuchungen konnten hiermit realistisch abgebildet werden. Da eine diskrete Darstellung der Rissbildung für die numerischen Untersuchungen nicht notwendig und außerdem sehr zeit- und rechenintensiv ist, wurde für die Simulationen der Modelle eine verschmierte Rissbildung verwendet. Das Materialverhalten des Betons unter Zugbeanspruchung wurde mit dem uniaxialen Materialmodell nach Hordijk [4], die Abbildung des Betons unter Druckbeanspruchung mit dem Materialmodell nach Thorenfeld [5] beschrieben.

Die Bewehrung wurde als eingebettetes (*embedded*) Element abgebildet. Es wird von einem starren Verbund zwischen Bewehrung und Beton ausgegangen. Die Bewehrung wurde mittels eines bilinearen isotropen Plastizitätsmodells abgebildet, welches durch den Elastizitätsmodul sowie die Fließgrenze des Betonstahls definiert ist.

2 Bewehrungsführung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes

2.1 Optimierung der Bewehrungsanordnung

Ziel war die Entwicklung eines innovativen naturinspirierten Ansatzes zur Bewehrung von Stahlbetonplatten. Die Grundgeometrie der Bewehrung orientiert sich an dem Aufbau eines Radspinnennetzes. Mittels evolutionärer Optimierungsalgorithmen (GPCore) wurden tragfähige Strukturen mit möglichst geringem Bewehrungsgehalt entwickelt. Die Optimierungsvariablen wurden so verändert, dass für das gegebene statische System das optimale Individuum entsteht. Zur Optimierung der Tragfähigkeit wurden die Winkel α und φ zwischen den radialen Bewehrungsstäben sowie die Anzahl der Bewehrungsstäbe in den vorab definierten Bereichen Alpha, Beta, Phi, Gamma, Ring sowie Ecke variiert, [6], [7].

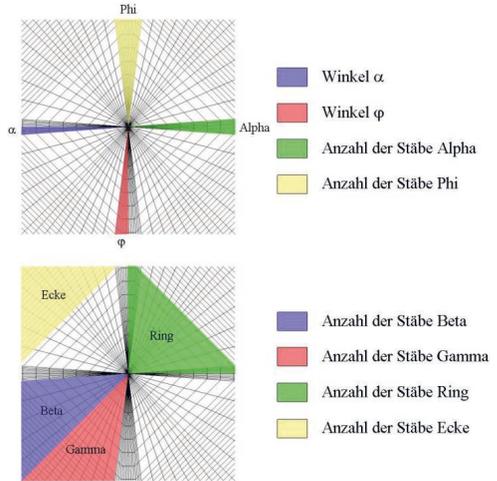
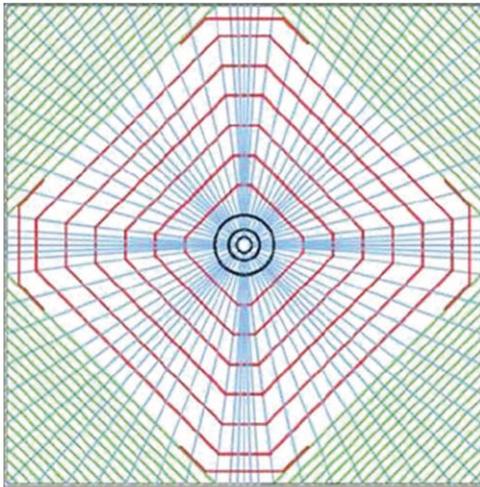


Bild 1: Optimierungsvariablen

Die maximale Menge der Bewehrung (\varnothing 10 mm) in einer Platte wurde für die Modelle mit einer Abmessung von 5,0 × 5,0 × 0,15 m auf 400 m Bewehrungslänge begrenzt. Dies entspricht der Bewehrung einer Referenzplatte mit orthogonal verlegter Bewehrung im Abstand von 12,5 cm.

Das Last-Verformungs-Verhalten der während des Optimierungsvorgangs erzeugten Strukturen wurde mit physikalisch nichtlinearen Finite-Elemente-Simulationen ermittelt und anschließend mittels der vorab definierten Fitnessfunktion bewertet. Die Fitness errechnet sich aus dem Verhältnis der Durchbiegung in Plattenmitte zur Gesamtlänge der verlegten Bewehrung in der Platte. Die Ergebnisse wurden mit denen orthogonal bewehrter Platten mit äquivalentem Bewehrungsgehalt (verlegte Bewehrungslänge mit \varnothing 10 mm) verglichen.

Bild 2 zeigt die Bewehrungsanordnung mit den drei maßgebenden Bewehrungsbereichen. Der während des Optimierungsprozesses noch vereinfacht simulierte Knotenpunkt in Plattenmitte (Überlagerung aller radialen Stäbe) wurde für die numerischen Detailuntersuchungen sowie für die experimentellen Untersuchungen mit einer Zugringkonstruktion ausgebildet. Die Bewehrung besteht aus einer radialen Grundbewehrung (blau in Bild 2) und zwei tangentialen Bewehrungsbe-



- Radiale Grundbewehrung
- Tangentielle Eckbewehrung
- Tangentielle Bewehrung

Bild 2: Bewehrungsanordnung

reichen: den in grün dargestellten Eckdiagonalen sowie den rot eingezeichneten Oktagonen mit je vier langen und vier kurzen Seiten.

2.2 Finite-Elemente-Berechnungen

Die anschließenden numerischen Untersuchungen, bei denen die Zugringkonstruktion berücksichtigt wurde, zeigte ein verbessertes Tragverhalten der spinnennetzartig bewehrten Platte gegenüber der orthogonal bewehrten Referenzplatte. Zur Ausbildung der Zugringkonstruktion wurden verschiedene Varianten, bspw. unterschiedliche Betonstahldurchmesser sowie Baustahl-Zugringe, untersucht. Je größer der Bewehrungsquerschnitt des Zugrings ist, desto geringer sind die Verformungen der Platte.

2.3 Experimentelle Untersuchungen

Es wurden insgesamt neun Stahlbetonplatten mit Abmessungen von $4,0 \times 4,0 \times 0,13$ m am IfM

Platte	Lagerung	Lasteinleitung	Bewehrung	Betoneigenschaften nach 28 d	
				Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]	Elastizitätsmodul E_c [N/mm ²]
SP1	Ecken frei	Flächenlast	Konstruktion A orthogonal	38,4	23.777
Ref1				35,7	24.375
SP2	Ecken eingespannt		Konstruktion A orthogonal	36,3	23.950
Ref2				36,5	25.307
SP3			Konstruktion B	41,1	27.491

Tabelle 1: Versuchsprogramm



Bild 3: Konstruktion A (links) und Konstruktion B (rechts)

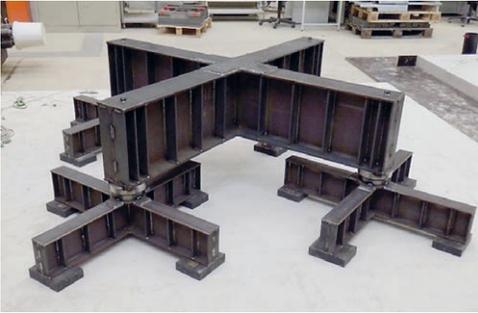


Bild 4: Lasteinleitungsstruktur

geprüft (Tabelle 1). Hierbei wurden Einflüsse der Lasteinleitung, der Lagerungsbedingungen sowie der Bewehrungsbildung untersucht. Zur Einordnung der Ergebnisse wurden drei Referenzplatten mit kreuzweise verlegter Bewehrung ($\varnothing 10/12,5$ cm) hergestellt und geprüft.

Die entwickelte Platte wurde mit zwei unterschiedlichen Zugringkonstruktionen getestet.

Dabei kamen eine massive Konstruktion aus Baustahl, die gleichzeitig der Lagesicherung diente (Konstruktion A), und eine filigranere Konstruktion (B) mit zwei Zugringen aus Betonstahl ($\varnothing 14$ mm) und einem dünnen Baustahlring zum Einsatz. Bei Konstruktion A (Bild 3, links) wurden die angeschlossenen Bewehrungsstäbe mit Schlaufen am jeweiligen Zugring rückverankert, bei Konstruktion B (Bild 3, rechts) wurden die radialen Bewehrungsstäbe an die Konstruktion geschweißt.

Die Lasteinleitung erfolgte als äquivalente Flächenlast über eine Lasteinleitungsstruktur mit 16 Lasteinleitungsflächen, Bild 4, mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min.

Bild 5 zeigt anhand der Last-Verformungs-Kurven der Probekörper SP2 (Konstruktion A), SP3 (Konstruktion B) und Ref2 die Auswirkungen der spinnennetzartigen Bewehrungsanordnung auf das Biegetragverhalten. Hierbei wird

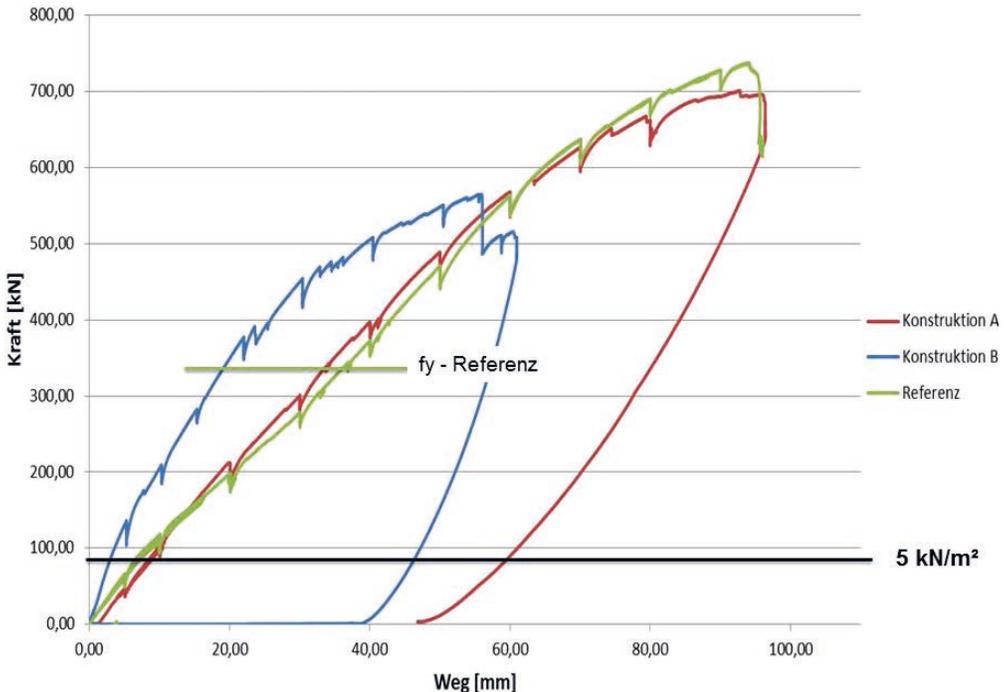


Bild 5: Last-Verformungs-Diagramm – experimentelle Untersuchungen: Konstruktionen A, B und Referenz

über den Prüfzylinderweg die globale Verformung des Plattensystems berücksichtigt. Die Platten SP2 und SP3 zeigten eine verbesserte Biegesteifigkeit gegenüber der Referenzplatte. Auch wenn Platte SP3 die Traglast der Referenzplatte nicht erreichte, konnte bei einer üblichen Nutzlast des Hoch- und Ingenieurbaus ein deutlich verbessertes Tragverhalten erzielt werden. Beispielsweise sind bei einer Nutzlast von $5,0 \text{ kN/m}^2$ die Systemverformungen bei Platte SP3 deutlich geringer als bei den beiden anderen Plattentypen. SP2 erzielte eine mit der Referenzplatte vergleichbare Traglast und zeigte das duktilste Verhalten im Traglastbereich. Die geringere Traglast bei SP3 ist auf den kleineren Zugringquerschnitt im Vergleich zu Ausführung SP2 sowie auf das Versagen der auf Stoß geschweißten Betonstahlringe zurückzuführen.

Die Versuche bestätigten die Erkenntnisse der zuvor durchgeführten numerischen Analysen hinsichtlich des Einflusses der Zugringe auf das Biegetragverhalten des Systems. Unter hohen Lasten kam es bei SP2 zu einer lokalen muldenartigen Verformung, die eine starke Rissbildung mit großen Rissbreiten in Plattenmitte hervorrief.

Die Analyse der Stahlspannungen zeigt, dass die verschiedenen Konstruktionen A und B der Platten SP2 und SP3 unterschiedliche Spannungsverteilungen in den radial angeordneten Bewehrungsstäben hervorrufen. Die größten Stahldehnungen treten jedoch bei beiden Konstruktionsarten in den Zugringen und in den tangentialen Bewehrungsbereichen auf. Die normative Streckgrenze des Betonstahls ($f_y = 500 \text{ N/mm}^2$) wird als erstes beim Bewehrungsstahl der Referenzplatte bei einer Last von 340 kN erreicht. Im Vergleich dazu erreicht der Bewehrungsstahl der Versuchsplatten SP2 und SP3 die Streckgrenze bei einer Belastung von 390 kN bzw. 350 kN .

Aus den Unterschieden im Last-Verformungsverhalten wird deutlich, dass der Querschnitt des Zugrings sowie die Verankerung der radialen Stäbe an der Zugringkonstruktion das Tragverhalten maßgeblich beeinflussen. Es

ist zu berücksichtigen, dass die geringen Verformungen von Platte SP3 (Konstruktion B) auch auf die höheren Betonfestigkeiten zurückzuführen sind.

2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse: Spinnennetzbewehrung

Mittels evolutionärer Optimierung ist es gelungen, eine Bewehrungskonfiguration entsprechend eines Spinnennetzes zu finden, die bei gleichbleibendem Bewehrungsgehalt der Platte ein besseres Tragverhalten aufweist. Das im Optimierungsprozess entwickelte Modell der spinnennetzbewehrten Stahlbetonplatte zeigte in den physikalisch nichtlinearen numerischen Analysen und in den Bauteilversuchen ein verbessertes Biegetragverhalten im Gebrauchslastbereich gegenüber einer konventionell bewehrten Referenzplatte.

Kritisch bei den spinnennetzbewehrten Platten ist die konstruktive Durchbildung des Zugringes, der die Radialspannungen aufnimmt. Die Versuche haben gezeigt, dass hier weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

3 Bionische Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite

Die Untersuchung der Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite wurde zuerst basierend auf dem natürlichen Vorbild der Profilierung analog zur Blattunterseite der Riesenseerose durchgeführt. Die Riesenseerose ist eine sehr tragfähige, natürliche Konstruktion, die durch ihre Profilierungen einen optimalen Materialeinsatz aufweist. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden sowohl Rippenanordnungen neu konzipiert als auch weitere Varianten zur bionischen Querschnittsgestaltung durch die Anordnung gekrümmter Plattenunterseiten zur Optimierung der Tragfähigkeit untersucht.

3.1 Rippenplatten

Rippendecken bieten als Ausführungsvariante im Massivbau die Möglichkeit, den räumlichen

Entwurf flexibel zu gestalten, Material effektiv einzusetzen und gleichzeitig eine filigrane und ansprechende Form zu schaffen. Trotz einiger innovativer Beispiele werden Rippendecken bisher meistens mit rechtwinkligen Rippenstrukturen ausgebildet. Inspiriert von der Blattunterseite der Riesenseerose wurde in dieser Arbeitsphase eine Rippenanordnung für Rippendecken entwickelt, die das Tragverhalten bei vergleichbarem Materialeinsatz verbessert.

3.1.1 Rippenentwicklung

Anhand einer FE-Parameterstudie unter Ansatz linear-elastischen Materialverhaltens wurden verschiedene Rippenanordnungen an Platten mit einer Grundfläche von 5,0 m × 5,0 m untersucht. Eine Verbesserung des Tragverhaltens durch die Anordnung von radialen Rippen mit Querrippen, die unter einem Winkel von 45° zu den Rändern lagen, wurde erreicht.

Im anschließenden Optimierungsprozess (GPCore) wurden die Modelle unter Berücksichtigung der Optimierungsparameter Rippengeometrie (Höhe und Breite), minimale Plattenspiegellhöhe, Rippenanzahl sowie Lage und Form der Querrippen für ein optimiertes Tragverhalten entwickelt. Die Optimierung wurde in zwei Phasen durchgeführt. Nachdem in Phase 1 die radiale Rippengeometrie ausgearbeitet wurde, wurde in Phase 2 die

Anordnung der Querrippen entwickelt. Als Referenzwerte zur Beurteilung der Qualität dienten die Ergebnisse einer konventionellen orthogonalen Rippenplatte (Struktur 7 in Tabelle 2). Als Restriktion wurde eine maximale Plattenhöhe von 35 cm einschließlich der Rippen formuliert.

Die Fitness F der generierten Modelle wurde in Abhängigkeit der Verformung f des Systems sowie des Materialeinsatzes und der Materialkosten von Beton und Betonstahl bewertet. Ein niedriger Zahlenwert steht für eine gute Fitness.

$$F = (V_B \cdot \alpha_B + I_R \cdot \alpha_S) \cdot (1 + (f - 20) / 100) / 100$$

- Mit: V_B Betonvolumen [m³]
- I_R Rippenlänge [m²] (berücksichtigt den unterschiedlichen Bewehrungsanteil)
- f Durchbiegung in Feldmitte [mm]
- α_B Preis/m³ Beton
- α_S Preis/lfd m Betonstahl ($d_s = 10$ mm)

In Tabelle 2 sind die verschiedenen Rippenanordnungen und die berechnete Fitness zusammengefasst. Die Ergebnisse des Optimierungsprozesses bestätigen, dass sich durch den Einsatz von Querrippen – analog zu den Querverstrebungen bei Blättern – das Tragverhalten verbessert. Auf der Basis von Struktur 5 wurde eine Rippenplatte ausgearbeitet und experimentell untersucht [8].

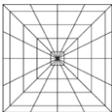
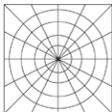
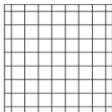
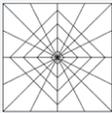
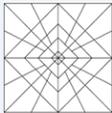
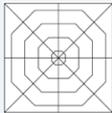
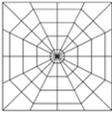
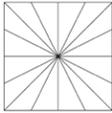
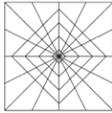
Struktur / Fitness					
1 / 5,54		4 / 5,12		7 / 5,52 (Referenz)	
2 / 4,97		5 / 4,21		8 / 4,42	
3 / 5,14		6 / 4,1		9 / 4,6	

Tabelle 2: Übersicht Rippenstrukturen

Geometrie	Bewehrung	Referenzplatte
<ul style="list-style-type: none"> ■ 4,0 m × 4,0 m Grundfläche ■ 10 cm Rippenbreite ■ 5 cm Rippenhöhe ■ 5 cm Plattenspiegel 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Rippen: 2 Ø 10 ■ Plattenspiegel: Q188 ■ Querkraftbewehrung: - 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 7 cm Dicke ■ Ø 10/20 cm kreuzweise

Platte	Druckfestigkeit f_c [N/mm ²]	Elastizitätsmodul E_c [N/mm ²]	Traglast [kN]	Versagensart
R1	62,0	32810	341	Schubversagen
R2	57,8	31956	340	Schubversagen
Ref	56,4	31923	312	Biegezugversagen

Tabelle 3: Versuchsübersicht Rippenplatten

3.1.2 Experimentelle Untersuchung

Innerhalb der Versuchsreihe wurden zwei Rippenplatten und eine Referenzplatte (Vollplatte) hergestellt und getestet. Tabelle 3 zeigt die Eigenschaften der Probekörper, die Materialeigenschaften des Betons nach 28 Tagen sowie die erreichte Traglast der jeweiligen Prüfkörper. Bild 6 zeigt die Negativschalung der Rippenplatte sowie die Plattenunterseite. Die Lasteinleitung erfolgte als äquivalente Flächenlast über die in Kapitel 2.3 vorgestellte Konstruktion.

Ein Schubriss bei einer radialen Rippe der Prüfkörper R1 und R2 führte zum Lastabfall und damit zum Versagen des Systems. Bild 7 verdeutlicht die Versuchsergebnisse anhand eines Last-Verformungs-Diagramms, Bild 8 zeigt eine Detailaufnahme des Schubrisses.

Neben den verbesserten Tragfähigkeitseigenschaften und einer erhöhten Duktilität, weist die filigrane Leichtbaustruktur durch ihre naturinspirierte Form eine sehr ansprechende Struktur an der Plattenunterseite auf.

3.2 Krümmungen

Zur weiteren Optimierung der Querschnittsgestaltung und des Tragverhaltens wurden drei unterschiedlich an der Plattenunterseite gekrümmte Plattentypen (Kuppelplatte, s. Bild 9) entwickelt und untersucht. Als Optimierungsvariablen dienten der Stich, die Art der Krümmung und die Plattenhöhe. Plattentyp 1 ist über eine Krümmung, die bis zum Plattenrand verläuft, definiert. Bei Plattentyp 2 ist der Krümmungsradius an den beiden Plattendiagonalen orientiert (zwei Krümmungsrichtungen). Im Gegensatz zu den



Bild 6: Bewehrte Negativschalung der Rippenplatte (links) und Probekörper nach dem Versuch (rechts)

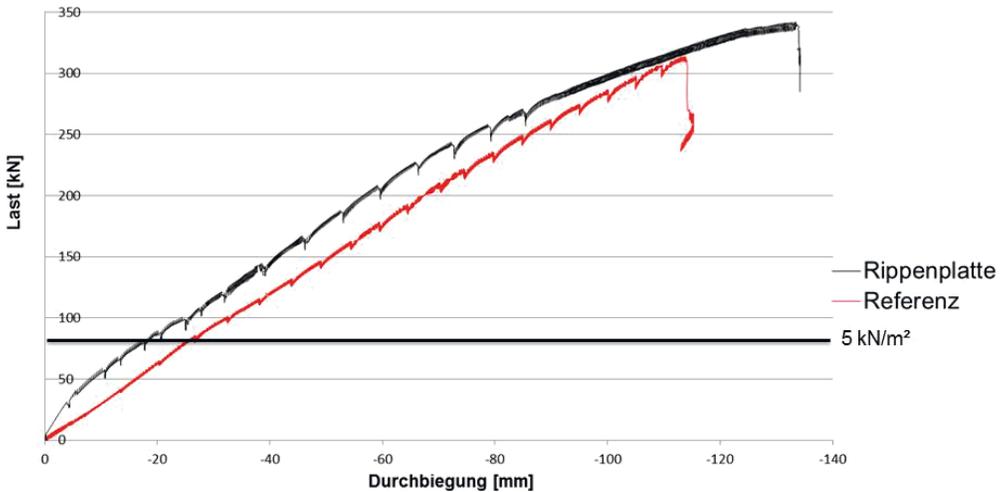


Bild 7: Last-Verformungs-Diagramm: experimentelle Untersuchungen: Rippenplatten R1 und R2, Referenzplatte



Bild 8: Versagen durch Schubrissbildung

anderen Platten hat Plattentyp 3 eine einfach gewölbte Krümmung über die Plattendiagonale.

Für die numerischen Untersuchungen wurde als Basis eine quadratische Grundfläche der Platten von 7,5 m × 7,5 m gewählt. Es wurden Festigkeitseigenschaften des Normbetons C25/30 angesetzt. Die Bewehrungsführung wurde in drei Varianten getestet: a) Ringbewehrung (4 Ø 10 mm), b) äquivalente Bewehrung der Referenzplatte

(kreuzweise Ø 14 mm/15 cm) als Ring- und Meridianbewehrung und c) unbewehrt. Die Kuppelplatten bzw. Referenzplatten wurden sowohl mit einer Randeinspannung als auch mit einer horizontal unverschieblichen Lagerung modelliert.

Ergebnisse der FE-Simulationen

In Bild 10 ist die Beeinflussung des Tragverhaltens durch Krümmungen auf der Plattenunterseite dargestellt. Die entwickelten Kuppelplattentypen weisen unterschiedliche Steifigkeiten bei gleichen Stichhöhen und gleichen Mindestdicken auf. Die Kuppelplattentypen 1 und 3 zeigen hierbei das beste Tragverhalten.

Weiterhin wurde eine Kuppelplatte des Typs 3 so dimensioniert, dass das Betonvolumen dem einer konventionellen Vollplatte mit einer Plattenhöhe von 27 cm entspricht (15 m³). Die Kuppelplatte hatte einen Stich von 30 cm und in Feldmitte eine Plattenhöhe von 10 cm. Die

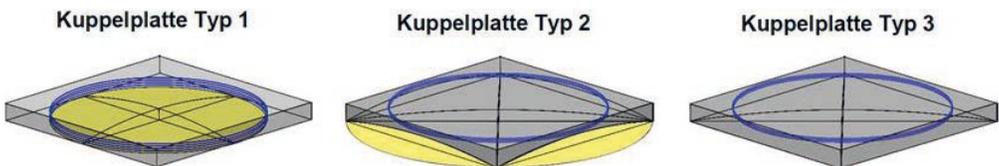


Bild 9: Übersicht der Kuppelplattentypen, von links nach rechts: Typ 1, Typ2, Typ 3

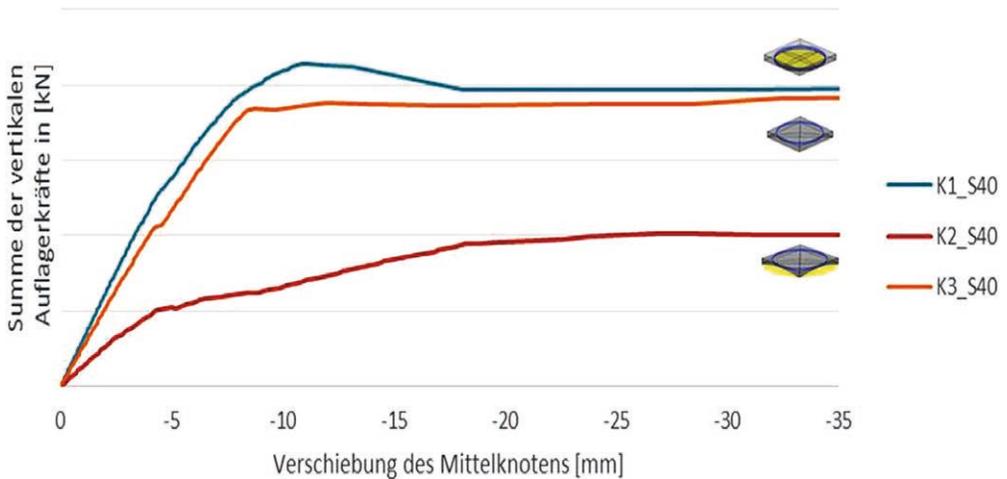


Bild 10: Einfluss der Krümmung auf das Tragverhalten

Bewehrungsmenge betrug jeweils $10,26 \text{ cm}^2/\text{m}$. Bei dieser entwickelten Kuppelplatte ist eine Traglaststeigerung von etwa 60 % zu erwarten. Der Lastabtrag erfolgt größtenteils über einen Druckbogen. Somit werden die auftretenden Momentenbeanspruchungen geringer als bei konventionellen Platten. Neben den positiven Tragfähigkeitseigenschaften muss bei dieser Konstruktionsart beachtet werden, dass die abtreibenden Lagerkräfte zu vergleichsweise hohen Horizontalkräften führen, die entweder durch Widerlager aufgenommen oder durch eine konstruktive Rückverankerung im System gehalten werden müssen.

3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse: Bionische Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite

Die numerischen und experimentellen Untersuchungen an den bionischen Rippenplatten zeigten, dass durch eine sinnvolle naturinspirierte Anordnung der Rippenstruktur eine sehr gute Tragfähigkeit der Platte erzielt werden kann. Die Rippenplatten versagten jeweils nach Entstehung eines Schubrisses.

Die numerischen Untersuchungen der an der Plattenunterseite gekrümmten Platten zeigten, dass die Tragfähigkeit gegenüber einer Refe-

renzplatte bei gleichem Betonvolumen und gleicher Bewehrungsmenge erhöht ist. Dies wird vor allem durch die Änderung des Tragprinzips (Druckbogen) erzielt.

4 Einfluss von Hohlkörperformen und -anordnungen auf das Tragverhalten

Ausgehend von den bekannten Hohlkörperstrukturen für biaxiale Hohlkörperdecken [9] wurde in dieser Arbeitsphase eine Optimierung der Hohlkörperanordnungen und -formen untersucht. Bei den in der Baupraxis verwendeten Hohlkörperanordnungen kann eine Materialersparnis von bis zu 35 % erzielt werden. Der Einsatz von Verdrängungskörpern führt jedoch zu einer reduzierten Querkrafttragfähigkeit der Hohlkörperdecken, diese liegt bei etwa 60 % einer Vollplatte [9].

Das Ziel dieser Arbeitsphase ist die Untersuchung des Einsatzes unterschiedlichster Hohlkörperformen und Hohlkörperanordnungen sowohl zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit als auch zur weiteren Materialersparnis. Als Untersuchungsmethode zur Analyse der verschiedensten Modelle wurden im Rahmen des Forschungsprojekts physikalisch nichtlineare FE-Berechnungen eingesetzt.

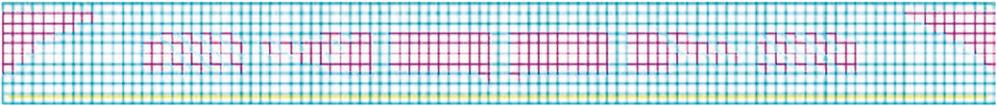


Bild 11: Tragstruktur nach der Anwendung des Rücksetzverfahrens

Ein auf dem Rücksetzverfahren basierender Optimierungsprozess entwickelte über mehrere Optimierungsintervalle eine Tragstruktur mit steifigkeitsfreien Bereichen. Hierbei wurde ausgetestet, welche Bereiche keinen signifikanten Einfluss (Hohlkörperbereich) auf die Verformung des Systems nehmen [10]. In Bild 11 sind die steifigkeitsfreien Bereiche in violett dargestellt.

4.1 FE-Vergleichsstudie unter Einzellast und Flächenlast

Für den Einsatz in Stahlbetonplatten bieten sich verschiedene geometrische Formen als Verdrängungskörper an, bspw. Kugeln oder Würfel. In der numerischen Vergleichsstudie wurde eine Vielzahl von Modellen mit unterschiedlichen Hohlkörperformen und -anordnungen generiert, berechnet und anschließend analysiert. Das Tragverhalten der Modelle ($h = 0,35 \text{ m}$) wur-

de unter einer auflagnahen Einzellast (Plattengrundfläche $5 \times 5 \text{ m}$) und einer Flächenlast (Plattengrundfläche $7 \times 7 \text{ m}$) untersucht. Der Biegebewehrungsquerschnitt betrug bei allen Platten $7,85 \text{ cm}^2/\text{m}$.

4.1.1 Querkrafttragverhalten

Für die numerischen Untersuchungen zum Querkrafttragverhalten wurde eine Einzellast in einem a/h -Verhältnis von 1,5 aufgebracht. Zunächst wurde der Einfluss bei sehr starker Betonvolumenreduktion (knapp 60 %) mittels würfelförmigen Hohlkörpern (WUHK-32) verglichen mit dem von würfel- und kugelförmigen Hohlkörpern (KUHK-32 und WUHK-25,8) mit einer Ersparnis von etwa 30 %.

Bild 12 zeigt, dass durch die sehr großen Würfel das Tragverhalten erwartungsgemäß sehr stark geschwächt wird. Dies ist insbesondere darauf

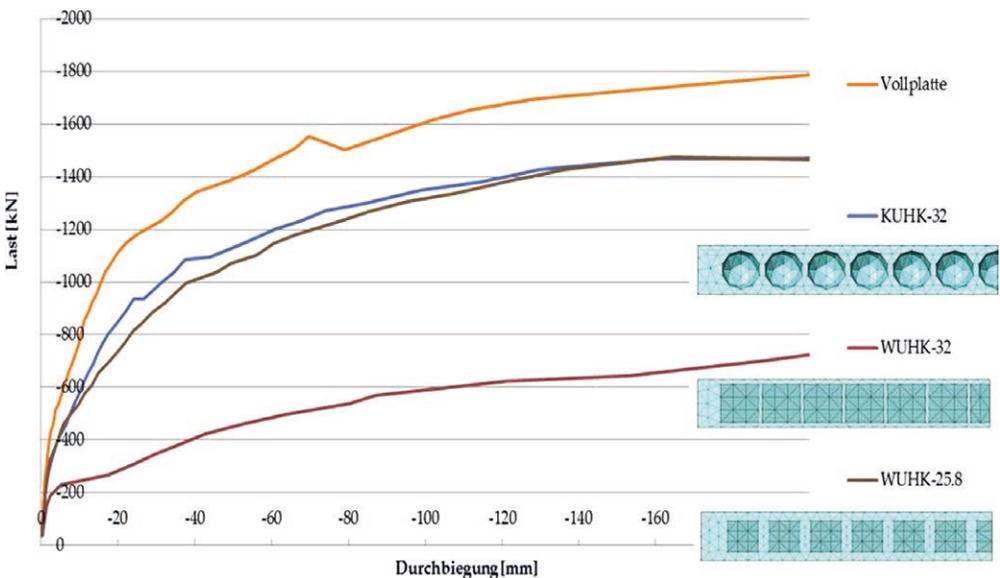


Bild 12: Tragverhalten unter einer auflagnahen Einzellast

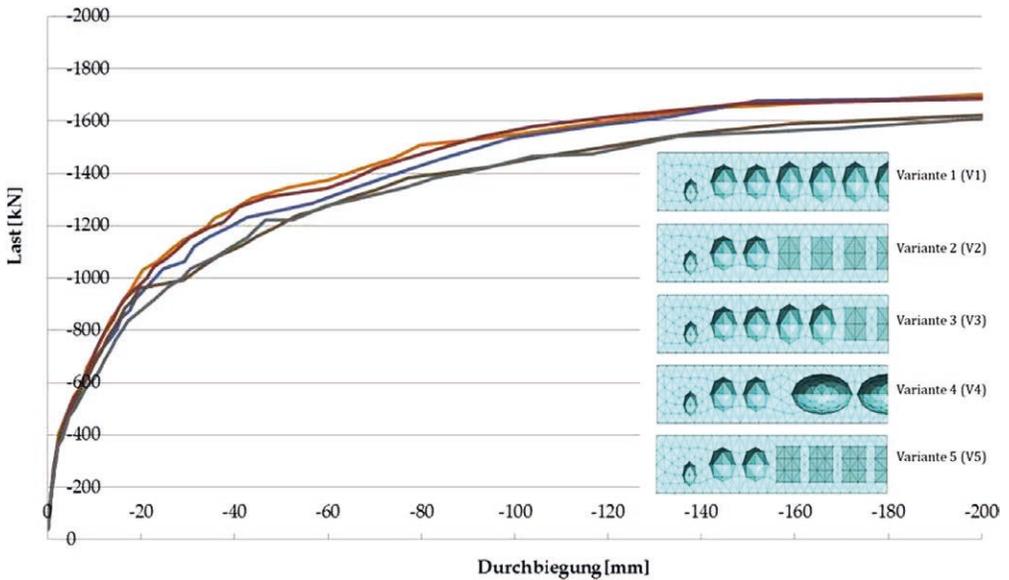


Bild 13: Varianten 1–5 aus der Vergleichsstudie mit einer Betonersparnis von 15 %

zurückzuführen, dass sich die Druckstrebe nur sehr gering bzw. sehr schlecht ausbilden konnte.

Dieser Extremfall wurde im weiteren Simulationsverlauf herunterskaliert, so dass sich bei den folgenden Modellen eine Druckstrebe besser ausbilden konnte. In Bild 13 sind fünf Varianten mit unterschiedlichen Formen und Anordnungen dargestellt. Der Mittelpunktabstand der Hohlkörper beträgt 35 cm bzw. bei den sehr breiten Formen 70 cm. Die Ergebnisse zeigen nur geringe Einflüsse im Tragverhalten auf, so dass durch die Analysen keine eindeutige Anordnung oder Hohlkörperform zur Verbesserung des Querkrafttragverhaltens identifiziert werden konnte.

4.1.2 Biegetragverhalten

Die Hohlkörperanordnungen (Varianten 1–5) weisen unter einer Flächenlast keine nennenswerten Tragfähigkeitsverluste auf. Erst bei einer signifikanten Vergrößerung der Hohlkörper kommt es zu Tragfähigkeitsverlusten infolge des gestörten Kraftflusses in der Druckzone, Bild 14.

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse zusammen. Zur Beschreibung des Wirkungsgrades der berechneten Platten, wurde die Materialausnutzung (Flächenlast pro m^3 Beton) der Platten bei einer Verformung von 50 mm verglichen. Die besten Ergebnisse wurden mit kugelförmigen und würfelförmigen Hohlkörpern erzielt. Eine signifikante Verbesserung des Tragverhaltens konnte jedoch nicht erreicht werden.

4.2 Zusammenfassung der Ergebnisse: Hohlkörperform und -anordnung

Bei der Untersuchung des Querkrafttragverhaltens zeigten die Ergebnisse der FE-Analysen, dass sich die Traglast gegenüber der Traglast einer vergleichbaren Vollplatte stark verringert. Dies ließ sich durch keine der Varianten wesentlich verbessern. Erhebliche Tragfähigkeitsverluste wurden jedoch durch die Anordnung sehr großer würfelförmiger Strukturen nachgewiesen. In der zweiten Untersuchungsreihe wurden Platten unter einer Flächenlast analysiert. In den Ergebnissen sind keine großen Beeinflussungen des Tragverhaltens an den jeweiligen Platten mit unterschiedlichen Hohlkörperformen erkennbar. Einzig durch die Anordnung

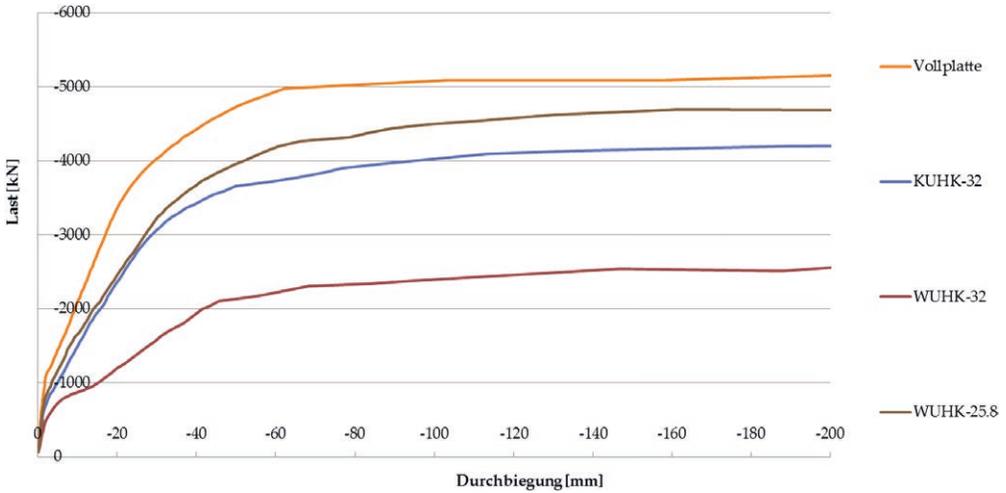


Bild 14: Tragverhalten unter einer Flächenbelastung

	Kugel	Ellipsoid	Zylinder	Würfel	Torus	Ei	Referenz
Flächenlast [kN/m ²]	14,5	15,2	14	13,5	14,2	15,5	14,2
Hohlkörperhöhe [cm]	30	15	20	20	8	23	-
Betonvolumen [m ³]	3,14	3,89	3,48	2,94	3,63	4,07	3,5
Ersparnis [%]	26,8	9,3	18,8	31,4	15,3	5,2	18,4
Materialausnutzung [kN/m ² /m ³]	4,62	3,91	4,02	4,59	3,91	3,81	4,06

Tabelle 4: Lastniveau ausgewählter Hohlkörpermodelle bei 50 mm Verformung unter einer Flächenlast

sehr hoher Hohlkörper wird das Tragverhalten der Platten negativ beeinflusst.

5 Hybridssysteme

In Anlehnung an die biologische Wachstumsregel wurde in dieser Forschungsphase geprüft, welchen Einfluss Materialvariationen (Einsatz verschiedener Betonfestigkeiten) auf das Tragverhalten haben. Durch einen gradierten Aufbau einer Betonkonstruktion mit dem Einsatz eines höherfesten Betons in der Druckzone wird das Bauteil filigraner und gleichzeitig tragfähiger.

Am IfM wurden bereits erfolgreich Kleinversuche zur Untersuchung der Verbundfugen von

gradierten Bauteilen durchgeführt [11]. Durch eine geeignete Betonzusammensetzung, insbesondere durch den Einsatz von Zusatzstoffen, konnte eine erhöhte Fugentragfähigkeit gegenüber bisher bekannten Ergebnissen erzielt werden. Diese Erkenntnisse können für die Entwicklung eines gradierten Betonbauteils genutzt werden.

Die spinnennetzbewehrte Platte sowie eine Rippenplatte wurden als Betonhybridplatte einer FE-Analyse unterzogen. Die spinnennetzbewehrte Platte wurde im oberen Plattenbereich (5 cm ab Plattenoberkante) mit einem hochfesten Beton C80/95 modelliert. Die Rippenplatte wurde ebenfalls mit einem Plattenspiegel aus C80/95 numerisch untersucht. Als Normalbeton wurde für beide Platten ein C25/30 angesetzt.

Die jeweilige Bewehrungsmenge entsprach den Angaben der vorherigen Untersuchungen (s. Kapitel 3.1 und 4.1.2.). Die numerische Simulation zeigte, dass bei der gradierten spinnennetzbewehrten Platte eine Traglaststeigerung von knapp 26 % möglich ist. Bei der gradierten Rippenplatte wurde in der FE-Simulation die Traglast sogar um etwa 100 % gesteigert, Bild 15.

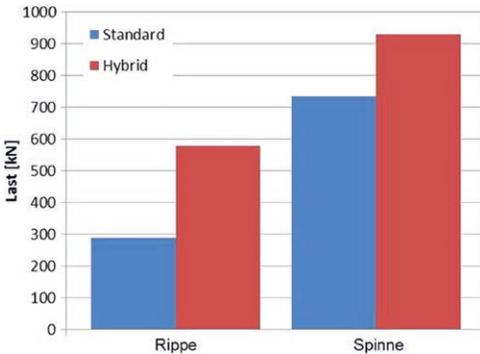


Bild 15: Traglaststeigerung der untersuchten Betonhybridstrukturen

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden unter Einsatz von Optimierungsverfahren kombiniert mit physikalisch-nichtlinearen FE-Analysen und Bauteilversuchen drei unabhängige bionische Strukturen entwickelt. Diese innovativen Stahlbetonplatten besitzen durch die Adaption natürlicher Strukturen einen bionischen Kraftfluss, der das Tragverhalten gegenüber konventionellen Plattensystemen verändert. Mit den durchgeführten physikalisch nichtlinearen FE-Berechnungen konnte das Last-Verformungs-Verhalten der entwickelten Strukturen wirklichkeitsnah abgebildet werden.

Durch die Entwicklung einer hauptspannungsorientierten Bewehrungsanordnung auf der Basis des Radspinnennetzes wurde das Plattentragverhalten positiv beeinflusst. Die Biegesteifigkeit der Platten konnte auf diese Weise verbessert werden. Zusätzlich erhöhte sich die Duktilität der Struktur. Maßgebend für das

Tragverhalten ist die Dimensionierung und Ausbildung des Zugrings.

Die Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite wurde hinsichtlich einer bionischen Rippenstruktur ausgearbeitet und experimentell untersucht. Es zeigte sich, dass die Biegesteifigkeit erhöht und die Tragfähigkeit gegenüber einer konventionellen Stahlbetonplatte gesteigert wird.

Eine weitere Möglichkeit, den Kraftfluss zu steuern und das Tragverhalten positiv zu beeinflussen, konnte durch die Anordnung von Krümmungen an der Plattenunterseite erzielt werden. Der Parabelstich und der Radius stellen bei dieser Struktur die maßgebenden Parameter zur Verbesserung der Steifigkeit dar. Durch die Gewölbewirkung (Druckbogen) entsteht eine stark druckbeanspruchbare Tragstruktur.

In der dritten Arbeitsphase wurde der Einfluss von Hohlkörpern auf das Tragverhalten analysiert. Eine wesentliche Verbesserung des Tragverhaltens bei auflagnahen Lasten konnte nicht erzielt werden. Es zeigte sich aber, dass abgerundete Hohlkörperformen einen geringeren negativen Einfluss auf das Tragverhalten nehmen als große würfelförmige Strukturen.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens haben gezeigt, dass mit der Entwicklung bionischer Plattenstrukturen das Tragverhalten von Stahlbetonplatten positiv beeinflusst werden kann. Es ergeben sich jedoch weitere Fragestellungen für die Zukunft. Die Grundlagen wurden durch die Arbeiten in dem vorliegenden Forschungsprojekt geschaffen.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198421558 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Holland, J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975
- [2] Schnellenbach-Held, M.; Pullmann, T.: *Genetische Optimierung von Tragstrukturen*. Bauingenieur 86 (2011) 9, S. 390–399
- [3] DIANA User's Manual, Release 9.6, TNO, Delft, 10/2014
- [4] Hordijk, D. A.: *Local Approach to Fatigue of Concrete*. PhD thesis, Delft University of Technology, 1991
- [5] Thorenfeldt, E.; Tomaszewicz, A.; Jensen, J. J.: *Mechanical Properties of High-Strength Concrete and applications in design*. In: Proc. of the 1st Int. Symp. on Utilization of High-Strength Concrete, 15.–18.06.1987 in Stavanger (Norwegen), Trondheim: Tapir, 1987, S. 149–159
- [6] Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: *Bionic Optimization of Concrete Structures by Evolutionary Algorithms*. Structural Engineering International 24 (2014) 2, S. 229–235
- [7] Habersaat, J.-E.: *Innovative Bewehrungsanordnung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes* In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): *Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium*, 07./08.11.2013 in Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 35–40
- [8] Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: *Bionic Structures for Innovative Concrete Slabs*. In: *Elegance in Structures – Proc. of IABSE Conf. Nara*, 13.–15.05.2015 in Nara (Japan), 2015, Book of abstracts: S. 64/65, Langfassung digital, 8 S.
- [9] Schnellenbach-Held, M.: *Tragverhalten zweiachsiger Hohlkörperdecken*. Der Prüfenieur 35 (2009), S. 36–46
- [10] Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: *Leichte Platten aus Beton als bionische Struktur*. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): *Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1*, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 102–111 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171410>
- [11] Fickler, S.: *Verbundfuge zwischen Brückenüberbau und Verankerungskörper*. Tagungsband zum Young Engineers Colloquium YEC2014 of IABSE, 10.03.2014 in Dresden, 2014, S. 4/5

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder 1, 11: Irina Schmidt
- Bilder 2–8, 15: Jan-Eric Habersaat
- Bilder 9, 10: Marc Misera
- Bilder 12–14: Seung-Wook Yoo

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Leichte Platten aus Beton mit biaxialem Lastabtrag als bionische Strukturen

Lightweight concrete slabs with biaxial load-bearing as bionic structures

Antragstellerin Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held Institutsleiterin Institute's chair
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	SCHN 639/13 (Projektnummer Project number: 198421558)
Adresse Address:	Universität Duisburg-Essen, Institut für Massivbau, Universitätsstr. 15, 45141 Essen
Kontakt Contact:	+49 201 183 2767 m.schnellenbach-held@uni-due.de massivbau@uni-due.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.10.2011–30.09.2015
Team Team:	Jan-Eric Habersaat

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: Bionik im Betonbau – Natürliche Strukturen und Konstruktionen als Inspiration für den Betonbau. Bauingenieur 88 (2013) 5, S. 205–213
- Habersaat, J.-E.: Innovative Bewehrungsanordnung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07./08.11.2013 an der Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2013, S. 35–40
- Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: Bionic Optimization of Concrete Structures by Evolutionary Algorithms. Structural Engineering International 24 (2014) 2, S. 229–235
- Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: Leichte Platten aus Beton als bionische Struktur. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 102–111 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171410>
- Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: Bionic Structures for Innovative Concrete Slabs. In: Elegance in Structures – Proc. of IABSE Conf. Nara, 13.–15.05.2015 in Nara (Japan), 2015, Book of abstracts: S. 64–65, Langfassung digital, 8 S.

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Diplom- und Masterarbeiten | Diploma and Master's Theses

- Schmidt, I.: Optimierung von Stahlbetonbauteilen unter Einsatz Evolutionärer Algorithmen. 2012
- Sichma, L.: Optimierung des Kraftflusses mittels Querschnittsgestaltung und unter Verwendung von Betonhybridsystemen. 2012
- Miedzinski, G.: Experimentelle Untersuchung von biaxialen Stahlbetonplatten mit einer nichtorthogonalen Bewehrungsanordnung. 2013
- Thiesmann, S.: Experimentelle Untersuchung von biaxialen Stahlbetonplatten mit einer spinnennetzartigen Bewehrungsanordnung. 2013
- Seung-Wook, Y.: Eine numerische Vergleichsstudie zum Einfluss unterschiedlicher Hohlkörpergeometrien und -anordnungen auf das Tragverhalten von biaxialen Stahlbetonplatten. 2014

- Misera, M. A.: Untersuchung zum Einfluss von Krümmungen auf das Tragverhalten von biaxial gespannten Stahlbetonplatten. 2015
- Sathyakumar, A.: Development of an innovative configuration of hollow bodies for an optimized load-bearing behavior of reinforced concrete slabs regarding the nonlinear material behavior. 2015

Bachelorarbeit | Bachelor's Thesis

- Durski, P.: Auswertung experimenteller Untersuchungen zum Einfluss zweier unterschiedlicher Zugringkonstruktionen auf das Tragverhalten von innovativ bewehrten Stahlbetonplatten. 2015

Abfallfreie Herstellung von Betonbauteilen durch die Verwendung einer gefrorenen Sandschalung | Waste-free production of concrete components by means of a frozen sand formwork

- ▶ Oliver Gericke, Daria Kovaleva, Walter Haase, Werner Sobek
- ▶ Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart

1 Einführung

Durch computergestützte Methoden zur Formfindung und Strukturoptimierung können heute Betonstrukturen entwickelt werden, die optimal an ihre jeweilige statische Aufgabe angepasst sind. Mit dem reduzierten Material- und Energieverbrauch der optimierten Struktur geht jedoch zumeist eine Geometrie einher, deren Herstellung material- und arbeitsintensiver Schalungstechniken bedarf. Auch vor dem Hintergrund einer absehbaren Knappheit von für die Bauindustrie wichtigen Materialien hat Werner Sobek schon 1999 mit der Triple-Zero®-Maxime – *zero fossil based energy, zero waste, zero emission* – gefordert, in Bauprozessen idealerweise nur recycelbare Materialien zu verwenden [1]. Dem steht die Forderung gegenüber, dass eine Schalungstechnik die Formgebung, Konstruktion oder Herstellung von optimierten, insbesondere geometrisch komplexen Bauteilen in keiner Weise einschränken sollte.

Ein möglicher Ansatz, der beide Forderungen weitgehend erfüllt, ist die Verwendung von Erdreich als Schalungsmaterial für Betonschalen: Ein Hügel wird aufgeschüttet und angeformt und dann mit Beton übergossen. Nach dem Aushärten kann die so entstandene Schale durch Abgraben des Erdreichs ausgeschalt werden. Diese Methode wurde bereits 1955 beim Bau des 66,3 m weit spannenden Albuquerque Civic Auditorium angewandt [2]. Heinz Isler, der diese Methode in [3] als den *frei geformten Hügel*

1 Introduction

Today, computer-aided methods for form-finding and structural optimization can be used to develop concrete structures that are optimally adapted to their structural requirements. However, the reduced material and energy consumption of the optimized concrete structure usually goes hand in hand with complex geometry whose production usually requires material- and labour-intensive formwork techniques. With a foreseeable scarcity of essential construction materials in mind, Werner Sobek back in 1999 coined the Triple-Zero® concept – zero fossil-based energy, zero emission, zero waste – which demands that only recyclable materials should be used in construction processes [1]. Thus, there is a demand for waste-free formwork technology that simultaneously should in no way restrict the shaping, design or manufacture of optimised, and therefore, geometrically complex components.

One possible approach that largely satisfies both requirements is the use of soil as formwork material for concrete shells: a hill is heaped up, shaped and then covered with concrete. After hardening, the resulting formwork can be removed by digging off the soil. This method was used as early as 1955 in the construction of the Albuquerque Civic Auditorium (66.3 m) [2]. Heinz Isler, who presented this method in [3] as the freely formed hill (Fig. 1), attributed to it the greatest freedom for the design of shells. More



Bild 1: Der frei geformte Hügel als Schalung für einen Beton-Iglu | **Fig. 1:** The freely shaped hill as formwork for a concrete igloo



Bild 2: Teshima Art Museum, 2010; die Schalung aus Sand wurde durch die elliptische Öffnung ausgehoben | **Fig. 2:** Teshima Art Museum, 2010; the formwork made of sand was excavated through the elliptic opening

vorstellte (Bild 1), maß ihr die größte Freiheit für den Entwurf von Schalen bei. In jüngerer Vergangenheit wurde eine Schalung aus Erdrich beim Bau des Kunstmuseums in Teshima (Bild 2) erfolgreich in großem Maßstab angewandt [4]. Das Schalungsmaterial für die bis zu 60,2 m weit spannende Schale konnte auch hier vollständig rückgewonnen werden.

Im Rahmen des Projekts *Automatisierte adaptive Schalungsmethode zur Herstellung von Betonbauteilen mit gekrümmten Oberflächen* wurde am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) der Universität Stuttgart die Schalungsmethode der gefrorenen Sandschalung entwickelt. Diese Methode vereint die Vorteile des Schalungsmaterials Sand mit der hohen Präzision CNC-gesteuerter Fertigungsmethoden. Die Formstabilität der Schalung während der Bearbeitung und der Betonage wird gewährleistet, indem der Sand mit Wasser gemischt und anschließend eingefroren wird. Aufgrund des festen Zustands während der Bearbeitung und des granularen Verhaltens nach abschließendem Auftauen des Sands können auch komplexe, feingliedrige Betonbauteile hergestellt und ohne großen Aufwand ausgeschalt werden. Der Sand kann beliebig oft wiederverwendet werden.

Anschließend an [5] fasst der vorliegende Beitrag die Forschungen zu der Schalungsmethode des gefrorenen Sands im DFG-Schwerpunktprogramm 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ zusammen.

recently, an earth formwork was successfully used on a large scale in the construction of the Art Museum in Teshima (Fig. 2) [4]. The formwork material for the up to 60.2 m wide formwork could also be completely regained here.

Within the framework of the project *Automated adaptive formwork method for the production of concrete components with curved surfaces*, the frozen sand formwork method was developed at the Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK) at the University of Stuttgart. This formwork method combines the advantages of the formwork material sand with the high precision of CNC-controlled production methods. The geometrical stability of the formwork during processing and concreting is ensured by mixing the sand with water and then freezing it. Due to the solid-state during processing and the granular behaviour after final thawing of the sand, even complex and delicate concrete components can be produced and demoulded without great effort. The sand can be reused virtually indefinitely.

Following [5], this article summarises the research on Frozen Sand Formwork Method in the framework of DFG Priority Programme 1542 “Concrete Light”.

2 Herstellung gefrorener Sand-schalungen

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte zur Herstellung einer mehrteiligen Schalung aus *gefrorenem Sand*, nämlich die Herstellung des Werkstücks, die formgebende Bearbeitung, das Zusammensetzen mehrerer Schalungsteile zu einer Schalung und die Betonage, beschrieben (Bild 3). Untersuchungen zu den dargelegten Fertigungsparametern sind in ausführlicher Fassung in [4], [5] veröffentlicht.

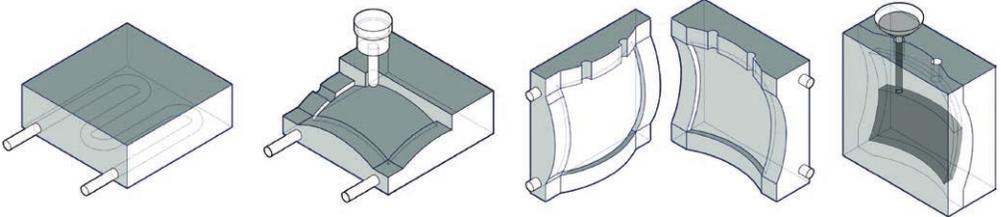


Bild 3: Grundsätzliche Schritte zur Herstellung einer Schalung aus gefrorenem Sand (v. l. n. r.): Herstellung und Einfrieren eines Werkstücks aus einem Sand-Wasser-Gemisch, formgebende Bearbeitung, Zusammensetzen mehrere Schalungsteile, Betonage | **Fig. 3:** Principal steps of the production process of frozen sand formwork (from left to right): production and freezing of a raw geometry made from a mixture of sand and water, milling, assembly of multiple formwork parts, casting of concrete

Das Werkstück zur Schalungsherstellung wird aus einem Gemisch aus Wasser und Sand hergestellt. Der Sand mit einer Sieblinie von 0,063 mm bis 0,315 mm wird mit dem Wasser in einem Gewichtsverhältnis von 1 : 0,15 vermischt. Die Mischung wird in einer Form mit eingebetteten Kupferrohren und einem angeschlossenen Kühlkreislauf bis zu einer Oberflächentemperatur von $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgekühlt. Während der Bearbeitung muss das Werkstück *in situ* kontinuierlich weiter gekühlt werden.

Die formgebende Bearbeitung des Werkstücks erfolgt mittels CNC-Fräsen in zwei Arbeitsschritten. Zunächst findet im *Schruppgang* unter großer Materialabnahme eine Annäherung an die angestrebte Fertigteilgeometrie statt. Im folgenden *Schlichtgang* wird die Geometrie mit feineren Fräsern und höherer Präzision herausgearbeitet (Bild 4). Die Parameter der Bearbeitung orientieren sich dabei hauptsächlich an einer möglichst kurzen Bearbeitungsdauer, einer möglichst hohen Maßhaltigkeit der Schalungsgeometrie sowie einer möglichst hohen

2 Production of frozen sand formwork

In the following, the individual steps for the production of a multi-part formwork from frozen sand are described, namely the production of the workpiece, the shaping processing, the assembly of several formwork parts into one formwork and the concreting (Fig. 3). Detailed investigations of described production parameters are published in [4] and [5].

The workpiece for formwork production is made from a mixture of water and sand. The sand with grain sizes from 0.063 mm to 0.315 mm is mixed with water in a weight ratio of 1 : 0.15. The mixture is then cooled down to a surface temperature of $-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in a mould with embedded copper pipes and a connected cooling circuit. During machining, the workpiece is continuously cooled *in situ*.

The machining of the workpiece to the final geometry is carried out by CNC-milling in two steps. First, an approximation to the desired target geometry takes place in the roughing step with a large amount of excavated material. In the following finishing step, the geometry is worked out with finer milling cutters and higher precision (Fig. 4). The machining parameters are mainly oriented towards the shortest possible machining time combined with the highest possible dimensional accuracy of the formwork geometry and the longest possible tool life of the milling cutters. Previous investigations ([5]) have shown that single-edged solid carbide

Standzeit der Fräser. In vorhergehenden Untersuchungen konnte gezeigt werden [5], dass einschneidige Fräser aus Vollhartmetall (VHM) die geringste Abnutzung bei der Bearbeitung des abrasiven Materials Sand aufweisen.

Wenn die Schalung aus mehreren Einzelteilen zusammengesetzt werden soll (Bild 5), so werden diese zunächst einzeln bei konstanter Kühlung aller Teile hergestellt. Unmittelbar vor dem Einbringen des Betons wird die Kühlung deaktiviert. Der Beton wird anschließend direkt in die gefrorene Schalung eingebracht. Es werden keine Zwischenschichten, beispielsweise aus Formtrennmittel, vorgesehen. Für alle vorgestellten Versuche wurde der Vergussmörtel SikaGrout 551 [6] verwendet, der aufgrund hoher Fließfähigkeit, der feinsandigen Sieblinie (Größtkorn 1 mm) und seiner selbstverdichtenden Eigenschaften ausgewählt wurde. Die in diesem Zusammenhang relevanten Eigenschaften und Parameter der verwendeten Betonmischung sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Bei Beginn der Betonage wird die Kühlung deaktiviert. Auch im aufgetauten Zustand behält die Sandschalung dabei ihre äußere Form für



Bild 4: Schalungsgeometrie während des Schlichtgangs der formgebenden Bearbeitung | **Fig. 4:** Formwork geometry during finishing step of the milling process

(VHM) milling cutters have the lowest wear when machining the abrasive material sand.

If the formwork is to be assembled from several individual parts (Fig. 5), these are first produced individually with constant cooling of all parts. Cooling is deactivated immediately before concreting. The concrete is then cast directly into the frozen formwork. No intermediate layers, e.g. mould release agent, are provided. The grouting mortar SikaGrout 551 [6] was used for all the presented tests. It was selected for its high flowability, fine sand grading curve (max-

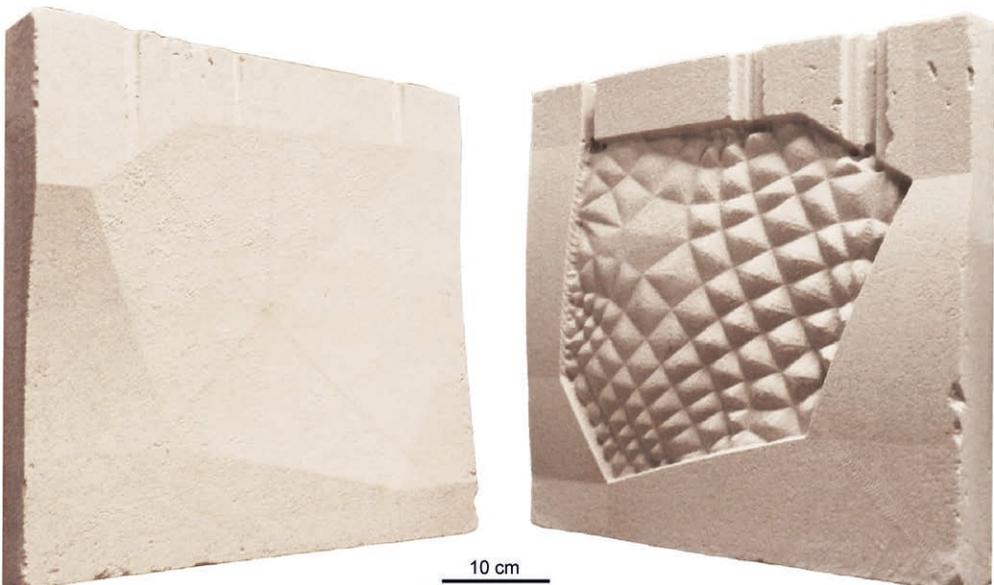


Bild 5: Zwei Teile einer Schalung vor dem Zusammensetzen | **Fig. 5:** Two parts of a formwork before being assembled

SikaGrout 551	
Charakteristische Druckfestigkeit Characteristic compressive strength	Zylinder Cylinder: 50 MPa Würfel Cube: 60 MPa
Frühfestigkeitsklasse gemäß [7] Early strength class acc. to [7]	A (40 MPa nach after 24 h)
Konsistenz gemäß [7] Consistency acc. to [7]	Fließmaßklasse Slump class: f1
Größtkorn Max. aggregate size	1 mm
Zusatzmittel Additives	Fließmittel Superplasticizer: Sika® ViscoCrete®-1020 X (1,5 % des Zementgewichts 1.5 % of the cement weight)
Umgebungsbedingungen beim Anmachen Ambient conditions during mixing	Umgebungstemperatur Ambient temperature: 20 °C Relative Luftfeuchte Relative air humidity: 65 %

Tabelle 1: Eigenschaften von SikaGrout 551 für die Herstellung von Betonbauteilen mit gefrorener Sandschalung [6] | **Table 1:** Properties of SikaGrout 551 for the fabrication of concrete parts with frozen sand formwork [6]

mehrere Tage. Im Allgemeinen werden Bauteile nach 24 Stunden ausgeschalt, wobei der rückgewonnene Sand stets vollständig wiederverwendet werden kann.

3 Untersuchungen

Während in [5] die grundsätzlichen Fertigungsparameter wie die Auswahl geeigneter Fräser und praktikable Verdichtungsmethoden diskutiert wurden, werden im vorliegenden Beitrag die Untersuchungen auf der Bauteilebene wie der Schalungsentwurf und der Einfluss der Schalungstemperatur auf die Eigenschaften des Betons beschrieben. Zusätzlich dazu wird eine Variation der Methode der gefrorenen Sandschalung vorgestellt, mit der feingliedrige räumliche Schalungsgeometrien hergestellt werden können.

3.1 Bauteilumschließende Schalung

Mit dieser Versuchsreihe wurden Fertigungsparameter für die Herstellung einer mehrteiligen Schalung erprobt. Hierbei sollte möglichst das ganze Bauteil beziehungsweise die entsprechende Kavität von gefrorenem Sand umschlossen sein. Eine ausführliche Beschreibung der Versuchsreihe wurde in [8] veröffentlicht.

In einem Entwurfsraum mit den Maßen 450 mm × 450 mm × 100 mm wurden zwei identische flächige Bauteile vorgesehen (Bild 6). Diese wurden mit kleinen Krümmungsradien und

imum grain size 1 mm) and self-compacting properties. The relevant properties and parameters of the concrete mix used in this context are listed in Table 1.

The cooling is deactivated upon casting. Even when thawed, the sand formwork retains its outer shape for several days. In general, components are demoulded after 24 hours at which point the sand is regained and can be completely reused.

3 Investigations

While [5] dealt with fundamental production parameters such as the selection of suitable milling cutters and practicable compaction methods, in this report the investigations at the component level such as the formwork design and the influence of the formwork temperature on the properties of the concrete are described. In addition, a variation of the frozen sand formwork method is presented, which can be used to produce filigree spatial formwork geometries.

3.1 Component-enclosing formwork

This test series was used to test production parameters for the manufacture of a multi-part formwork. If possible, the entire component or the corresponding cavity should be enclosed in frozen sand. A detailed description of the test series was published in [8].

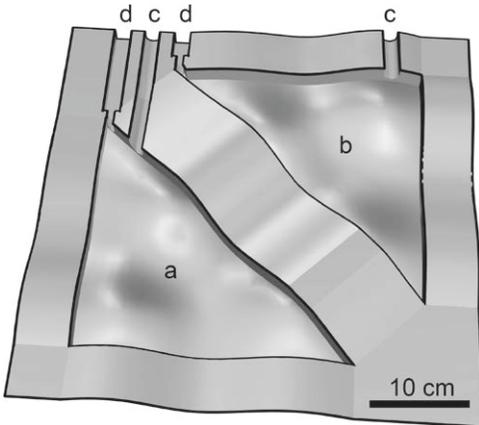


Bild 6: Schalungsgeometrie mit Kavitäten (a, b), Einfüllkanälen (c) und Entlüftungskanälen (d) | **Fig. 6:** Formwork geometry with cavities (a, b), sprues (c), and risers (d)

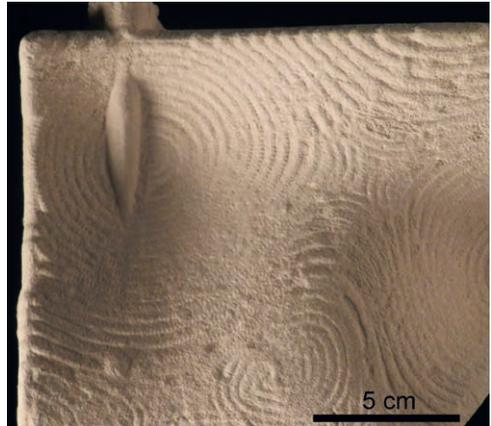


Bild 7: Hergestelltes Bauteil mit Abweichungen von der geplanten Geometrie im Bereich der Einfüllkanäle | **Fig. 7:** Fabricated concrete part with deviations from the planned geometry near the sprues

häufigen Krümmungswechseln entworfen und so in der Schalung angeordnet, dass sie völlig von gefrorenem Sand umschlossen waren. Zum Befüllen wurde ein Angussystem vorgesehen, das aus einem Einfüllkanal für den Beton sowie einem Entlüftungskanal am Hochpunkt der Kavität bestand. Die Schalung bestand aus zwei Teilen, die an einer gekrümmten Kontaktfläche gestoßen wurden. Die unebene Form der Kontaktfläche ermöglichte das passgenaue Platzieren der beiden Schalungsteile gegeneinander ohne Hilfsmittel.

Mit dem Versuch konnte gezeigt werden, dass flächige gekrümmte Bauteile in einer umschließenden Schalung aus gefrorenem Sand mit hoher Formtreue hergestellt werden können. Selbst feingliedrige Teile der Schalungsgeometrie, wie die Spurrillen des Fräasers, blieben während der Herstellung erhalten und wurden durch den Beton abgebildet (Bild 7). Alle Formen wurden ohne das Auftreten von Luft einschüssen komplett aufgefüllt. Nach der Entnahme der Bauteile aus der Schalung konnte das Schalungsmaterial vollständig rückgewonnen und wiederverwendet werden.

Abweichungen von der entworfenen Geometrie konnten nur dort festgestellt werden, wo der Beton während der Betonage an dem gefroren-

In a design space with the dimensions 450 mm × 450 mm × 100 mm, two identical flat components were placed (Fig. 6). These were designed with small radii of curvature and various changes of curvature and arranged in the formwork in such a way that they were completely enclosed by frozen sand. To enable casting, a sprue system consisting of a concrete filling channel and a venting channel at the highest point of the cavity was used. The formwork consisted of two parts which are in contact through a curved contact surface. The uneven shape of the contact surface made it possible to place the two formwork parts exactly against each other without any additional aids.

The test showed that flat curved components can be produced from frozen sand with high dimensional accuracy in an enclosing formwork. Even delicate parts of the formwork geometry, such as the track grooves of the milling cutter, were retained during production and were mapped by the concrete (Fig. 7). All moulds were completely filled without the occurrence of air inclusions. After removing the components from the formwork, the formwork material could be completely recovered and reused.

Deviations from the designed geometry could only be detected where the concrete had flowed

nen Sand entlanggeflossen war. Folgende Punkte sollten daher für den Entwurf von Angussystemen berücksichtigt werden:

- Zuflusskanäle sollten so angeordnet werden, dass beim Befüllen der Schalung kein Beton an den Wänden der Schalung entlangfließt.
- Entlüftungskanäle müssen an jedem lokalen Hochpunkt einer Kavität angeordnet werden.

3.2 Einfluss der Schalungstemperatur

In diesem Versuch wurde der Einfluss der gefrorenen Sandschalung auf die mechanischen Eigenschaften des Betons quantifiziert. In einer Kombination aus zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen wurden die Entwicklung der Druckfestigkeit sowie die des statischen Elastizitätsmoduls für ein Betonalter zwischen 0,5 und 28 Tagen untersucht.

Hierfür erfolgte die Herstellung von 40 mm × 40 mm × 160 mm großen Prismen aus SikaGrout 551 mit drei verschiedenen Methoden:

- 1. Referenz** mittels Stahlschalung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte,
- 2. Sand, kalt** mittels gefrorener Sandschalung ohne Nachbehandlung der Schalung nach der Betonage und
- 3. Sand, erwärmt** mittels gefrorener Sandschalung, die nach Einbringen des Betons auf 20 °C erwärmt wurde.

An den Prismen konnten in Abständen von 1 bis 3 Tagen anhand einer zerstörungsfreien Prüfung mit der Impakt-Resonanz-Methode nach [9] der dynamische Elastizitätsmodul zerstörungsfrei ermittelt und die Druckfestigkeit sowie der statische Elastizitätsmodul abgeschätzt werden. Der Zusammenhang zwischen dynamischem Elastizitätsmodul und der Druckfestigkeit bzw. dem statischen Elastizitätsmodul ist in der Literatur in Form empirischer Gleichungen umfassend dokumentiert [10], [11]. Die Formeln aus der Literatur

along the frozen sand during concreting. The following points should, therefore, be considered for the design of sprue systems:

- Inlet channels should be arranged in such a way that no concrete flows along the walls of the formwork when the formwork is filled.
- Ventilation ducts must be located at all local high points of a cavity.

3.2 Influence of formwork temperature

In this experiment, the influence of the frozen sand formwork on the mechanical properties of the concrete was quantified. In a combination of non-destructive and destructive tests, the development of the compressive strength and the static modulus of elasticity were investigated for a concrete age between 0.5 and 28 days.

For this purpose, prisms with dimensions of 40 mm × 40 mm × 160 mm were manufactured from SikaGrout 551 using three different methods:

- 1. reference:** prisms were cast into steel formwork at 20 °C and 65% relative humidity,
- 2. sand, frozen:** prisms were cast into frozen sand formwork without post-treatment of the formwork after concreting, and
- 3. sand, heated:** prisms were cast into frozen sand formwork that is heated to 20 °C after concreting.

The dynamic modulus of elasticity could be determined non-destructively on the prisms at intervals of 1 to 3 days by means of a non-destructive test with the impact-resonance method according to [9]. From this, the compressive strength as well as the static modulus of elasticity could be estimated. The relationship between the dynamic modulus of elasticity and compressive strength or static modulus of elasticity is comprehensively documented in the literature in the form of empirical equations [10], [11]. The formulas from

wurden für jede der drei Herstellungsmethoden kalibriert, indem an einzelnen Prismen nach der zerstörungsfreien Prüfung zusätzlich der statische Elastizitätsmodul sowie die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390 [12] zerstörend ermittelt wurden. Die Genauigkeit dieser Abschätzung hängt dabei direkt von der Streuung der Festigkeitswerte ab. Die in Bild 8 gezeigten Werte für die Druckfestigkeit und den statischen Elastizitätsmodul wurden mit den kalibrierten empirischen Formeln nach [10], [11] ermittelt.

Die Ergebnisse der Werkstoffprüfung belegen, dass die Verwendung einer gefrorenen Sandschalung die Druckfestigkeit und den Elastizitätsmodul eines derart hergestellten Bauteils negativ beeinflusst. Wenn die Schalung jedoch nach Einbringen des Betons erwärmt wird, können Festigkeit und Steifigkeit erhöht werden. Die Druckfestigkeit aufgrund der erwärmten Schalung übersteigt dabei die der Referenzkörper. Auf den Ergebnissen aufbauend wurde der in Abschnitt 2 vorgestellte Herstellungsansatz um die Erwärmung der Schalung nach der Betonage erweitert.

the literature were calibrated for each of the three manufacturing methods by additionally determining the static modulus of elasticity as well as the compressive strength according to DIN EN 12390 [12] destructively on individual prisms after the non-destructive test. The accuracy of this estimation depends directly on the scatter of the strength values. The values for compressive strength and static modulus of elasticity shown in Fig. 8 were determined using the calibrated empiric formulae according to [10], [11].

The results of the material test show that the use of frozen sand formwork has a negative effect on the compressive strength and modulus of elasticity of a component produced in this way. If, however, the formwork is heated after the concrete has been cast, strength and stiffness can be increased. The compressive strength due to the heated formwork even exceeds that of the reference bodies. Based on the results, the manufacturing approach presented in Section 2 was extended to include heating of the formwork after concreting.

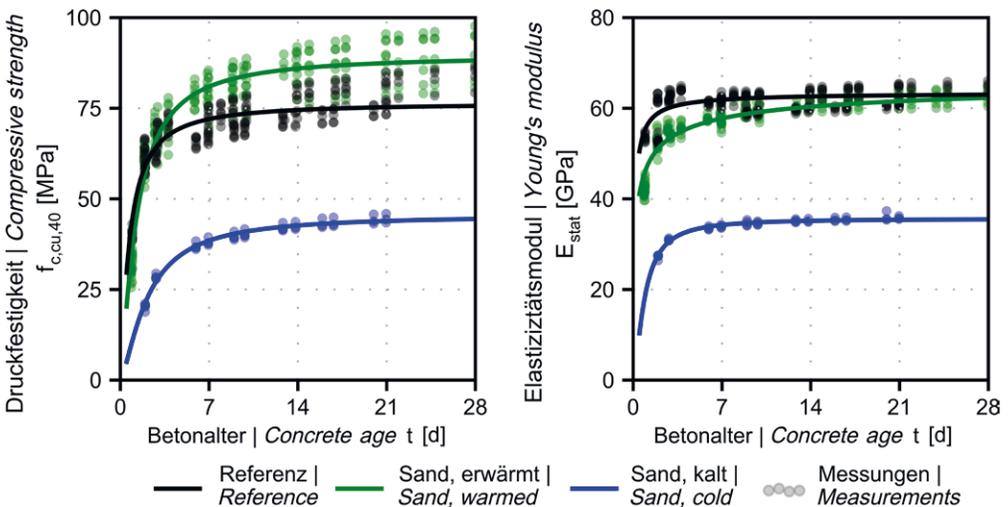


Bild 8: Ergebnisse und Regressionskurven für den Verlauf der Druckfestigkeit (links) und des statischen Elastizitätsmoduls (rechts) in Abhängigkeit zum Betonalter der Proben zwischen 0,5 und 28 Tagen | **Fig. 8:** Results and regression curves for compressive strength (left) and Young's modulus (right) for a concrete age of the specimen of 0.5 to 28 days

3.3 Komplexe Geometrien

Mit einer weiteren Versuchsreihe sollte nachgewiesen werden, dass mit der *Methode der gefrorenen Sandschalung* auch Bauteile mit dünnwandigen und filigranen Geometrien hergestellt werden können. Eine ausführliche Beschreibung der Versuchsreihe wurde in [13] veröffentlicht.

Innerhalb eines Entwurfsraums von 450 mm × 450 mm × 100 mm wurde ein dünnwandiges Schalensegment entworfen, dessen innere Struktur auf der Grundlage einer angenommenen Beanspruchung auf zwei Arten angepasst wurde:

- A. Entsprechend ermittelter Spannungstrajektorien wurde ein Rippenraster vorgesehen. Die Rippen wiesen eine Höhe von 18 mm auf. An der dünnsten Stelle war das Segment 5 mm dick.
- B. Entsprechend der ermittelten Materialausnutzung wurde eine Verteilung von Poren mit einem Durchmesser 10 bis 80 mm vorgesehen. Die resultierenden Betonstreben wiesen eine konstante Höhe von 18 mm und eine Breite von minimal 8 mm auf.

Beide Schalensegmente wurden mithilfe einer umschließenden Schalung hergestellt und nach Einbringen des Betons erwärmt.

3.3 Complex geometries

A further series of tests was to prove that components with thin-walled and filigree geometries can also be produced using the *frozen sand formwork method*. A detailed description of the test series was published in [13].

Within a design space of 450 mm × 450 mm × 100 mm, a thin-walled shell segment was designed whose inner structure was adapted in two ways on the basis of an assumed load:

- A. A ribbed grid was provided according to determined stress trajectories. The ribs had a height of 18 mm. At the thinnest point, the segment was 5 mm thick.
- B. A distribution of pores with a diameter of 10 to 80 mm was planned according to the degree of material utilisation. The resulting concrete struts had a constant height of 18 mm and a minimum width of 8 mm.

Both formwork segments were produced with the aid of an enclosing formwork and heated after the concrete had been placed.

The produced components (Figs. 9 and 10) show that the desired geometries could be realised with high precision. The surface of the components is of high and consistent quality. All geometric parts could be manufactured precisely.

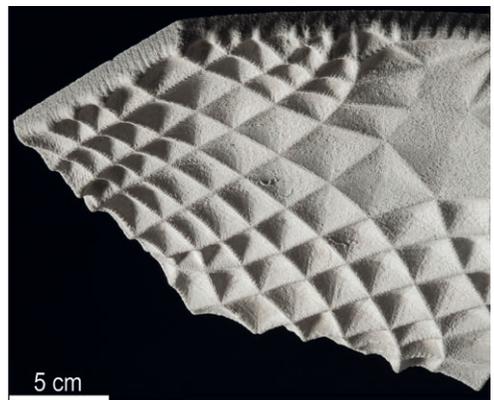
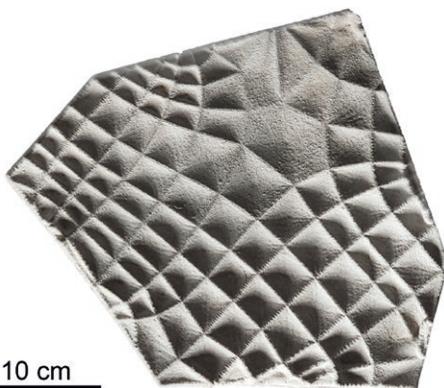


Bild 9: Hergestelltes Schalensegment mit Rippenraster (Typ A), Untersicht und Nahaufnahme | **Fig. 9:** Produced ribbed shell segment (Type A), bottom view and close up

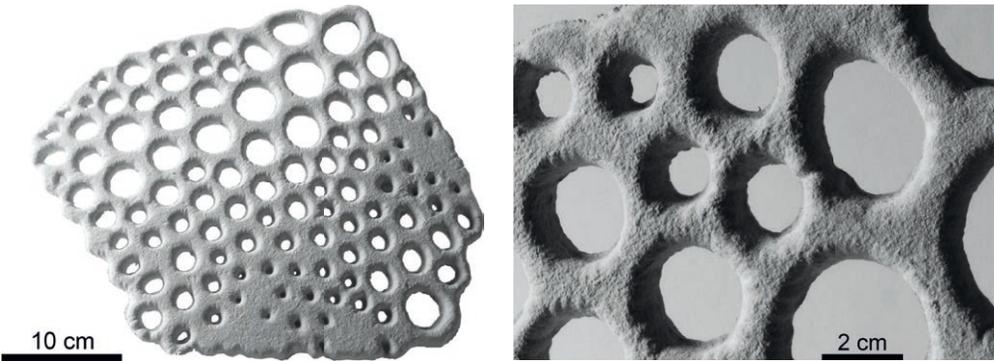


Bild 10: Hergestelltes Schalensegment mit gradierter Porosität (Typ B), Gesamtansicht und Nahaufnahme der hergestellten Struktur | **Fig. 10:** Produced shell segment with graded porosity (Type B), entire view and close up of the structure of the shell segment

Die hergestellten Bauteile (Bilder 9 und 10) zeigen, dass die angestrebten Geometrien mit hoher Präzision hergestellt werden konnten. Die Oberflächen der Bauteile weisen eine hohe und gleichbleibende Qualität auf. Sämtliche Geometrie-teile konnten präzise hergestellt werden. Hervorzuheben sind hier die dünnen Betonstreben sowie die Poren (Bild 10). In jeder Pore berühren sich die beiden Schalungsteile. An keiner Stelle drang Beton zwischen sie.

3.4 Alternativer Herstellungsansatz Hydroplotting

Die vorliegende Versuchsreihe wurde gemeinsam mit Forschern des ILEK aus dem DFG-SFB/Transregio 141 [14] als interdisziplinäres Seminar für Studierende der Architektur und des Bauingenieurwesens durchgeführt. Die Seminar-Teilnehmer sollten sich dabei dem gefrorenen Sand und dem Werkstoff Beton in experimentellen Studien annähern, um Potentiale für neue Technologien zu identifizieren. Eine Zusammenfassung der Versuchsreihe wurde in [15] veröffentlicht.

Im Seminar wurde die Schalungsmethode *Hydroplotting* entwickelt. Bei diesem Verfahren wird eine CNC-gesteuerte Nadel verwendet, um selektiv Wasser in eine Form aus trockenem Sand zu injizieren (Bild 11). Die Form wird anschließend gekühlt, so dass die Bereiche aus feuchtem Sand gefrieren. Durch Abblasen des noch trockenen Sands wird eine feingliedrige räumliche

The thin concrete struts and the pores (Fig. 10) deserve special mention here. In each pore, the two formwork parts touch each other. At no point did concrete penetrate between them.

3.4 Alternative production approach Hydroplotting

The present test series was conducted together with researchers of the ILEK from the DFG-CRC/Transregio 141 [14] as an interdisciplinary seminar for students of architecture and civil engineering. The seminar participants should approach the frozen sand and the material concrete in experimental studies in order to identify potentials for new technologies. A summary of the test series was published in [15].

In the seminar, the formwork method *Hydroplotting* was developed. This method uses a CNC-controlled needle to selectively inject water into a dry sand mould (Fig. 11). The mould is then cooled so that the areas of wet sand freeze. By blowing off the still dry sand, a fine spatial structure of frozen sand is exposed, which can be used as formwork (Fig. 12). After the concrete has hardened, the sand can simply be washed out.

4 Summary and outlook

Within the framework of the project *Automated adaptive formwork method for the production*

Struktur aus gefrorenem Sand freigelegt, die als Schalung verwendet werden kann (Bild 12). Der Sand lässt sich nach dem Aushärten des Betons einfach auswaschen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes *Automatisierte adaptive Schalungsmethode zur Herstellung von Betonbauteilen mit gekrümmten Oberflächen* sollte eine Methode entwickelt werden, die die geometrischen Möglichkeiten von Sandschalungen mit der Präzision von CNC-Methoden verbindet und so die präzise Herstellung von frei geformten Betonbauteilen ermöglicht, ohne dass dabei Abfall entsteht.

Die präsentierten Versuchsreihen und die daraus gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass diese Aufgabe erfüllt wurde: Es wurden Methoden entwickelt und erprobt, die die Herstellung einer bauteilumfassenden Schalung ermöglichen. Es wurde ein Prozess entwickelt, der trotz der Verwendung eines gefrorenen Schalungsmaterials die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs Beton in keiner Weise negativ beeinflusst. Weiter konnte die Leistungsfähigkeit der Methode anhand zweier filigraner Schalensegmente nachgewiesen werden. Bei keinem der durchgeführten Versuche wurde dabei Schalungsmaterial verbraucht.

Die Forschungen im Themenfeld wurden in zwei Vorhaben fortgesetzt. In dem vom BMBF geförderten Vorhaben „*C³-Sandwich – Hochgedämmte Sandwichfassaden*“ im Basisvorhaben C3-B4 „*Multifunktionale Bauteile*“ [16] des C³-Konsortiums wurde die Methode der *gefrorenen Sandschalung* um die Möglichkeit der Einbettung zusätzlicher Elemente wie Verbindungsmittel und Bewehrung erweitert. Dies wurde anhand dünnwandiger Carbonbeton-Sandwiches erprobt und in [17], [18] veröffentlicht, siehe auch S. 762 ff. in diesem Berichtsbuch. Zusätzlich dazu hatten die Arbeiten und Ergebnisse des vorliegenden Projekts großen Einfluss auf die Arbeiten des ILEK in dem Projekt *Fabrication of biomimetic and biologically inspired (modular*



Bild 11: CNC-gesteuerte Nadel während der Injektion von Wasser in trockenen Sand | **Fig. 11:** CNC-controlled needle injecting water into dry sand

of concrete components with curved surfaces, a method was developed which combines the geometric possibilities of sand formwork with the precision of CNC methods and thus enables the precise production of freely formed concrete components without producing waste.

The series of tests presented and the results obtained show that this task has been fulfilled: Methods have been developed and tested that enable the production of a formwork system that encompasses all components. A process was developed which, despite the use of a frozen formwork material, has no negative influence whatsoever on the mechanical properties of the concrete material. Furthermore, the efficiency of the method could be proven by means of two filigree shell segments. None of the tests carried out consumed any formwork material.

The research in this field was continued in two projects. In the BMBF-funded project, „*C³-Sandwich – Highly Insulated Sandwich Facades*“ in the basic project C3-B4 „*Multifunctional Compo-*

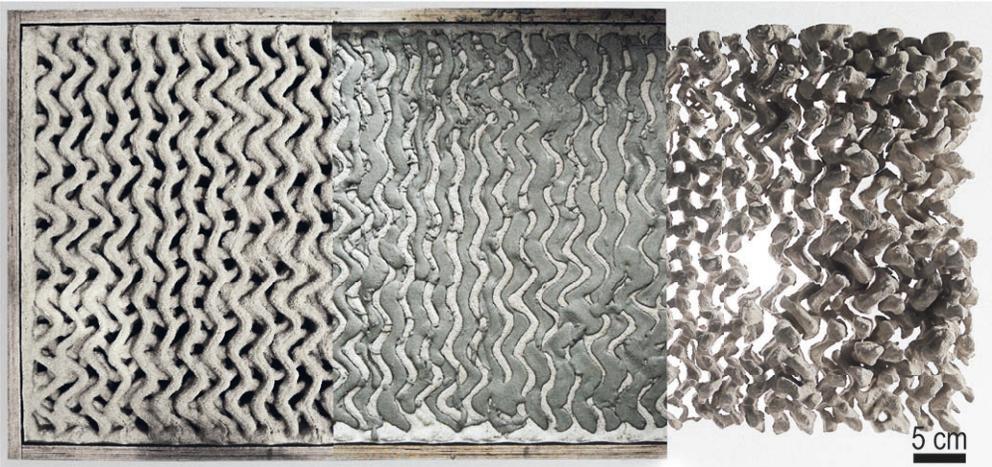


Bild 12: Produktionsschritte einer Hydroplotting-Schalung; von links nach rechts: gefrorene Sandschalung, mit Beton gefüllte Schalung und ausgeschaltes Betonbauteil | **Fig. 12:** Production of a hydroplotting formwork; from left to right: frozen sand formwork, formwork filled with concrete, and demoulded concrete part

structures for use in the construction industry [19] im Rahmen des DFG-SFB/Transregio 141, s. S. 758 ff. Im Hinblick auf die Produktion von Bauteilen mit einem durch gradierte Porosität optimierten Bauteilinnenraum wurde die Methode im Rahmen des SFB/TRR 141 weiter untersucht.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die großzügige Förderung des Projekts im Rahmen des SPP 1542 (Projekt Nr. 198455682) und bei der Firma Sika Deutschland GmbH, die das Projekt durch ihr Fachwissen und umfangreiche Materialproben unterstützt hat.

nents [16] of the C³ consortium, the method of frozen sand formwork was extended by the possibility of embedding additional elements such as fasteners and reinforcement. This was tested with thin-walled carbon concrete sandwiches and published in [17], [18], see also p. 762 seq. In addition, the work and results of the present project had a major influence on the work of the ILEK in the project "*Fabrication of biomimetic and biologically inspired (modular) structures for use in the construction industry*" [19] within the framework of the DFG-funded CRC/Transregio 141, see p. 758 et seq. With regard to the production of structural elements with an interior optimised by graded porosity, the method was further investigated within the framework of the CRC/TRR 141.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for the generous support of the project within the framework of the SPP 1542 (project number 198455682) and the company Sika Deutschland GmbH, which supported the project with its expertise and extensive material samples.

Literatur | References

- [1] Sobek, W.: Bauschaffen – auch im Sinn der Nachhaltigkeit. ARCH+ 184 (2007), S. 88/89
- [2] Heinle, E.; Schlaich, J.: Kuppeln aller Zeiten, aller Kulturen. Stuttgart: DVA, 1996
- [3] Isler, H.: New Shapes for Shells. Bulletin of the Int. Association for Shell Structures 8 (1961), S. 123–130
- [4] Sasaki, M.: Structural Design of free-curved RC shells – An overview of built works. In: Adriaenssens, S.; Block, P.; Veenendaal, D.; Williams, C. (Hrsg.): Shell Structures for Architecture, London und New York: Routledge, 2014, S. 258–270
- [5] Gericke, O.; Haase, W.; Sobek, W.: Schalungsmethode zur nachhaltigen Herstellung von Betonbauteilen mit gekrümmten und un stetigen Oberflächen. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 218–223 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171521>
- [6] Sika Deutschland GmbH: Datenblatt SikaGrout(R)-551/553/558 (2013). https://deu.sika.com/content/germany/main/de/solutions_products/Produkte_a_z/03/03a084.html
- [7] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): DAfStb-Richtlinie Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel. Berlin: Beuth, 2011
- [8] Gericke, O.; Haase, W.; Sobek, W.: Herstellung von Freiform-Betonbauteilen mittels einer gefrorenen Schalung aus Wasser und Sand. In: Garrecht, H.; Hofmann, J.; Sobek, W.; Novák, B. (Hrsg.): Beiträge zur 3. DAfStb-Jahrestagung mit 56. Forschungskoll., 11./12.11.2015 in Stuttgart, Stuttgart: Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2015, S. 23–30
- [9] ASTM C215: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional Resonant Reuquencies of Concrete Specimens. 2014
- [10] BS 8110-2:1985: Structural use of concrete. Code of Practice for Special Circumstances. London: British Standard Institute (BSI), 1985
- [11] Lee, B. J.; Kee, S.-H.; Oh, T.; Kim, Y.-Y.: Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements. Advances in Materials Science and Engineering (2017), Article ID 1651753, 13 S. – <https://doi.org/10.1155/2017/1651753>
- [12] DIN EN 12390:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Dt. Fassung EN 12390-3:2009; zgl. DIN EN 12390-3 Berichtigung 1:2011-11 sowie DIN EN 12390-13:2014-06: Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekanntenmodul); Deutsche Fassung EN 12390-13:2013.
- [13] Gericke, O.; Kovaleva, D.; Haase, W.; Sobek, W.: Fabrication of Concrete Parts using a Frozen Sand Formwork. In: Kawaguchi, K.; Ohsaki, M.; Takeuchi, T. (Hrsg.): Proc. of the IASS Annual Symp. 2016, 26.–30.09.2016 in Tokio (Japan), Madrid: IASS, 2016, Beitrag Nr. 1292, publ. auf USB-Stick, 10 S.
- [14] Homepage des SFB/TRR 141: <https://www.trr141.de/>
- [15] Müller, H.; Nething, C.; Schalk, A.; Kovaleva, D.; Gericke, O.; Sobek, W.: Porous Spatial Concrete Structures Generated Using Frozen Sand Formwork. In: Viana, V. (Hrsg.): Proc. of Int. Conf. Geometrias: Thinking, Drawing, Modelling – Geometrias'17 – Livro de Resumos (erschienen in: Springer Proceedings in Mathematics & Statistics book series (PROMS), Vol. 326), 16.–18.06.2017 in Porto (Portugal), Coimbra: Departamento de Arquitectura da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2017, S. 121–129
- [16] Homepage des Projekts C³, Basisvorhaben C3-B4 „Multifunktionale Bauteile“: <https://www.bauen-neu-denken.de/vorhaben/b4-multifunktionale-bauteile/>
- [17] Gericke, O.; Haase, W.; Sobek, W.: Production of Curved Concrete Sandwich Panels Using a Frozen Sand Formwork. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9660, Book of Abstracts: S. 180, Langfassung auf USB-Stick, 9 S.
- [18] C³-Sandwich – Hochgedämmte Sandwichfassaden. In: Hülsmeier, F. (Hrsg.): C³-Basisvorhaben B4 – Multifunktionale Bauteile aus Carbonbeton. Leipzig: Architektur-Insitut Leipzig, 2016, S. 12–15
- [19] Homepage des Projekts B04 im SFB/TRR 141: <https://www.trr141.de/index.php/research-areas-2/b04/>

Alle Internetseiten wurden am 18.06.2019 geprüft. | All internet pages were checked on 18.06.2019.

Bildnachweise | Picture credits

- Bild | Picture 1: gta Archiv / ETH Zürich, Heinz Isler; [3]
- Bild | Picture 2: Mit freundlicher Genehmigung der Kajima Corporation, Osaka (Japan) | Courtesy of Kajima Corporation, Osaka (Japan)
- Bilder | Pictures 3, 6, 8: Oliver Gericke
- Bild | Picture 7: Gabriela Metzger
- Bilder | Pictures 3–5, 9–14: Daria Kovaleva

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Automatisierte adaptive Schalungsmethode zur Herstellung von Betonbauteilen mit gekrümmten Oberflächen

Automated adaptive formwork for the production of concrete elements with curved surfaces

Antragsteller Applicant :	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek Institutsleiter Institute's director
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	SO 365/11-1 (Projektnummer Project number: 198455682)
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Pfaffenwaldring 7+14, 70569 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685-6 6226/-6 3599 werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de http://www.uni-stuttgart.de/ilek/
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	10/2011–09/2014 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 09/2016
Team Team:	Oliver Gericke (10/2013–09/2016) Walter Haase Dennis Kasper (10/2011–09/2013) Daria Kovaleva (10/2014–09/2016)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Gericke, O.; Haase, W.; Sobek, W.: Schalungsmethode zur nachhaltigen Herstellung von Betonbauteilen mit gekrümmten und unetstetigen Oberflächen. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 218–223 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171521>
- Gericke, O.; Haase, W.; Sobek, W.: Herstellung von Freiform-Betonbauteilen mittels einer gefrorenen Schalung aus Wasser und Sand. In: Garrecht, H.; Hofmann, J.; Sobek, W.; Novák, B. (Hrsg.): Beiträge zur 3. DAfStb-Jahrestagung mit 56. Forschungskoll., 11./12.11.2015 in Stuttgart, Stuttgart: Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2015, S. 23–30
- Gericke, O.; Kovaleva, D.; Haase, W.; Sobek, W.: Fabrication of Concrete Parts using a Frozen Sand Formwork. In: Kawaguchi, K.; Ohsaki, M.; Takeuchi, T. (Hrsg.): Proc. of the IASS Annual Symp. 2016, 26.–30.09.2016 in Tokyo (Japan), 2016, Langfassung auf USB-Stick: Beitrag Nr. 1292, 10 S.
- Müller, H.; Nething, C.; Schalk, A.; Kovaleva, D.; Gericke, O.; Sobek, W.: Porous Spatial Concrete Structures Generated Using Frozen Sand Formwork. In: Viana, V. (Hrsg.): Proc. of Int. Conf. Geometrias: Thinking, Drawing, Modelling – Geometrias'17 – Livro de Resumos (erschienen in: Springer Proceedings in Mathematics & Statistics book series (PROMS), Vol. 326), 16.–18.06.2017 in Porto (Portugal), Coimbra: Departamento de Arquitectura da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2017, S. 121–129

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Teile der Forschungsarbeiten werden in die Dissertation von Daria Kovaleva mit dem Arbeitstitel "Zero-waste formwork for weight-optimized functionally graded concrete structures" eingehen. | Parts of the research work will go into the dissertation of Daria Kovaleva with the working title „Zero-waste formwork for weight-optimized functionally graded concrete structures“.

Studienarbeiten | Student's research projects

- Schalk, A.; Müller, H.; Nething, C.: Untersuchung des Gestaltungspotenzials der gefrorenen Sandschalung hinsichtlich der Herstellung von räumlich komplexen Betonstrukturen. Seminar 'Metamorphosis', Wintersemester 2015/16
- Wohlrab, A.: Untersuchung des Einflusses einer gefrorenen Schalhaut auf die mechanischen Eigenschaften von selbstverdichtenden Beton. Masterarbeit, 2016
- Cong, Z.; Garcia Merina, J. S.; Jimenez, B.; Koenig, C.-Z.; Müller, H.; Nething, C.; Olivares, C.; Rihaczek, G.; Rosenfeld, S.; Smirnova, M.: Untersuchung der gestalterischen Möglichkeiten von mittels gefrorener Sandschalung hergestellter Bauteile aus funktional gradiertem Beton. Design Studio 'Concrete Tectonics I', Wintersemester 2016/17
- Cong, Z.; Nething, C.; Rihaczek, G.; Smirnova, M.: Entwicklung und Bewertung eines zirkulären Produktionsprozesses für abfallfreie und wasserlösliche Sandschalungen. Entwurfsarbeit 'Concrete Tectonics II', Sommersemester 2017

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Teilprojekt C³-Sandwich – Hochgedämmte Sandwichfassade, Entwicklung dünnschaliger hochgedämmter Fassadenelemente – Schalungstechnologie und Befestigungstechnik im Rahmen des Basisvorhabens C3-B4: Multifunktionale Bauteile | Subproject C³-Sandwich – Highly insulated sandwich facade, development of thin-walled highly insulated facade elements – formwork technology and joining technology in the frame of the basic project C3-B4: Multifunctional components

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Förderer Funding:	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) / Zwanzig20-Projekt Carbon Concrete Composite – C ³
Laufzeit Period:	07/2015–12/2019

- Teilprojekt B04: Herstellung von biomimetischen und biologisch inspirierten (modularen) Strukturen zur Verwendung in der Bauindustrie im Rahmen des SFB/Transregio 141: Entwurfs- und Konstruktionsprinzipien in Biologie und Architektur. Analyse, Simulation und Umsetzung | Subproject B04: Fabrication of biomimetic and biologically inspired (modular) structures for use in the construction industry in the frame of the CRC/Transregio 141: Biological design and integrative structures – analysis, simulation and implementation in Architecture

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 141
Laufzeit Period:	10/2014–06/2019

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation SPP-1542-Arbeitsgruppentreffen in Stuttgart, 2014, zur Präsentation der Arbeitsstände und zur fachlichen Abstimmung von Projekten mit experimentellem Schwerpunkt | Organization of SPP 1542 working group meeting in Stuttgart, 2014, for presentation and technical coordination of projects with experimental focus
- ILEKonICE: Workshop, 2015, 10 Studierende (Architektur): In diesem einwöchigen Workshop untersuchten Studierende der Northwestern University (Evanston und Chicago, USA) die gestalterischen Möglichkeiten mit gefrorenem Sand. In mehreren Schritten wurden Betonobjekte in von Hand oder mittels CNC-Fräse hergestellten, gefrorenen Sandschalungen produziert. | Workshop, 2015, 10 students (architecture): In this one-week workshop, visiting students from the Northwestern University (Evanston and Chicago, USA) explored the design possibilities of frozen sand. In several steps, concrete objects were produced in frozen sand formwork produced by hand or by CNC milling.
- Shaping the Void: Workshop, 2017, 10 Studierende (Architektur): In diesem einwöchigen Workshop untersuchten Gaststudenten der Northwestern University (Evanston und Chicago, USA) die Gestaltungsmöglichkeiten des neu entwickelten Hydroplotting mit dem Schwerpunkt Design und Herstellung von räumlichen Betonstrukturen. | Workshop, 2017, 10 students (architecture): In this one-week workshop, visiting students from the Northwestern University (Evanston and Chicago, USA) explored the design potentials for newly developed Hydroplotting with the focus on design and fabrication of spatial concrete structures

Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen – Entwurf, Berechnung und automatisierte Herstellung | Optimal structures made of functional graded concrete – design, dimensioning and automated production

▶ Mark Wörner¹, Daniel Schmeer², Harald Garrecht³, Oliver Sawodny¹, Werner Sobek²

▶ ¹ Institut für Systemdynamik (ISYS), Universität Stuttgart

▶ ² Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart

▶ ³ Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), Universität Stuttgart

1 Einführung und Zielsetzung

Infolge des stetigen Bevölkerungswachstums und zunehmender Migrationsbewegungen wird die Baubranche zukünftig mit einer hohen zu bewältigenden Bautätigkeit konfrontiert sein. Dies geht einher mit einer Verknappung endlicher Ressourcen. In Anbetracht dieser Situation werden neue Technologien, die auf ein möglichst leichtes Bauen, die Minimierung des Verbrauchs an fossiler erzeugter Energie sowie die vollständige Rezyklierbarkeit der Bauteile abzielen, zwingend notwendig [1]. Insbesondere beim Bauen mit Beton, der neben Wasser der meistverbrauchte Stoff weltweit ist [2], besteht ein dringender Handlungsbedarf, gewichtsreduzierte, emissionsminimierte und sortenrein rezyklierbare Bauteile zu entwickeln.

Mit der Technologie der *Gradientenbetone* steht dem Bauwesen ein neuer Ansatz zur Herstellung von Betonbauteilen mit signifikanter Gewichts- und Emissionsersparnis bei gleichzeitiger Gewährleistung einer sortenreinen Rezyklierbarkeit zur Verfügung. Im Gegensatz zu den bekannten Optimierungsmethoden wird bei Bauteilen aus Gradientenbeton nicht die äußere Bauteilgeometrie, sondern das Bauteillinnere optimiert. Dazu werden Hohlräume im Bauteilinneren gezielt an den Spannungs-

1 Introduction and objectives

Owing to the steady population growth and increasing migration, the construction industry will be faced with the need to deal with a high level of construction activity coinciding with a global scarcity of finite resources. In view of this situation, new construction methods will become imperative in order to make construction as light as possible, while minimizing the consumption of fossil based energy and ensuring the fully recyclability of the components [1]. Most of all, when the construction material being used is concrete – which, together with water, is the material most frequently used around the globe [2] – an urgent need for action exists with regard to the development of components that are weight-reduced, energy-minimized and recyclable.

The technology of *graded concrete* provides the construction industry a new approach for the production of concrete components with significant weight and emission savings, while at the same time ensuring pure recyclability. With graded concrete components, it is not the external component shape that is optimized, rather the interior of the component. For this purpose, cavities in the interior of the component are aligned according to internal stresses. In

feldern bzw. den inneren Beanspruchungen ausgerichtet. Auf diese Weise entsteht ein *fully stressed design*, und geringfügig ausgenutztes Material, das zuvor das Eigengewicht der Konstruktion unnötig erhöht hat, wird vermieden.

Die Einführung der Gradiententechnologie in den Betonbau erfordert die Beantwortung von drei sich gegenseitig beeinflussenden Fragestellungen:

1. Mit welchen Methoden werden die Hohlräume im Bauteil erzielt?
2. Wie kann ein gradiertes Betonbauteil entworfen und berechnet werden?
3. Wie kann eine Monomaterialgradierung reproduzierbar hergestellt werden?

Ziel des nachfolgend knapp zusammengefassten Forschungsprojekts war es, diese Fragen in einer interdisziplinären Kooperation zwischen den Instituten für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Systemdynamik (ISYS) und Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart zu beantworten. Die Darlegungen beschreiben die Arbeiten im Bereich mikrogradiertes Betonbauteile und beinhalten die erzielten Projektergebnisse zu den dichteanpassbaren Betongemischen, den Entwurfs- und Berechnungsmethoden sowie den Verfahren zur automatisierten Herstellung der Bauteile.

2 Gradientenwerkstoffe und Gradientenbeton

Der Begriff *Gradient* (lat. *gradiens* für „Anstieg“ oder „Gefälle“) bezeichnet – übertragen auf den Gradientenwerkstoff – dessen Eigenschaftsänderung entlang eines Weges bzw. einer Raumrichtung. Die ersten Konzepte, solche materiellen Eigenschaftsänderungen innerhalb eines Bauteils zu erzielen, resultieren aus den Arbeiten am Massachusetts Institute of Technology (MIT) aus dem Forschungsbereich *Functional Graded Materials* [3]. Ziel war nicht die Entwicklung neuer Werkstoffe; es ging vielmehr darum, bekannte Werkstoffe entsprechend ihrem Anforderungsprofil gezielt in der Bauteilstruktur

this way, a fully stressed design is created, and slightly used material, which previously unnecessarily increased the weight of the construction, is avoided.

The introduction of graded materials into concrete construction requires the answering of three interdependent questions:

1. Which methods are used to achieve the pores in the component?
2. How is a graded concrete component designed and calculated?
3. How can a mono-material gradation be achieved in a reproducible manner?

The aim of the hereafter briefly summarized research project was to give answers to these questions through the interdisciplinary cooperation between three institutes at the University of Stuttgart, namely the Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK), the Institute for System Dynamics (ISYS), and the Institute for Construction Materials (IWB). The report describes the work in the field of micro-graded concrete components and contains the achieved project results on density-adjustable concrete mixtures, design procedures and structural calculations, and methods for the automated production of functionally graded concrete components.

2 Functionally graded materials and graded concrete

In the context of functionally graded material, the term *graded* (derived from the Latin term *gradiens* for “rise” or “slope”) describes the gradual variation of the material properties along a path or spatial direction. Scientists from the Department of Materials Science and Engineering at the Massachusetts Institute of Technology (MIT) were the first to develop concepts of “*Functionally Graded Materials*” [3] for the purpose of achieving such material property changes within a component. The goal was not to develop new materials, but rather to purposefully organise known materials into the component

anzuordnen [4]. In Deutschland wurden im Rahmen des DFG-SPP 733 *Gradientenwerkstoffe* erste Untersuchungen zu Herstellungsverfahren, zu Simulation und Materialprüfung, insbesondere mit Metallen, Kunststoffen und Keramiken, durchgeführt [5]. Aus dem Programm stammt auch die Beschreibung der Methode und somit die Begriffsdefinition des Gradientenwerkstoffs nach Rödel et al. [6]:

„Als Gradientenwerkstoffe werden solche Materialien bezeichnet, bei denen sich eine oder mehrere Eigenschaften, beispielsweise die Härte, die Dichte, die Porosität oder die chemische Zusammensetzung, zumindest in einer Raumrichtung über eine bestimmte Länge hinweg kontinuierlich ändern [...].“

Dieses Konzept wurde erstmals von Werner Sobek auf den Betonbau übertragen [7]. Mit der Technologie des Gradientenbetons werden die Betoneigenschaften wie Festigkeit, Dichte, Steifigkeit oder Wärmeleitfähigkeit gezielt an das im Bauteilinneren vorherrschende Beanspruchungsprofil angepasst. Das Ergebnis sind Bauteile mit einer drastischen Reduktion der Gesamtmasse bei gleichzeitiger Einhaltung von Standsicherheit und Funktionsfähigkeit. Am ILEK konnte im Rahmen des Forschungsprojekts *Herstellungsverfahren und Anwendungsgebiete für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen* das Potential dieser Technologie für das Bauwesen belegt werden [8]. Insbesondere die mit dem Werkstoff Beton erzielten Ergebnisse motivierten zur weiteren Erforschung der Technologie im Rahmen des Projekts *Entwicklung gewichtsoptimierter funktional gradierter Elementdecken* [9]. Durch diese Arbeiten konnten die Anwendungsmöglichkeiten sowie erste Ansätze zur Betontechnologie, zum Bauteilentwurf und zur Herstellung von gradierten Betonbauteilen erforscht werden. Die Arbeiten zeigten aber auch, dass zur Sicherstellung einer gleichbleibend hohen Bauteilqualität die genannten Forschungsfragen innerhalb eines ganzheitlichen Prozesses beantwortet werden müssen.

structure in accordance with their profile of requirements [4]. In Germany, initial research into production techniques, simulation and material testing, notably regarding to metals, plastics and ceramics, was conducted as part of the German Research Foundation's Priority Programme 733 on *Functionally Graded Materials* (DFG-SPP 733 *Gradientenwerkstoffe*) [5]. The program also provides the description of the method, and thus the definition of functionally graded materials according to Rödel et al. [6]:

“Functionally graded materials are those materials in which one or several properties, such as hardness, density, porosity or chemical composition, continuously change, in at least one spatial direction over a certain length [...].“

This concept was first transferred to concrete construction by Werner Sobek [7]. In this regard, concrete properties such as strength, density, stiffness or thermal conductivity are specifically adapted to the stress profile or structural-physical demand prevailing in the interior structure of the component. In this way, the use of unnecessary or marginally necessary material that increases the dead weight of the construction is avoided. As a result, the components' total mass is drastically reduced, while retaining stability and functionality. In connection with the research project *Production Techniques and Application Areas for Functionally Graded Components* in the building sector carried out at ILEK, the potential of this technology for the building industry has been proven [8]. Most of all, the achieved results for the material of concrete motivated the scientists to further research the technology in the context of the project *Development of Weight-Optimized, Functionally Graded, Prefabricated Ceilings* [9]. This preparatory work facilitated the research into application options and initial approaches to concrete technology, component design and the production of graded concrete components. However, previous research also showed that, in order to ensure consistently high component quality, the above-mentioned interdependent sub-aspects need to be combined in an overall process.

3 Grundlagen und Voruntersuchungen

3 Fundamentals and preliminary research

3.1 Betontechnologie (IWB, ILEK)

3.1 Concrete technology (IWB, ILEK)

Eine Gradierung von Bauteilen aus Beton kann u. a. durch eine Änderung der Porosität, durch Einbringen diverser Zuschlagstoffe, die Verwendung unterschiedlicher Betone im Bauteil oder deren Kombination erfolgen. Aus den Ergebnissen der vorherigen Forschungsprojekte stellte sich insbesondere eine Porositätsänderung der Betonmatrix mittels Leichtzuschlägen oder schaubildender Technologien als zielführender Ansatz heraus [8]. Aufgrund der dabei erzielten Hohlraumgröße von bis zu 10 mm wird im Folgenden von einer Mikrogradierung gesprochen. Bei diesem Ansatz wird bei minimaler Porosität eine hohe Tragfähigkeit erreicht; im Gegensatz dazu werden mit einer Maximierung des Porengehalts die Gewichtsreduktion sowie Wärmedämmeigenschaften verbessert. Ein gefügedichtetes Extremum der Basismischung MI begrenzt das Eigenschaftsspektrum hinsichtlich der statischen Anforderungen, wobei ein nor-

The gradation of concrete components can be achieved, among other things, by means of changing the porosity, adding various aggregates or by using or combining different concretes in the component. Preliminary studies showed that a change in porosity of the concrete through lightweight aggregates or pore forming agents is particularly effective [8]. Due to the resulting cavity size of up to 10 mm, this method will be referred *micro-gradation* in the following. By this approach, high load-bearing capacity is achieved with minimal porosity; in contrast, weight reduction and thermal insulation properties are improved by maximizing the pore content.

A dense extremum of the basic mixture (MI) limits the range of properties with regard to static requirements, whereby a normal strength, high strength or even ultra-high strength con-

Dichte, E-Modul, Druckfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit | density, Young's modulus, compressive strength, thermal conductivity

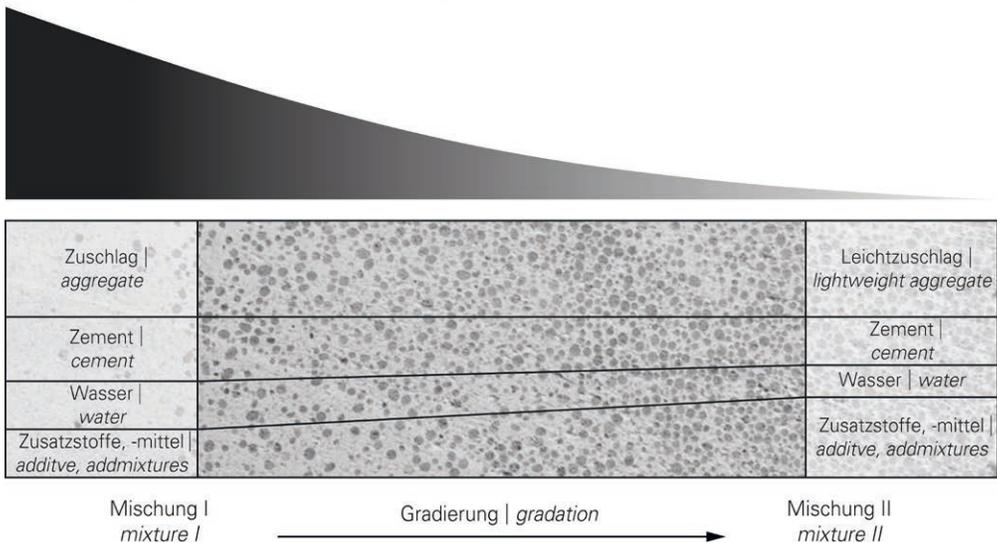


Bild 1: Konzept der Mikrogradierung: Eigenschaftsänderung der Betongemische durch Porositätsänderung mittels Leichtzuschlägen | Fig. 1: Concept of the micro gradation: changing properties of the concrete mixtures through density variation by lightweight aggregates

malfechter, hochfester oder sogar ultrahochfester Beton ausgewählt werden kann. Ein poröses Extremum der Basismischung MII, welches als Leichtbeton mit minimaler Rohdichte ausgeführt ist [10], begrenzt wiederum das mögliche Eigenschaftsspektrum des Gradientenbetons. Der zwischen diesen Basismischungen MI und MII liegende Übergangsbereich der Mikrogradierung wird durch die volumenspezifische Überlagerung der beiden Mischungen gebildet (Bild 1). Somit lassen sich individuelle Eigenschaften erzielen, die jeweils optimal an das Anforderungsprofil angepasst sind.

3.2 Herstellungsansätze (ISYS, ILEK, IWB)

Die Herstellung der kontinuierlichen Porositätsänderung mittels volumenspezifischer Überlagerung zweier Betone erfordert sowohl die Entwicklung einer Verfahrenstechnik zur Dosierung, Förderung und Applikation als auch die Erforschung eines innovativen Mischungskonzeptes zur Gradientenbildung. Die systematische Analyse des Stands von Forschung und Technik im Bereich additiver Herstellungsverfahren im Bauwesen zeigt, dass prinzipiell das Gießen, Sprühen, Extrudieren und das selektive Binden zur Herstellung gradierter Betonbauteile einsetzbar sind [8]. Diese Herstellungsverfahren ermöglichen mittels Ein- oder Mehrdüsensystemen die zielgerichtete Applikation von Betonen und müssen entsprechend den Anforderungen zur Gradientenbildung bewertet und weiterentwickelt werden (Bild 2).

crete can be selected. A porous extremum of the basic mixture (MII) which is designed as lightweight concrete with minimal bulk density [10], also limits the possible spectrum of properties of the graded concrete. The transition range of the micro-gradation between these basic mixtures MI and MII is formed by the volumetric superposition of the two mixtures (Fig. 1). This allows the achievement of individual properties that are optimally adapted to the respective requirement profile.

3.2 Production approaches (ILEK, ISYS, IWB)

The production of continuous density variation by means of the volume-specific superposition of two concretes requires the development of a process technology for metering, conveying and application, as well as research into an innovative mixing concept for the purpose of producing gradients. The systematic analysis of the state of research and technology with regard to production techniques in building sector has shown that, in principle, casting, spraying, extruding and selective binding are the methods available for the production of functionally graded concrete components [8]. These production techniques allow the targeted application of concretes by using single-nozzle or multi-nozzle systems that have to be evaluated and further developed according to the requirements for producing gradients (Fig. 2).

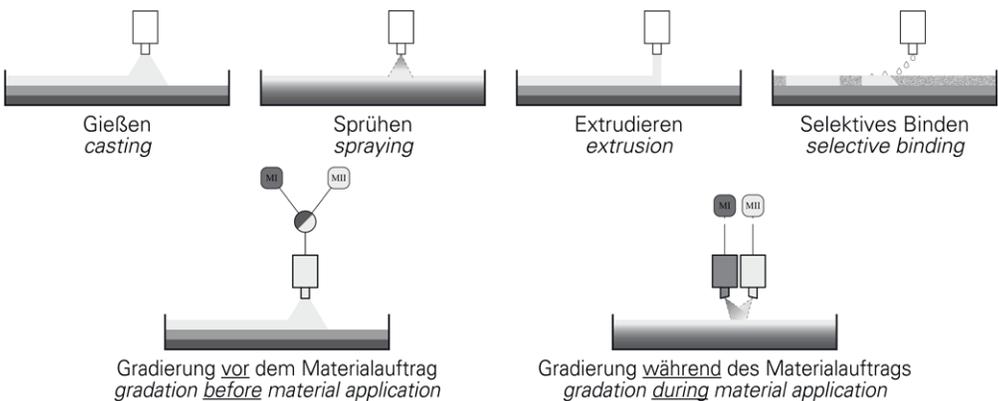


Bild 2: Verfahrenstechniken (oben) und Mischtechniken (unten) zur Gradientenbildung | Fig. 2: Application techniques (top) and mixing techniques (bottom) to produce gradients

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass beim Gießen aufgrund der rheologischen Eigenschaften des Betons lediglich einachsig geschichtete Gradierungen möglich sind [7]. Die Verfahren des Extrudierens und des selektiven Bindens stellen hohe Ansprüche an die Betontechnik. So muss beispielsweise beim Extrudieren der Beton für die Materialförderung ausreichend fließfähig sein und für den Materialauftrag wiederum sehr steif, um den schichtweisen Aufbau zu gewährleisten. Darüber hinaus muss auch der Verbund der steifen Betonschichten sichergestellt werden. Dies stellt bereits für einen Beton eine hohe Herausforderung dar und wird durch die Interaktion zweier Betone im Rahmen der Gradientenbetontechnologie nochmals erschwert [12]. Betonsprühverfahren weisen dagegen verfahrenstechnische Vorteile auf. Hervorzuheben ist der verbesserte Schichtverbund durch die Applikation des Materials mittels Druckluft. Dies geht einher mit einer Reduktion der Anforderungen an die Mischungsentwicklung, weshalb sich die weiteren Untersuchungen auf die Sprühverfahren beschränken.

Bei den Sprühverfahren wird zwischen dem Nassspritzen und dem Trockenspritzen unterschieden. Beim Nassspritzverfahren wird ein Frischbeton im Dichtstrom zur Düse gefördert und dort zusätzlich mittels Luft beschleunigt und aufgetragen. Hingegen werden beim Trockenspritzverfahren die trockenen Ausgangsstoffe der Betonrezeptur über einen definierten Luftmassenstrom zur Düse gefördert, an der die Wasserzugabe erfolgt. Das beschleunigte und mit Wasser benetzte Ausgangsmaterial wird auf der verbleibenden Wegstrecke durchmischt und danach aufgetragen. Aufgrund der Verfahrensunterschiede ergeben sich prinzipbedingte Vor- und Nachteile, die analysiert und hinsichtlich der automatisierten Herstellung mikrogradiertter Betonbauteile bewertet wurden [13]. Als zentrale Aspekte der Bewertung sind die Konsistenz und Förderbarkeit der Betone sowie eine ausreichende Frühstandfestigkeit für den schichtweisen Herstellungsprozess zu nennen. Beim Nassspritzverfahren zeigt sich, dass aufgrund der notwendigen Konsistenz zur

In summary, it can be determined that, on account of the rheological characteristics of concrete, only uniaxial layered gradations are achievable through casting [7]. The techniques of extrusion and selective binding demand a great deal of the concrete technology. For example, using extrusion technique, the concrete must be sufficiently fluid for conveying the material and very stiff for applying the material in order to ensure the layer-wise process. In addition, the bond between the stiff concrete layers must also be ensured. This represents a major challenge for even one concrete and is even more difficult by the interaction of multiple concretes within the framework of graded concrete technology [12]. In contrast, concrete spraying techniques have process related advantages. The improved layer bond is to be highlighted by the application of the material with compressed air. This goes hand in hand with a reduction of the requirements for mixture development. For these reasons, further investigations are limited to the spraying techniques.

Spraying techniques can be divided into wet-spraying and dry-spraying techniques. In wet spraying, fresh concrete is conveyed in a dense stream to the nozzle, where it is further accelerated by air and then applied. In the dry-spraying technique, by contrast, the dry materials of the concrete recipe are conveyed to the nozzle by a defined air-mass flow; the water is added at the nozzle. Each technique has inherent advantages and disadvantages that have been systematically analysed with regard to the automated production of functionally graded concrete components [13]. Key aspects in this regard are the consistency and conveyability of the concretes as well as a sufficient early strength, all of which are required for the layer-by-layer production process. In the case of wet spraying, it has been found that, due to the consistency required for the conveyability of the concrete, early strength can only be achieved by adding a high amount of accelerator [14]. If this is not ensured, light concretes may float up and consequently the gradation cannot be implemented with positional accuracy (Fig. 3, left). In contrast, dry spraying has inherent advantages.

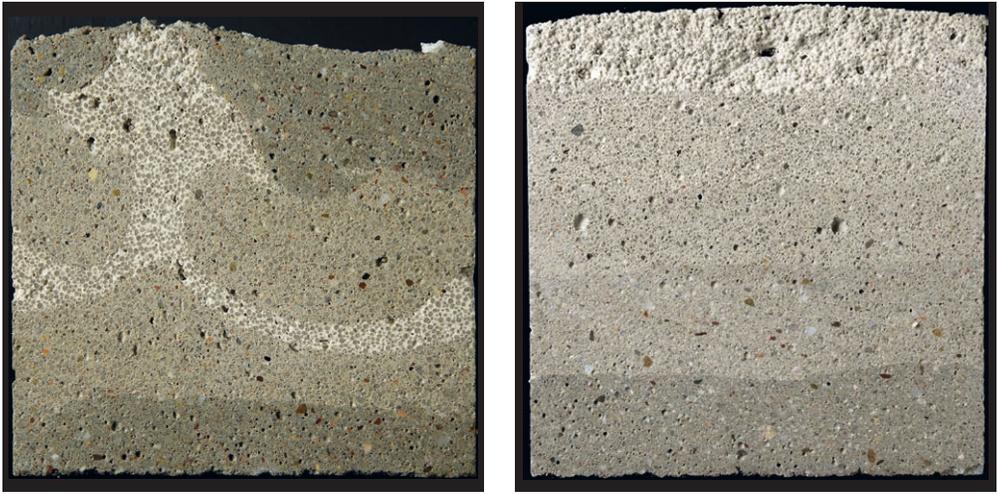


Bild 3: Aufschwimmen des Leichtbetons innerhalb des im Nassspritzverfahren hergestellten Probekörpers (links) und diskrete Schichtgrenzen des im Trockenspritzverfahren hergestellten Probekörpers (rechts) | **Fig. 3:** Floating of the lightweight concrete within the test specimen produced by wet spraying (left) and discrete layers of the test specimen produced by dry spraying (right)

Förderbarkeit die Frühstandfestigkeit nur mit einer hohen Zugabe von Beschleuniger erreicht werden kann [14]. Ist dies nicht gewährleistet, kann es zum Aufschwimmen der leichten Betone kommen, so dass die Gradierung nicht positionsgenau umsetzbar ist (Bild 3, links). Beim Trockenspritzverfahren dagegen sind die sehr gute Verdichtung des Materials beim Applikationsprozess, der geringe Reinigungsaufwand, die hohe Frühfestigkeit der Betone auch ohne Zugabe von Zusatzmitteln sowie das Erstarrungsverhalten positiv hervorzuheben [13]. Dadurch kann eine homogene Gefügestruktur ohne Delamination oder Aufschwimmen der Schichten erreicht werden (Bild 3, rechts). Aufgrund dieser Aspekte wurde das Trockenspritzverfahren zur Umsetzung der Gradientenbetontechnologie ausgewählt und weiter ausgearbeitet.

4 Entwurfsmethoden für funktional gradierte Betonbauteile (ILEK)

4.1 Entwurfsgrundlagen

Der Entwurf gradiertter Betonbauteile definiert die Porositätsverteilung im Inneren des Bauteils, das sogenannte *Gradientenlayout*. Dieses ist einerseits abhängig von den Entwurfsrand-

Supplementary to the very good compaction of the material during the application process, the low cleaning effort required, the high degree of concretes' early strength without the need to add admixtures and the setting behaviour are to be positively highlighted [13]. The result is a homogeneous microstructure between the layers without delamination or floating (Fig. 3, right). As a result of these positive aspects, the dry-spraying technique was chosen to realize the technology of graded concrete.

4 Methods for designing functionally graded concrete components (ILEK)

4.1 Design fundamentals

The design of functionally graded concrete components defines the porosity distribution within the component, the so-called *graded layout*. It depends, on the one hand, on the boundary conditions for the design, which in building sector are usually predefined by the component's geometry, load, support and the available material. On the other hand, the design is influenced by the performance function that needs to be optimized. In this regard, a distinction can be made between the structural and functional ap-

bedingungen, die im Bauwesen zumeist durch die Bauteilgeometrie, die Belastung, die Lagerung und das zur Verfügung stehende Material vordefiniert sind. Andererseits wird der Entwurf von der zu optimierenden Zielgröße beeinflusst. So wird beim tragstrukturellen Ansatz die Minimierung des Konstruktionseigengewichts eines monofunktionalen, lastabtragenden Bauteils verfolgt [12]. Der funktionale Entwurfsansatz strebt dagegen eine Materialminimierung des Gesamtbauteils unter Berücksichtigung zusätzlicher Zielfunktionen und Nebenbedingungen, wie der Einhaltung von Wärme-, Schall- oder Brandschutz, an. Die nachfolgenden Ausführungen zur Bestimmung des Gradientenlayouts beschränken sich auf den erstgenannten Ansatz. Das Optimierungsziel beim tragstrukturellen Ansatz kann durch die beiden Entwurfsprinzipien *design for strength* und *design for deformation* erreicht werden, die im Weiteren detailliert beschrieben werden.

4.2 Gradientenlayout nach dem Prinzip *design for strength*

Bei dem Entwurfsprinzip *design for strength* wird die Materialverteilung nach dem im Bauteil vorherrschenden Beanspruchungszustand bestimmt und die Gradierung des Betons entsprechend der notwendigen Festigkeit gewählt. Bei ebenen Bauteilen mit einachsigen Lastabtrag kann die Gradierung aus analytisch bestimmbaren inneren Kraftgrößen abgeleitet werden, wie beispielsweise aus den Schnittkräften oder aus den Hauptspannungen.

An einem einfachen Beispiel, einem durch zwei Einzellasten belasteten Einfeldträger, wird die Bestimmung der Materialverteilung exemplarisch hergeleitet (Bild 4). Die Dimensionierung der beiden Deckschichten erfolgt über das im Bauteil maximal auftretende Biegemoment in Feldmitte, aus dem eine Druckkraft an der Oberseite des Querschnitts und eine Zugkraft an dessen Unterseite resultieren. Die Druckkraft wird von der oberen Deckschicht über deren Dicke und die Betondruckfestigkeit der höherfesten Basismischung (M1) abgetragen. Die Zugkraft wird von einer in die untere Betondeckschicht

proach. In the former case, the goal is to achieve an optimal distribution of material to reduce the weight of a component for the stresses that occur [12]. In the latter case, the aim is to minimize the material of the entire component while taking additional functions (such as thermal insulation, noise or fire protection) into account. The following explanations for the determination of the graded layout concentrate on the first approach mentioned. The objective of the load bearing optimisation can be achieved by two *design methods* namely *design for strength* and *design for deformation*.

4.2 Graded layout according to the principle of *design for strength*

In the *design for strength* method, the material distribution is determined according to the stresses prevailing within the component, where the concrete is chosen to match the required strength. In the case of single span components, the gradation can be derived from analytically determinable internal force values, such as force resultants or principal stresses.

The determination of the material distribution can be derived by means of a simple example, a single-span beam loaded with two point loads (Fig. 4). The dimensioning of the two covering layers is effected by the maximum bending moment. This moment results in a compressive force at the upper side, and a tensile force at the bottom side, of the cross section. The compressive force is carried by the upper cover layer through its height as well as by the compressive strength of the used concrete. The resulting tensile force is absorbed by a reinforcement inside the lower concrete cover layer. The interior gradation is selected according to the shear stress occurring within the component. In the example shown, the system exhibits a constant shear-force distribution in the peripheral sections and a shear-force-free zone in the centre of the beam. As a result of the numerically constant shear-force distribution, two concrete mixtures emerge for the material-specific load removal. In the peripheral sections, a grading (G) is applied which must be

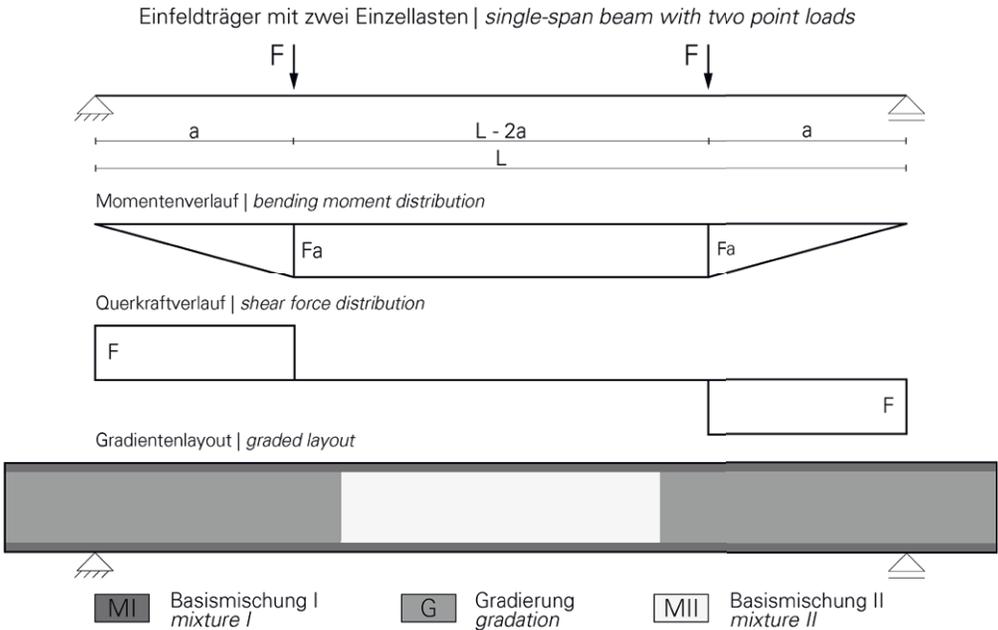


Bild 4: Gradiertes Kammerlayout nach dem Prinzip *design for strength* | **Fig. 4:** Graded segmented layout following the *design for strength* principle

eingebrauchten Zugbewehrung aufgenommen. Die Wahl der Gradierung im Inneren erfolgt nach der im Bauteil auftretenden Querkraftbeanspruchung. Im dargestellten Beispiel weist das System in den Randbereichen einen konstanten Querkraftverlauf auf und in Trägermitte eine querkraftfreie Zone. Aufgrund der betragsmäßig konstanten Querkraftverteilung ergeben sich für einen materialgerechten Lastabtrag zwei Betonmischungen. In den Randbereichen wird eine Gradierung (G) eingesetzt, die entsprechend der einwirkenden Querkraft dimensioniert werden muss. Der mittlere Bereich besitzt keine Tragfähigkeitsanforderungen, weshalb ein Beton mit maximaler Porosität und minimaler Rohdichte (Basismischung MII) eingesetzt werden kann. Somit lässt sich ein vereinfachtes Gradientenlayout auf Basis der inneren Schnittkräfte für einen einachsig spannenden Biegeträger ableiten. Ein analoges Vorgehen kann für den Entwurf des Gradientenlayouts auf Basis der Hauptspannungen im Bauteil angewandt werden. In diesem Fall richten sich die Gradierungsstufen im Inneren des Bauteils nach den maßgebenden Hauptdruckspannungen [11].

dimensioned according to the occurring shear force. The middle section requires no properties concerning the load-bearing capacity; therefore, a concrete with maximum porosity and minimum bulk density (base mixture MII) can be used. Consequently, a simplified graded layout can be derived that is based on the internal forces for a single span beam. An analogue procedure can be used for designing the graded layout according to the principal stresses, in which case the gradation steps inside the component result from the principal compressive stresses [11].

4.3 Graded layout according to the principle of design for deformation

Due to the gradation of the component, its overall stiffness is reduced; therefore, adherence to a deformation limit can become decisive for the design of the graded layout. Accordingly, the design approach pursues the goal of maximizing the component stiffness in cases where the material volume is defined, or minimizing the component weight in cases

4.3 Gradientenlayout nach dem Prinzip design for deformation

Durch die Gradierung des Bauteils wird dessen Gesamtsteifigkeit reduziert, weshalb für den Entwurf des Gradientenlayouts die Einhaltung einer Grenzverformung maßgebend werden kann. Dementsprechend ist das Ziel des Entwurfsprinzips *design for deformation* die Maximierung der Bauteilsteifigkeit bei festgelegtem Materialvolumen oder die Minimierung des Bauteilgewichts bei vorgegebener Steifigkeit bzw. zulässiger Verformung. Für die Lösung dieses Optimierungsproblems stehen unterschiedliche Verfahren aus der Topologieoptimierung [17], zur Verfügung, mit denen die optimale Verteilung von Material innerhalb eines Entwurfsraumes berechnet und somit das Gradientenlayout bestimmt werden kann [18]. Um das Optimierungsziel bestmöglich zu erfüllen, wird eine mathematische Topologieoptimierung [17] eingesetzt, bei der im Verlauf einer Iterationschleife die Verteilung des zur Verfügung stehenden Materials variiert werden kann, d. h. die Steifigkeit und damit verbunden die Dichte des Materials wird innerhalb des Entwurfsraums neu angeordnet. Die Umverteilung erfolgt über die Veränderung des E-Moduls jedes finiten Elements E_i innerhalb des diskretisierten Entwurfsraumes. Gesteuert wird diese Änderung über die Entwurfsvariable der normierten Dichte x_i und lässt sich mithilfe des SIMP-Ansatzes [19] mit der ins Optimierungsziel einfließenden Biegesteifigkeit des Bauteils über die folgende Beziehung in Zusammenhang bringen:

$$\frac{E_i}{E_0} = (x_i)^p = \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^p, \quad p > 1$$

Hierbei wird die potenzierte Entwurfsvariable x_i dem Verhältnis aus gradiertem E-Modul E_i und E-Modul eines massiven Elements E_0 der Basis Mischung MI gleichgesetzt. Zusätzlich wird die Entwurfsvariable aus dem Verhältnis der Dichte jedes Elementes ρ_i und der massiven Dichte ρ_0 des isotropen Materials MI gebildet. Der materialspezifische Exponent p kann auf das zur Verfügung stehende Eigenschaftsspektrum der Gradientenbetone individuell angepasst wer-

where the degree of stiffness or the permissible deformation is specified. To solve the optimisation problem, various methods from the topology optimisation [17] enables the determination of the optimal material distribution within a design space and, hence, the determination of the graded layout [18]. In order to achieve the optimisation's objective in the best possible manner, a mathematical topology optimisation [17] is used. Thereby, the available material is varied within an iteration loop, i.e. the stiffness and associated the density of the material is rearranged within the design space. In this approach, the distribution is effected by means of changing the Young's modulus for each finite element E_i of the discretized design space. The change is controlled by the design variable of the standardized density x_i and, can be connected, by applying the SIMP approach [19], with the component's stiffness, which is part of the optimisation objective, via the following relationship [19]:

$$\frac{E_i}{E_0} = (x_i)^p = \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^p, \quad p > 1$$

For this purpose, the exponentiated design variable x_i is equated with the ratio of the graded Young's modulus E_i and the Young's modulus of a massive element E_0 . In this case, the Young's modulus of the base mixture MI has to be used for E_0 . In addition, the design variable is derived from the ratio of the density of each element ρ_i and the massive density ρ_0 of the isotropic material MI. The material-specific exponent p is individually adaptable to the available range of properties of graded concretes, so the functional gradation enables the production of densities in the transition zone of the base mixtures.

The solution to the optimisation problem was calculated with the optimisation tool *ATOM* for the FE programme *ABAQUS* [18]. In the following, the procedure is explained, taking as an example a single span slab with $L = 440 \text{ cm} \times W = 20 \text{ cm} \times D = 2 \text{ cm}$ under two point loads. The aim is to minimize the total strain energy of the component, which is equivalent to min-

den, da durch die funktionale Gradierung ebenso die Herstellung von Dichten im Übergangsbereich der Basismischungen möglich ist.

Die Lösung des Optimierungsproblems wurde mit dem Optimierungspaket *ATOM* für das FE-Programm *ABAQUS* berechnet [18]. Im Folgenden wird das Vorgehen anhand eines einachsig spannenden Deckenausschnittes ($440 \times 20 \times 2$ cm) unter zwei Einzellasten exemplarisch erklärt. Das Ziel ist die Minimierung der Gesamtverzerrungsenergie des Bauteils, was der Minimierung der mittleren Nachgiebigkeit entspricht. Als Nebenbedingung ist eine Massenrestriktion des Bauteils formuliert, die sich aus dem Gewicht eines Bauteils mit Kammerlayout ergibt ($\zeta = 551 \text{ kg} / 785 \text{ kg} = 0,7$). Zusätzlich ist als Restriktion eine untere 4 cm starke Deckschicht als *non-design area* definiert, die von der Materialverteilung unberührt bleibt. Somit wird die konstruktive Randbedingung des Verbundes zwischen Bewehrung und Beton in die Optimierung integriert. Die durchgeführte Optimierung findet im linear elastischen Bereich des Materialverhaltens statt. Als Abbruchkriterium ist eine maximale Anzahl an zulässigen Iterationsschritten definiert. Tabelle 1 zeigt das Ergebnis der Optimierung mit der gradierten Materialverteilung (Gradientenlayout, GL) im Vergleich zum Kammerlayout (KL). Das Entwurfsergebnis der Topologieoptimierung zeigt zwischen den beiden Lasteinleitungen eine obere Druck- und eine untere Zugstrebe konstanter Dicke infolge konstanter Momentenbeanspruchung. Ausgehend von der Lasteinleitung Richtung Auflager, im Bereich konstanter Querkraftbeanspruchung, werden in der Kernschicht alle zur Verfügung stehenden Materialien platziert. Die Materialübergänge verlaufen fließend und es bildet sich eine dominante, diagonale Druckstrebe vom oberen Bauteilrand zum Auflager aus. Links vom Auflager und in der neutralen Zone der Biegebeanspruchung in Feldmitte wird die leichteste Mischung MII angeordnet, da hier keine oder nur sehr geringe Beanspruchungen vorhanden sind. Gegenüber dem Kammerlayout wird mit diesem Gradientenlayout bei gleicher Bauteilmasse ein Steifigkeitsgewinn von 31 % erreicht.

imizing the mean compliance. As a secondary condition, a mass restriction of the component is formulated which corresponds to the component weight of the segmented layout ($\zeta = 551 \text{ kg} / 785 \text{ kg} = 0.7$). As an additional restriction, a 4 cm thick lower cover layer is defined as *non-design area*, which remains unaffected by the material distribution. Thus, the structural boundary conditions of the bond between reinforcement and concrete are indirectly integrated into the optimisation. The conducted optimisation takes place in the linear elastic state of the material behaviour. A maximum number of permitted iteration steps is defined as termination criterion. Table 1 illustrates the result of the optimisation with the material-distribution strategy in comparison to the segmented layout. The design result of the topology optimisation shows an upper strut and a lower tie of constant thickness between the two load introductions due to constant bending stress. Proceeding from the load introduction in the direction to the support, in the zone of constant shear stress, all available materials are placed in the core layer. The material transitions run smoothly and a dominant, diagonal strut is formed from the load applications at component's upper side to the support. The lightest mixture MII is placed to the left of the support and in the midspan by the neutral zone of the bending stress, because these zones have an extremely low stress magnitude. Compared to the segmented layout (KL), this graded layout (GL) can achieve stiffness gains of 31%, while remaining the same component mass.

x_i [-]		C [Nm]	m [kg]	ΔC [%]
KL		238	551	-
GL		164	551	31

Mit | With: x_i Entwurfsvariable: relative Dichte | Design variable: relative density
 C Globale mittlere Nachgiebigkeit | Global mean compliance
 m Bauteilmasse | Component's weight
 ΔC Steifigkeitszuwachs | Increase of stiffness

Tabelle 1: Optimierungsergebnis der Materialverteilungsstrategie [20] | Table 1: Material distribution as a result of the optimization [20]

5 Herstellungstechnologie

5 Production technology

5.1 Konzeption und Automatisierung (ISYS)

5.1 Conception and automation (ISYS)

Zur baupraktischen Umsetzung des im Entwurfsprozess bestimmten Gradientenlayouts wird aufgrund von seiner Komplexität ein automatisiertes Herstellungsverfahren, das die Vielzahl an Prozessparametern regeln kann, erforderlich. Hierzu muss eine Betonverfahrenstechnik sowohl zur Sicherstellung von gleichmäßigen Materialströmen als auch zur Realisierung von konstanten und definierten Materialeigenschaften der Betone implementiert werden. Des Weiteren muss ein Manipulator konzipiert und realisiert werden, welcher den positionsgenauen Materialauftrag sicherstellt.

Due to the complexity and variety of the graded layout, an automated production process needs to be developed, which can control the multitude of process parameters for the practical implementation of the technology. For this purpose, a concrete technology must be implemented both to ensure that the material streams are homogeneous and to realise constant and defined material properties of the concrete. Moreover, a manipulator must be conceptualised and realised to ensure the precise and targeted application of the material.

Beim angewandten Trockenspritzverfahren lässt sich der Prozess auf vier determinierende Einflussfaktoren beschränken, welche die Qualität des Spritzbetons maßgeblich bestimmen [14]. Diese sind der Maschinentyp, die Art der Energiezufuhr, die Förderleitung sowie die Art und Weise der Wasserzugabe an der Düse. Diese Faktoren werden für die Konzeption des Gesamtprozesses in [13] analysiert und darauf aufbauend die Betonverfahrenstechnik zur Herstellung mikrograderter Betonbauteile ausgearbeitet (Bild 5).

The process technology of dry-spraying concrete can be limited to four process-determining factors, which have a decisive influence on the quality of the shotcrete [14]. These factors are the machine type, the type of energy input, the conveyor pipe, and the type of, and location for, the water supply depending on the nozzle system. These factors were thoroughly analysed in [13] and based on this, the concrete process technology for producing micro-graded concrete components was elaborated (Fig. 5).

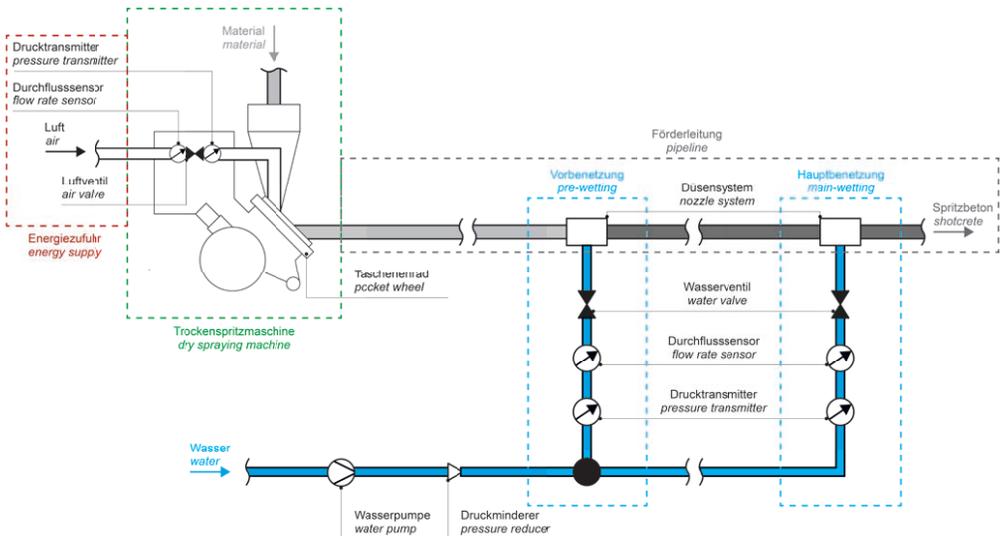


Bild 5: Schematischer Aufbau der Betonverfahrenstechnik mit den vier Einflussbereichen: Energiezufuhr (rot), Maschinentyp (grün), Förderleitung (grau) und Benetzung (blau) | **Fig. 5:** Schematic structure of the concrete technology with the four influencing factors: energy supply (red), machine type (green), conveyor line (grey) and water supply (blue)

Für die beiden Basismischungen wurde jeweils ein separater Dosier- und Förderprozess gewählt. Aufgrund der voneinander unabhängigen Teilsysteme besteht die Möglichkeit, die Gradientenbildung vor oder während des Materialauftrags umzusetzen [21]. Der prinzipielle Ablauf von Dosieren und Fördern ist für beide Mischungen identisch und beginnt mit der Zuführung der trockenen Basismischungen in die Trockenspritzmaschinen. Die anschließende Dosierung der Materialströme erfolgt durch die Drehzahlregelung des Taschenrades der Maschine, welches mit einem Asynchronmotor angetrieben wird. Die pneumatische Energieversorgung zur Förderung der trockenen Betonkonglomerate wird mittels eines Luftventils reproduzierbar sichergestellt und sensorisch durch einen Drucktransmitter sowie einen Durchflusssensör überwacht. Das Zugabewasser des Betons wird in einem Tank gelagert und mit Hilfe einer Ansaugpumpe sowie einer Druckerhöhungspumpe zu den Einheiten der Vor- und Hauptbenetzung gefördert. In die Wasserleitung ist ein Druckminderer integriert, um unabhängig vom Wasserdurchfluss einen definierten Wasserdruck sowohl bei der Vorbenetzung als auch bei der Hauptbenetzung zu

A separate dosing and conveying process was chosen for both basic mixtures. Due to the independent subsystems, it is possible to realise the gradation before or during the material application [21]. The principle flow of dosing and conveying is identical for both mixtures and begins with the supply of the dry basic mixtures to the dry spraying machines. In the next step, the material streams are metered by means of controlling the speed of the machine's pocket wheel, which is driven by an asynchronous motor. The pneumatic energy supply for conveying the dry concrete conglomerates is reproducibly ensured by an air valve and monitored with the help of a pressure transmitter and a flow sensor. The dosing of the water for the preliminary and main wetting of the concretes is stored in a tank and conveyed to the wetting units through a suction pump and a booster pump. A pressure reducer is integrated into the water pipe to ensure a defined water pressure independent of the water flow, both during the preliminary and main wetting. The wetting units consist of a valve, a pressure transmitter and a flow sensor, all of which enable the measurement and control of all process-relevant state variables.

gewährleisten. Die Benetzungseinheiten bestehen aus einem Ventil, einem Drucktransmitter und einem Durchflusssensor, damit alle prozessrelevanten Zustandsgrößen gemessen und geregelt werden können.

Die Applikationstechnik wird beim Spritzbeton prinzipiell in die Düsenführungsbewegung und die Düseneigenbewegung unterteilt [14]. Dementsprechend müssen im Rahmen des entwickelten Prozesses die Stellgrößen des Manipulators zur Düsenführungsbewegung (Führungsgeschwindigkeit und Abstand zur Auftragsfläche) und der Düseneigenbewegung (Form, Orientierung und Geschwindigkeit) vollständig automatisiert werden. Um einen rotationsymmetrischen Materialauftrag sicherzustellen und den Rückprall zu minimieren, muss die Ausbringvorrichtung stets in einem Winkel von 90° zur Auftragsfläche orientiert werden. Entsprechend diesen Anforderungen zur Herstellung gradierter Betonbauteile wurde der Manipulator konzipiert. Die Führungsbewegung der Ausbringvorrichtung wird mittels eines Mehrachslinearsystems (Portal) ausgeführt, welches drei Freiheitsgrade und einen quaderförmigen Arbeitsraum ($3,0 \times 2,4 \times 0,8$ m) besitzt. Zur dreidimensionalen Orientierung der Düsen und zur Realisierung von unterschiedlichen Düseneigenbewegungen ist am Portal eine sogenannte Stewart-Gough-Plattform mit sechs Freiheitsgraden montiert. Dadurch sind beliebige und hochdynamische Düseneigenbewegungen realisierbar, ohne die Forderung einer orthogonalen Applikation des Betons auf die Auftragsfläche zu verletzen. Insgesamt besitzt der konzipierte Manipulator neun Freiheitsgrade, wobei durch die Redundanz sowohl eine aufgabenspezifische Trennung von Bewegungen als auch ein energieeffizienter und zeitoptimaler Auftrag der Betone realisiert werden kann. Des Weiteren ist an der Stewart-Gough-Plattform ein Laserdistanzsensor angebracht, welcher die Vermessung der applizierten Spritzbetonschichten ermöglicht.

Ausgehend von der Konzeption der Betonverfahrenstechnik und des Manipulators wurde auf Basis der analytischen Modellierung der

In principle, the shotcrete-application technology can be divided into a guided motion, and a self-motion, of the nozzle [14]. Accordingly, as part of the developed process, the manipulator's control variables for the guided nozzle motion (speed of the guided nozzle motion and the nozzle's distance to the application surface) as well as the nozzle's self-motion (shape, orientation and speed) must become fully automated. To ensure a rotationally symmetric application of the material, while minimizing the rebound, the spreading device must always be oriented at an angle of 90° to the application surface. A manipulator was designed to meet these requirements for the production of functionally graded concrete components. The guided motion of the spreading device is carried out by a multi-axial linear system (gantry) with three degrees of freedom and a cuboid-shaped work area ($3.0 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$). A so-called Stewart-Gough platform with six degrees of freedom is mounted on the gantry for the nozzle's three-dimensional orientation and for the realization of its different self-motions. As a result, any desired, highly dynamic self-motion of the nozzle can be carried out without violating the requirement of an orthogonal application of the concrete on the application surface. The manipulator possesses a total of nine degrees of freedom, with the redundancy enabling both a task-specific separation of the motions as well as an energy-efficient and time-optimal application of the concretes. Furthermore, a laser distance sensor is attached to the Stewart-Gough platform, which enables the measurement of the applied shotcrete layers.

Proceeding from the conception of the concrete technology and the manipulator, the structural design and implementation of the system for the production of functionally graded concrete components was carried out based on the analytical modelling of the subsystems (Fig. 6). Once the production system has been realised, the subsystems must be controlled. On the basis of the control variables, measurement parameters and disturbance variables of the process, control-engineering design models are first identified. Subsequently, suitable con-

Teilsysteme die konstruktive Ausgestaltung und Umsetzung der Herstellungsplattform für gradierte Betonbauteile durchgeführt (Bild 6). Nach deren Realisierung müssen die Teilsysteme unter Berücksichtigung ihrer Interaktion gesteuert und geregelt werden. Auf Basis der Stell-, Mess- und Störgrößen des Prozesses werden zunächst regelungstechnische Entwurfsmodelle identifiziert. Daraus werden geeignete Regelungsmethoden abgeleitet, die eine zielgerichtete Einstellung der Parameter und Zustandsgrößen ermöglichen [13].

5.2 Prozessparameteranalyse (ISYS, ILEK, IWB)

Nachdem die wesentlichen Stell- und Messgrößen definiert und automatisiert regelbar waren, wurden diese zur Sicherstellung einer reproduzierbaren Qualität der gradierten Betonbauteile systematisch analysiert. Hierzu wurde im Rahmen des Projekts eine umfangreiche Prozessparameteranalyse durchgeführt. Ziel war es, die grundlegenden Stellgrößen zu identifizieren und zu evaluieren, welche die Qualität des Spritzbetons im Herstellungsprozess beeinflussen. Für die Analyse wurde ein Versuchsprogramm festgelegt, bei dem sowohl die Charakteristiken des Schichtauftrags mittels Teststreifen als auch die zugehörigen Betoneigenschaften anhand von Prüfkörpern bestimmt wurden (Bild 7). Somit konnten die im Kontext der automatisierten Herstellung zu beurteilenden Stellgrößen und deren Einfluss auf die Zielgrößen (bspw. Rückprall, Förderate, Rohdichte, Festigkeit, Schichtstruktur) bewertet werden. Eine ausführliche Zusammenstellung der Versuchsdurchführung und der Ergebnisse kann [13] und [22] entnommen werden.

Ein zentrales Ergebnis dieser Untersuchungen ist das erreichte und für die Gradierung zur Verfügung stehende Eigenschaftsspektrum der Betone, welches durch die beiden Basismischungen begrenzt wird (Tabelle 2). Der untere Grenzwert ergibt sich aus der Basismischung MII bei einer Betonrohddichte von $1,04 \text{ kg/dm}^3$ und einer zugehörigen Betondruckfestigkeit von $7,60 \text{ N/mm}^2$. Bei der Basismischung MI



Bild 6: Realisierte Herstellungsplattform | Fig. 6: Realized production system

trol methods are derived in order to enable a target-oriented setting of the parameters and state variables [13].

5.2 Analysis of the process parameters (ISYS, ILEK, IWB)

After defining and automating key control variables and measurement parameters, they must be systematically analysed in order to ensure the reproducible production of functionally graded concrete components. In light of this and as part of the project, an extensive analysis of process parameters was carried out. The objective was to identify, evaluate and parameterise fundamental influencing variables that decisively characterise the quality of the shotcrete as well as the production process. In the course of the analysis, an experimental programme was set up in which the characteristics of the layer application were determined by using test strips and the corresponding concrete properties were tested by means of prismatic test specimens (Fig. 7). In this way, it was possible to assess both the control variables of automated production to be evaluated and their influence on the target values (such as rebound, conveying rate, bulk density, strength, layer structure). A detailed summary of the test execution and results can be found in [13] and [22].

A key result of these investigations concerns the range of the concretes' properties achieved and available for gradation, which is limited

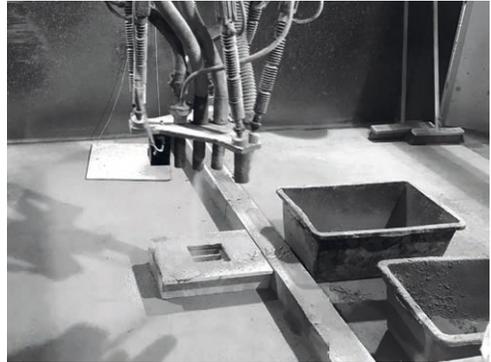
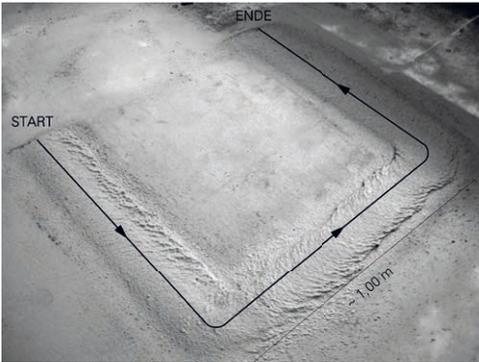


Bild 7: Versuchsablauf bestehend aus einem u-förmigen Spritzstreifen des Materialauftrags (links) und der Herstellung von Probekörpern zur Materialprüfung (rechts) | **Fig. 7:** Experimental setup with u-shaped trajectory (left) and the production of prisms (right)

wird ein oberer Grenzwert von 67,30 N/mm² für die Betondruckfestigkeit bei einer Rohdichte von 2,21 kg/dm³ erreicht. Dabei wurden Druckfestigkeiten an Würfeln mit 40 mm Kantenlänge ermittelt. Mittels des Konzeptes der volumenspezifischen Überlagerung der beiden Basismischungen im Sprühstrahl (Zwei-Düsen-Technologie) konnte erstmals eine stufenlose Gradierung erreicht werden, die den gesamten Übergangsbereich abbildet (Bild 8, links).

Neben den Materialeigenschaften ist die Kenntnis über die Schichtstruktur des Materialauftrags in Abhängigkeit der Prozessparameter zu nennen, als Grundlage für den additiven Fertigungsprozess. Hierzu wurden sogenannte charakteristische Spritzstreifen für unterschiedliche Prozesseinstellungen appliziert und mittels Laser vermessen. Dadurch konnten die Zusammenhänge zwischen Förderrate (Drehzahländerung) und Applikationstechnik bestimmt werden (Bild 8, rechts).

by the two basic mixtures (Table 2). The lower limit for base mixture MII is 1.04 kg/dm³ for the concrete mass density and 7.60 N/mm² for the corresponding concrete compressive strength. With regard to base mixture MI, an upper limit value of 67.30 N/mm² or the concrete compressive strength was achieved at a bulk density of 2.21 kg/dm³. Thereby, compressive strengths were determined on cubes with 40 mm edge length. Through the concept of a volume-specific superposition of the two base mixtures in the spray jet (dual-nozzle technology), it was possible to achieve a continuous gradation that covers the entire transition zone for the first time (Fig. 8, left).

Besides the material properties, the influence of the process parameters on the layer structure could be investigated as a basis for the additive manufacturing process. So-called characteristic spraying strips for different process settings were applied and measured by laser. This made it possible to determine the correlations between feed rate (speed change) and application technology (Fig. 8, right).

Mischung Mixture	Dichte Density ρ [kg/dm ³]	Druckfestigkeit Compressive strength f _{c,cu,40} [N/mm ²]	Zugfestigkeit Tensile strength f _{ctm} [N/mm ²]	E-Modul Young's modulus E [N/mm ²]
MI	2,21	67,30	4,62	35.718
MI	1,04	7,60	1,37	7.754

Tabelle 2: Geprüfte Festbetoneigenschaften der beiden Basismischungen | **Table 2:** Tested concrete properties of the mixtures

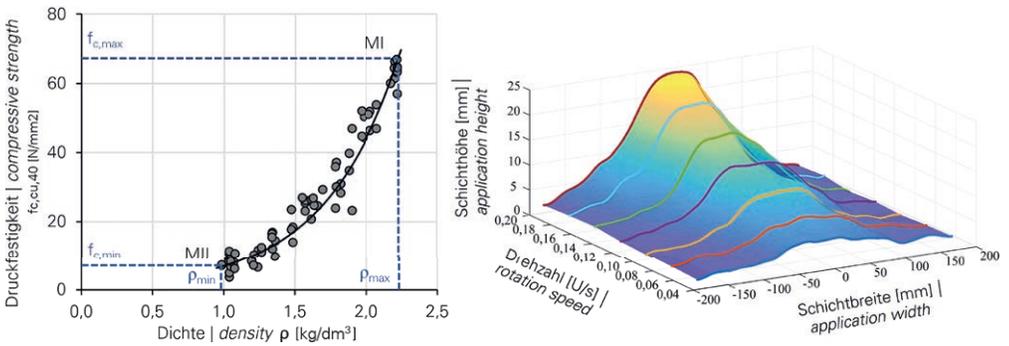


Bild 8: Ergebnisse der Prozessparameteranalyse: Eigenschaftsspektrum (links) und charakteristische Spritzstreifen in Abhängigkeit der Drehzahl (rechts) | **Fig. 8:** Results pursued with the analysis of process parameters: range of concrete properties (left) and characteristic spraying slats depending of the rotation speed (right)

5.3 Prozessleitsystem (ISYS)

Das Prozessleitsystem verknüpft die Planung des Materialauftrags mit der Regelung des Manipulators und der Betonverfahrenstechnik (Bild 9) [13]. Für die schichtweise Herstellung des Bauteils wird das entworfene Gradientenlayout in einem ersten Schritt in Schichten und Zonen unterteilt, deren Größe von der möglichen Auflösung des Materialauftrags abhängt. Anschließend erfolgt entsprechend der tragstrukturellen Anforderungen die Planung des Materialauftrags der einzelnen Zonen einer Schicht. Dabei werden Zonen mit höheren Anforderungen an die Tragfähigkeit priorisiert gegenüber niedriger beanspruchten Bereichen innerhalb einer Schicht.

Eine der Herausforderungen in der Planung des Materialauftrags ergibt sich aus Geometrieun-

5.3 Process control system (ISYS)

The process control system links the planning of the material application with the control of the manipulator and the concrete technology (Fig. 9) [13]. For the layer-by-layer production of the component, the designed graded layout is initially divided into layers and zones, depending on the minimum and maximum material application. The planning of the material application for individual zones of a layer is then carried out in accordance with the structural requirements. Zones with higher requirements on load-bearing capacity are prioritized over areas with lower load-bearing capacity within a layer.

The requirement of planning the material application, and the challenge related to the latter, arise due to the geometrically determined layer and zone structure of the component in

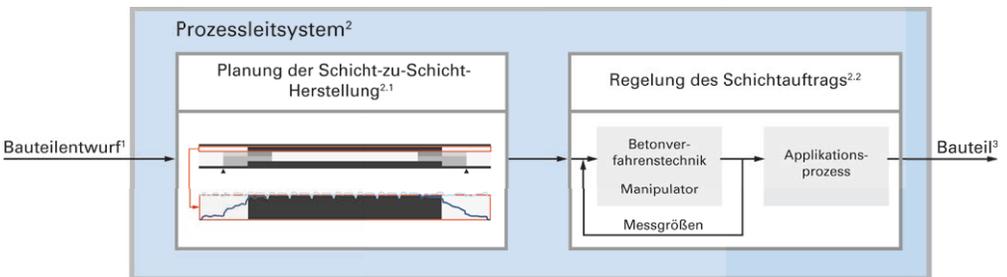


Bild 9: Übergabe des Bauteilentwurfs an das Prozessleitsystem, welches die Eingangsdaten des Bauteilentwurfs verarbeitet und die Prozessparameter zur Bauteilherstellung generiert | **Fig. 9:** Transfer of the component design¹ to the process control², which is planning the layer-by-layer production^{2,1} and controls the application^{2,2} for the component production³

terschieden zwischen Zone und charakteristischem Spritzstreifen. Dies betrifft sowohl die quadratische Form der Zone, welche inkompatibel zum Spritzstreifen ist, als auch die Zonengröße, die oftmals nur durch Superposition mehrerer Spritzstreifen vollständig gefüllt werden kann. Die Zusammenhänge sollen an einem einfachen Beispiel für eine spezifische Prozessparametereinstellung mit entsprechender Struktur des Spritzstreifens erläutert werden (Bild 10). Um die jeweilige Zone einer Schicht vollständig zu materialisieren, wird als Variable nur der Abstand der erforderlichen Anzahl an Bahnen variiert, sodass durch deren Überlagerung der Zonenaufbau entsteht. Wie in Bild 10 zu erkennen, hat dies nicht nur Einfluss auf die Schichtdicke, sondern auch auf die Topografie des Auftrags. So führt die reine Variation des Bahnabstandes bei geringen Zonenhöhen nicht zu einer gleichmäßigen Oberfläche des Materialauftrags. Außerdem bilden sich durch die Superposition unterschiedlich ausgeprägte Übergangsbereiche aus, welche die Planung der angrenzenden Zonen beeinflussen. Diese von den Prozessparametern abhängigen Aspekte können in Optimierungsalgorithmen zur Planung des Materialauftrags berücksichtigt werden. Eine detaillierte Beschreibung hierzu befindet sich sowohl im Buchbeitrag des Folgeprojekts *Effiziente automatisierte Herstellung multifunktionaler gradierter Bauteile mit mineralischen Hohlkörpern* als auch in [13].

comparison to the characteristic formation of the spraying slats occurring during the process. This applies both to the square shape of the zone, which is incompatible with the spray strip, and to the zone size, which can often only be fully filled by superposition of several spray strips. The correlations will be explained by a simplified example, using a specific setting of process parameters the appropriate structure of the spray strip (Fig. 10). To adequately materialize a layer zone, only the strip distance of the required number of strips is varied, so that by superimposing them the zone is created. As illustrated in Fig. 10 this has an influence not only on the layer thickness but also on the topography of the material application. The exclusive variation of the strips distance does not lead to an even surface of the material application at low zone heights. In addition, the superposition forms transition areas with different characteristics, which influence the planning of the adjoining zones. These dependent aspects of the process parameters can be taken into account in optimisation algorithms for the material application. A detailed description is given in the following book contribution of the follow-up project *Efficient Automated Production of Multifunctional Graded Components with Mineral Hollow Bodies* as well as in [13].

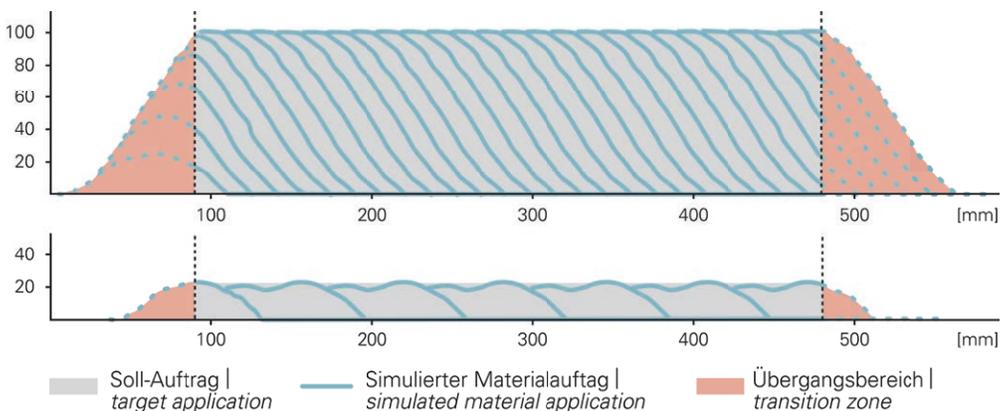


Bild 10: Planung des Materialauftrags für unterschiedliche Schichtdicken durch Variation des Bahnabstandes | Fig. 10: Material application strategy for different layer thicknesses by a variation of the path distance

Aufbauend auf der Planung des Materialauftrags werden alle Stellgrößen der Herstellungsplattform ermittelt. Diese bilden die Grundlage zur Generierung von Trajektorien für die Fertigung, welche die dynamischen Beschränkungen des Mischsystems sowie des Förder- und Applikationsprozesses der Spritzbetone berücksichtigen. Diese Solltrajektorien werden der Regelung des Manipulators und der Betonverfahrenstechnik übergeben, wobei die Erkenntnisse der empirischen Analyse der Prozessparameter in den Regelungsprozess einfließen [13]. Daneben steuert das Prozessleitsystem die Betonverfahrenstechnik sowie den Manipulator unter Berücksichtigung von Sicherheitsfunktionen. Durch die zielgerichtete Regelung der Prozessparameter sowie der Zustandsgrößen werden die Massenströme der Betone und dadurch die aufgetragenen Materialmengen eingestellt. Abschließend kann die Vermessung der hergestellten Oberfläche erfolgen, um die applizierte Spritzbetonschicht zu rekonstruieren. Die Rückführung dieser Daten in die Planung des Materialauftrags darauffolgender Schichten ermöglicht eine Adaption und Optimierung der schichtweisen Herstellung. Mit diesem Ansatz können maschinenbedingte, verfahrensbedingte und umweltbedingte Störgrößen im Produktionsprozess kompensiert werden. Für detaillierte Informationen zur Steuerung und Regelung der Betonverfahrenstechnik sowie des Manipulators sei hier auf [13] verwiesen.

Based on the material application strategy, all control variables are determined for the production system's prototype. These control variables form the basis for generating trajectories for the technology of graded concrete, taking into account both the dynamic limitations of the mixing system as well as the processes for conveying and applying the shotcrete. These target trajectories are delivered to the control of the manipulator and the concrete technology itself, whereby the findings of the empirical analysis of the process parameter's empirical analysis are incorporated into the control process [13]. Besides that, the process control system directs the concrete technology and manipulator, while considering safety functions. The targeted control of process parameters and state variables adjust the mass flows of concretes and thereby also the applied material quantities. Finally, the reconstruction of the applied shotcrete layer is carried out by measuring the produced surface using a laser distance sensor. The feedback of the surface reconstruction into the planning of the material application of subsequent layers enables the adaptation and optimisation of the layer-by-layer production. This approach allows for the compensation of machine-related, process-related and environmental disturbance variables in the production process. For detailed information on the control of the concrete technology and manipulator, please refer to [13].

6 Experimentelle Validierung des Gesamtprozesses

6.1 Probekörper der Versuchsserie (ILEK)

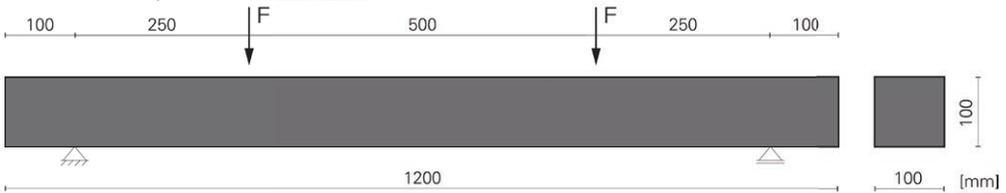
Zur Validierung der gesamten Technologie wurden Bauteile automatisiert hergestellt und deren Tragfähigkeit in 4-Punkt-Biegeversuchen experimentell ermittelt. Die untersuchten Bauteile (Bild 11) besitzen die folgenden Abmessungen: Länge $B_L = 1.200$ mm, Breite $B_B = 100$ mm und Höhe $B_H = 100$ mm. Die Spannweite L beträgt 1.000 mm und die beiden Einzellasten greifen in den Viertelpunkten der Spannweite bei $a = 250$ mm an. Diese Abmessungen und die

6 Experimental validation of the overall process

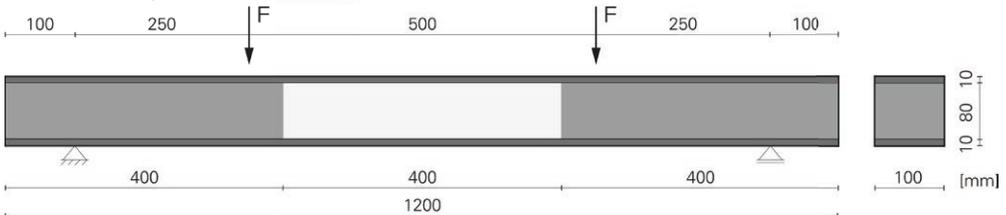
6.1 Specimens of the test series (ILEK)

To validate the potential of the developed overall process, components were automatically produced and their load-bearing capacity was determined experimentally in four-point bending tests. The tested components (Fig. 11) have the following dimensions: overall length $B_L = 1,200$ mm, width $B_B = 100$ mm and height $B_H = 100$ mm. The span length is $L = 1,000$ mm, and the two point loads are applied in the quarter points of the span at $a = 250$ mm. These di-

Referenzlayout | *reference layout (RL)*



Kammerlayout | *chamber layout (KL)*



MI Basismischung I | *mixture I* G50 Gradierung | *gradation* MII Basismischung II | *mixture II*

Bild 11: Probekörpergeometrie und Probekörperlayout | Fig. 11: Geometry and layout of the test specimens

Laststellung ergeben sich aus einer Bauteilskalierung nach [9], wodurch eine flächig belastete Geschossdecke in einen Labormaßstab überführt werden kann.

Die Versuchsserie RL umfasst die Probekörper, die als massiver Vollquerschnitt mit nur einer höherfesten Basismischung MI ausgeführt sind. Diese Serie dient zum Vergleich des Masseinsparpotentials und des Tragverhaltens gegenüber den gradierten Betonbauteilen der Versuchsserie KL. Die Materialverteilung der Serie KL ist aus dem Entwurfsprinzip *design for strength* abgeleitet. Das Kammerlayout besteht aus einer oberen und unteren 10 mm starken Deckschicht zur Aufnahme der Biegebeanspruchung. Die Bewehrung liegt inmitten der unteren Deckschicht. Der Kern ist entsprechend dem Querkraftverlauf in drei abgestuften Zonen aufgebaut. Die beiden äußeren Kammern werden mit der Gradierungsstufe G50 ausgeführt. Dies entspricht einer 50-prozentigen volumenspezifischen Überlagerung beider Basismischungen. Im inneren, querkraftneutralen Bereich des Probekörpers wird die Leichtbetonmischung MII eingesetzt. Die einzelnen Abstufungen weisen eine theoretische Länge von 400 mm und eine Höhe von 80 mm auf. Die Untersuchung zur Biegetragfähigkeit wird mit zwei

mensions and the load position result from a component scaling according to [9], whereby the conversion of an extensively stressed ceiling to laboratory scale can take place.

The RL series include the test specimens, which has been executed as a full cross section consisting of the high-strength base mixture MI. This reference beam serves for the comparison of the mass reduction potential and the load-bearing performance of graded concrete components. The material distribution of the KL series is derived from the design principle *design for strength*. The segmented layout exists of a 10 mm thick upper cover layer, and a corresponding lower cover layer to absorb the bending stress. The reinforcement is located in the middle of the lower cover layer. Corresponding to the shear-force distribution, the core is structured in three graded zones. The two outer segments are executed with gradation level G50. This corresponds to a 50% volume-specific superposition of the base mixtures. The lightweight concrete mixture MII is used in the shear force-neutral zone inside the test specimen. The individual gradations have a theoretical length of 400 mm and a height of 80 mm. Testing of the bending resistance is carried out using two different types of reinforcement. On

verschiedenen Bewehrungsarten durchgeführt. Zum einen kommt eine klassische Stabstahlbewehrung (1 Ø 6 mm) zum Einsatz. Zum anderen wird das Carbonfasergelege Q85/85-CCE-21 der Firma solidian verwendet [23]. Hierbei handelt es sich um ein textiles Gelege mit Carbonfasern und einer Epoxidharztränkung. Aufgrund der hohen Garnzugfestigkeit und der Witterungsbeständigkeit eignen sich Faserverbundbewehrungen besonders gut für den Einbau in dünne Deckschichten. Es stellt sich somit für die Stabstahlbewehrung ein Längsbewehrungsgrad von $\rho_l = 0,28$ und für die textile Bewehrung von $\rho_l = 0,09$ ein. Tabelle 3 fasst nochmals die Bezeichnung der Versuchsserien und den Aufbau der Probekörper zusammen. Jede Serie bestand aus drei Probekörpern.

the one hand, a traditional steel rebar reinforcement (1 Ø 6 mm). On the other hand, the textile reinforcement Q85/85-CCE-21 from solidian is applied [23]. The latter is a planar textile reinforcement that is made of carbon fibres which are impregnated with epoxy resin. Due to the carbon fibres' high tensile strength and corrosion resistance, they are particularly suitable for integration into thin surface layers. The resulting longitudinal degree of reinforcement is $\rho_l = 0.28$ in the case of the rebar reinforcement and $\rho_l = 0.09$ in the case of the textile reinforcement. Table 3 summarized the labelling and the composition of the test specimens. Each series consisted of three test specimens.

Versuchsserie Test series	RL _{SS}	KL _{SS}	TL _{SS}	KL _{CG}
Layout Layout	Referenz Reference		Kammer Chamber	
Beton Concrete	MI			
Bewehrung Reinforcement	Stabstahl	Carbontextil	Stabstahl	Carbontextil
Bewehrungsgrad Degree of reinforcement ρ_l [%]	0,28	0,09	0,28	0,09

Tabelle 3: Bezeichnung und Eigenschaften der Versuchsserien | Table 3: Labeling and properties of the test series

6.2 Bauteilherstellung (ISYS, ILEK, IWB)

Schematisch kann der Herstellungsablauf wie folgt beschrieben werden: Zunächst wird die untere Deckschicht in drei Schritten hergestellt. Im ersten Schritt wird die Hälfte der unteren Deckschicht durch eine in Bauteillängsrichtung verlaufende Trajektorie betoniert. Hierbei wird die Basismischung MI mit den zuvor experimentell bestimmten Systemparametern sowie Zustandsgrößen eingestellt und auf die Schichtdicke von 5 mm adaptiert. Nach dem ersten Schichtauftrag wird die Bewehrung eingelegt und anschließend durch eine weitere 5 mm starke Schicht vollständig in MI eingebettet. Nach Fertigstellung der unteren Deckschicht wird der Kern entsprechend dem vorgegebenen Layout hergestellt. Bei den Probekörpervarianten mit Gradientenlayout wird der Kernbereich zunächst in drei Schichten unterteilt und jede einzelne Schicht nochmals in drei Zonen. Um die Tragfähigkeit des Bauteils zu gewährleisten,

6.2 Component production (ISYS, ILEK, IWB)

The production process can be described according to the following scheme: Initially, the lower surface layer is produced in three steps. In the first step, half of the lower surface layer is concreted in the longitudinal direction of the component and in accordance with the planned trajectory. The base mixture MI is adjusted to the system parameters and state variables, which have been determined in prior experiments, and adapted to the layer thickness of 5 mm. Following the application of the first layer, the reinforcement is inserted and completely embedded in the dense-texture normal concrete by means of a further 5 mm thick layer. Once the lower surface layer has been completed, the core is produced pursuant to the defined layout. In the test-specimen variants with graded layout, the core zone was initially subdivided into three layers, and each individual layer was further subdivided into three zones. To prevent

erfolgt bei jeder Schicht in einem ersten Schritt die Herstellung der gradierten Zonen (G50). Anschließend werden die Zonen mit der Basismischung MII aufgefüllt. In beiden Fällen wird das Material senkrecht zur Bauteillängsrichtung appliziert. In einem letzten Betoniervorgang wird die obere 10 mm starke Deckschicht aus MI hergestellt.

any negative effect on the load-bearing capacity of the component, each layer is made by primary producing the graded zones (G50), before applying the base mixture MII to the zones. In both cases the material is applied perpendicular to the longitudinal direction of the component. Finally, the 10 mm thick surface layer of MI is applied.

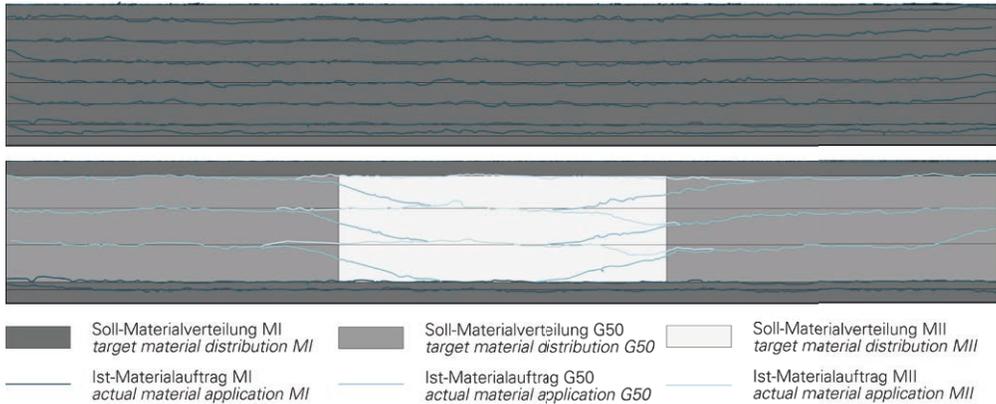


Bild 12: Gegenüberstellung von Soll-Materialverteilung und gemessenem Schichtauftrag je eines Probekörpers der Versuchsserien RL (oben) und KL (unten) | **Fig. 12:** Comparison of the target material distribution with the measured material application of one test specimen each of series RL (top) and KL (bottom)

Die vermessenen Schichtstrukturen verdeutlichen, dass mittels des entwickelten automatisierten Prozesses gradierte Bauteile entsprechend den vorgegebenen Anforderungen geplant und reproduzierbar hergestellt werden können (Bild 12). In diesem Kontext werden nochmals die Herausforderungen bei der Planung des Materialauftrags in den Übergangsbereichen der Zonen des Kammerlayouts ersichtlich. Des Weiteren zeigen die Vermessungen den Einfluss des Schalungssystems auf die Ausbildung der Schichtstruktur. An den Schalungsändern wird aufgrund der dort auftretenden Strömungsturbulenzen unerwünschter Rückprall mit eingebaut und erhöht den Materialauftrag. Diesen Problematiken muss in der weiteren Forschung durch eine Optimierung des Materialauftrags sowie der Zustandsgrößen des Herstellungsprozesses begegnet werden [13].

The measured layer structures illustrate that the developed automated process enables the planning and reproducible production of graded components in accordance with the specified requirements (Fig. 12). In this context, the challenges involved in planning the material application in the transition zones of the segmented-layout zones become once more apparent. Furthermore, the measurements show the formwork system's influence on the formation of the layer structure. Unwanted rebound is installed at the edges of the formwork and increases the material application due to the flow turbulence occurring there. Further research will have to address these issues by optimizing the material application and the state variables in the production process [13].

6.3 Versuchsdurchführung und Ergebnisse (ILEK)

In Bild 13 ist die Versuchseinrichtung des 4-Punkt-Biegeversuchs dargestellt. Die Lastaufbringung erfolgt weggesteuert mit einer Traversengeschwindigkeit von 0,1 mm/s. Mit dem integrierten Kraftsensor wird die Prüfkraft aufgezeichnet. Aus der Kraftmessung ergibt sich das erste Abbruchkriterium für das Versuchsende, welches als Lastabfall von 60 % definiert ist. Des Weiteren werden der Traversenweg sowie die Relativverschiebung in Balkenmitte durch jeweils einen induktiven Wegaufnehmer je Seite gemessen. Aus der maximalen Messlänge der Wegaufnehmer ergibt sich das zweite Abbruchkriterium, welches die Relativverschiebung von 18 mm darstellt.

6.3 Experimental procedure and results (ILEK)

Fig. 13 shows the test setup of the four-point bending test. The load is applied in a path-controlled manner and at a traverse speed of 0.1 mm/sec; an integrated force sensor recorded the test force. As a result of the force measurement, the first termination criterion for ending the test is defined, by a load drop of 60%. Moreover, measurements of the traverse path and the relative displacement at the centre of the beam are taken by using one inductive displacement transducer per side. The maximum allowed measuring length of the displacement transducers results in the second termination criterion, a relative displacement of 18 mm.



Bild 13: Versuchseinrichtung | Fig. 13: Test setup

Die Ergebnisse der 4-Punkt-Biegeversuche werden im Folgenden exemplarisch für die stahlbewehrten Probekörper dargestellt. Die Versuche werden hinsichtlich ihres Kraft-Verformungsverhaltens und der Versagensform ausgewertet (Bilder 14 und 15 und Tabelle 4). Bei der Versagensform wird aufgrund der versagensauslösenden Beanspruchung zwischen Biege- oder Querkraftversagen unterschieden. Sowohl bei den gradierten Probekörpern mit Kammerlayout als auch den Referenzbauteilen tritt ein Biegeversagen auf. Dieses ist gut an den senkrecht zur Bauteilunterkante verlaufenden Biegerissen zu erkennen (Bild 14). Die Auslegung des gradierten Kernbereiches erfüllt damit die Anforderungen der Querkrafttragfähigkeit ohne zusätzliche Querkraftbewehrung und bestätigt den vorgestellten Ansatz zur Materialverteilung.

The results of the four-point bending test are presented in the following, by taking the steel-reinforced test specimens as an example. The tests are evaluated with regard to the mode of failure and their deformation behaviour when subjected to force (Figs. 14 and 15, Table 4). Modes of failure that occur in test specimens after they had been subjected to the failure-triggering stress can be divided into bending failures and shear-force failures. Bending failures occurred in both, the graded test specimens with segmented layout and the reference components. These failures can be easily recognised in the bending cracks running perpendicular to the bottom side of the component's cross-section (Fig. 14). The design of the graded core zone thus fulfils the requirements of shear-force bearing capacity and confirms the developed design approach.



Bild 14: Abgeschlossene Rissverteilung zweier stahlbewehrter Probekörper, Versuchsserien RL_{SS} und KL_{SS} | **Fig. 14:** Final crack distribution of a steel reinforced test specimen for the series RL_{SS} and KL_{SS}

Grundsätzlich zeigen sowohl die gradierten als auch die massiven Betonbauteile das typische Kraft-Verformungsverhalten eines stahlbewehrten Betonbauteils unter Biegebeanspruchung (Bild 15). Zunächst ist ein linear elastisches Verhalten bis zur Erstrisslast (Zustand I) zu erkennen, gefolgt von der Rissphase bis

In general, both the graded and the solid concrete components exhibit the typical force-displacement behaviour of a steel-reinforced concrete component subjected to bending stress (Fig. 15). Initially, a linear elastic behaviour can be observed up to the cracking load (State I), which is followed by the cracking phase until

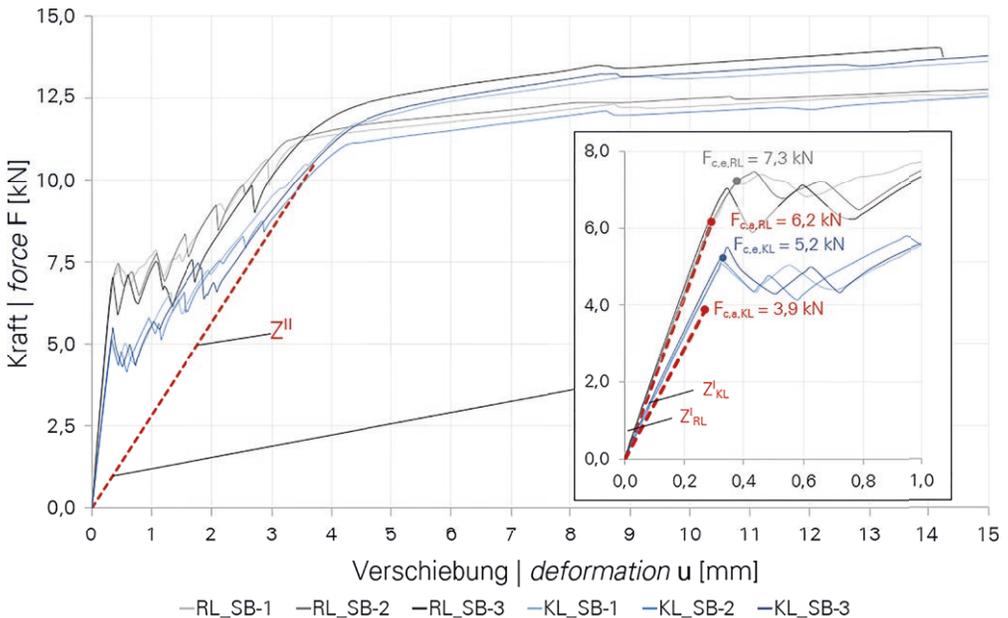


Bild 15: Kraft-Verformungsdiagramm der stahlbewehrten Versuchsserie RL_{SS} (grau) und KL_{SS} (blau); in Rot sind die analytisch berechneten Kraft-Verformungsbeziehungen im Zustand I und Zustand II dargestellt | **Fig. 15:** Force displacement diagram of the steel reinforced test specimen RL_{SS} (grey) and KL_{SS} (blue), the red lines display the analytically calculated force-deformation relationships in the not cracked state I and fully cracked state II

zum Erreichen der Fließlast in der Bewehrung (Zustand II) und dem abschließenden Zustand III, bei dem der Bewehrungsstahl bei geringer Laststeigerung und großer Verformung zu fließen beginnt [24]. Das gradierte Betonbauteil unterscheidet sich vom massiven Bauteil lediglich im Betrag von Kraft und Verformung in den einzelnen Zuständen.

Im Zustand I weisen die Versuchsergebnisse der Serie RL ein linear elastisches Kraft-Verformungsverhalten auf, das mit dem berechneten Verhalten übereinstimmt. Versuch und Berechnung unterscheiden sich lediglich in der Höhe der Erstrisslast. Dabei liegt die mittlere Erstrisslast der Versuche mit $F_{c,e,RL} = 7,3$ kN rund 15 % über der rechnerisch ermittelten Erstrisslast von $F_{c,a,RL} = 6,2$ kN. Bei den gradierten Bauteilen der Serie KL unterschreiten sowohl die rechnerisch ermittelte Biegesteifigkeit im Zustand I als auch die rechnerische Erstrisslast die Versuchswerte. Die Biegesteifigkeit des gradierten Bauteils, welche aus dem E-Modul und dem Flächenträgheitsmoment resultiert, kann nach [25] an einem äquivalenten Querschnitt bestimmt werden. Hierbei wird der gradierte Rechteckquerschnitt durch die Reduktionszahl $n = E_{MII} / E_{MI}$ in einen "I"-Querschnitt aus dem härtesten Beton überführt. Für eine über die Bauteillänge gemittelte Biegesteifigkeit des Kammerlayouts ergibt sich eine rechnerische Erstrisslast von $F_{c,a,KL} = 3,9$ kN, die in den Versuchen um ca. 30 % mit einer mittleren Erstrisslast von $F_{c,e,KL} = 5,2$ kN überschritten wurde. Die höheren Ergebniswerte in den Versuchen können u. a. auf die Schicht-zu-Schicht-Herstellung zurückgeführt werden. Wie bereits aus den vermessenen Schichtstrukturen bekannt ist, wird in den Übergangsbereichen der Zonen ein größerer Anteil der Gradierungsstufe eingebaut. Ein Vergleich des tatsächlichen Gewichts der Probekörper der Versuchsserie KL mit $m_{ist} = 21,7$ kg gegenüber dem Sollgewicht aus dem Entwurf von $m_{soll} = 19,1$ kg bestätigt dies. Der größere Anteil der Gradierungsstufe im Bauteil führt, aufgrund seiner höheren Festigkeit und seines höheren E-Moduls gegenüber der Basismischung MII, zu einem verbesserten Kraft-Verformungsverhalten im Zustand I.

reaching the yield point in the steel reinforcement (State II); in the final State III, the reinforcing steel starts yielding at low stress increase and large deformation [24]. However, the graded concrete component differs from the solid component merely in the magnitude of force and deformation in the single states.

In state I, the test results of the series RL show a linear elastic force-deformation behaviour which matches the calculated behaviour. Test and calculation differ only in the load magnitude of the first crack. The average cracking load in the test of $F_{c,e,RL} = 7.3$ kN is about 15% higher than the calculated cracking load of $F_{c,a,RL} = 6.2$ kN. For the graded components of the series KL, both the calculated bending stiffness in state I and the calculated initial crack load are lower than the test values. According to [25], the graded component's bending stiffness, resulting from the Young's modulus and the area moment of inertia, can be determined at an equivalent cross section. For this purpose, the graded rectangular cross section is converted by the reduction number $n = E_{MII} / E_{MI}$ into an I-shaped cross section made of high-strength concrete. For an average bending stiffness of the components with the chamber layout, a calculated crack load of $F_{c,a,KL} = 3.9$ kN is obtained, which was exceeded in the tests by approx. 30% with an average cracking load of $F_{c,e,KL} = 5.2$ kN. The increased test results can be partly attributed to layer-to-layer production. As already known from the measured material application, a higher amount of G50 is incorporated in the transitional zones of the component's segments. A comparison of the test specimens' weight of the KL test series with $m_{actual} = 21.7$ kg with the target weight from the design of $m_{target} = 19.1$ kg confirms this. The higher content of G50 in the component leads to an improved force-deformation behaviour in state I due to its higher strength and its higher Young's modulus compared to the base mixture MII.

Following the initial cracking, in state IIa, further cracks occur. In between these cracks, the concrete initially still absorbs tensile force

Nach der Erstrissbildung treten im Zustand IIa weitere Risse auf, zwischen denen der Beton zunächst noch Zugkräfte übernimmt. Die Rissbildung ist bei beiden Serien gekennzeichnet durch vier bis fünf ausgeprägte Einzelrisse und endet bei einer Durchbiegung von etwa 2 mm. Danach nähert sich das Kraft-Verformungsverhalten im Zustand IIb bis zur Kraft von ca. 11,5 kN dem reinen Zustand II an. Aufgrund der identischen Bewehrungseigenschaften beider Versuchsserien und der vergleichbaren Position der Druckresultierenden im Bauteil stellt sich ein paralleler Verlauf zwischen dem experimentellen Kraft-Verformungsverhalten und dem reinen Zustand II ein. Nach der abgeschlossenen Rissbildung übernimmt die Stahlbewehrung die gesamte Zugkraft und beginnt zu fließen. Es wird im Mittel eine Prüflast von rund 13,50 kN beim Abbruchkriterium der maximal zulässigen Durchbiegung von 18 mm erreicht.

es. In both test series, the cracking is characterised by four to five pronounced individual cracks, ending at a deflection of about 2 mm. Subsequently, the force-displacement behaviour in state IIb approaches the pure State II up to a force of approximately 11.5 kN. Due to the identical reinforcement properties and the comparable position of the pressure resultant in the components of both test series, a parallel course is established between the experimental force-displacement behaviour and the pure State II. Once the cracking has been completed, the steel reinforcement assumes the entire tensile force and begins to yield. On reaching the second termination criterion, mean test load of around 13.5 kN is achieved by a maximum permissible deflection of 18 mm.

Versuchsserie Test series	RL _{SS}	KL _{SS}
Erstrisslast First crack force F_{ce} [kN]	7,29	5,24
Prüfkraft Load at failure F_{max} [kN]	13,22	13,67
Max. Moment Moment at failure M_{uV} [kNm]	1,65	1,71
Versagensart Failure mode	Biegeversagen Bending failure	
Probekörpermasse Specimen's mass m_{ist} [kg]	0,28	0,09

Tabelle 4: Gemittelte Prüfergebnisse der stabstahlbewehrten Versuchsserien RL_{SS} und KL_{SS} | **Table 4:** Mean values of the experimental test results of the steel reinforced test series RL_{SS} and KL_{SS}

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Einführung des Gradientenbetons in das Bauwesen erfordert die Erforschung und Entwicklung von geeigneten Entwurfs-, Berechnungs- und Herstellungsverfahren. Diese Aspekte konnten im Rahmen des vorstehend beschriebenen Projekts erfolgreich erforscht werden. Die Ergebnisse der Forschung mündeten in eine automatisierte Herstellung von mikrogradierten Betonbauteilen, die gegenüber herkömmlichen Betonbauteilen eine deutliche Gewichtsreduktion bei gleicher Tragfähigkeit aufweisen.

Auf Basis unterschiedlicher Verfahrenskonzepte zur Herstellung von gradierten Betonbauteilen wurde durch Voruntersuchungen

7 Summary and outlook

The introduction of graded concrete into the building sector requires the research and development of appropriate design, calculation and manufacturing methods. These tasks have been successfully explored within the framework of the project described above. The results of the research led to an automated production of micro-graded concrete components, which show a significant weight reduction compared to conventional concrete components while maintaining the same load-bearing capacity.

Based on varying process concepts for the production of graded concrete components, preliminary research conducted as part of the project led to the identification of the useful ap-

innerhalb des Projekts der Ansatz der volumenspezifischen Überlagerung zweier dichteanpassbarer Betongemische im Gradienten-Trockenspritzverfahren als zielführend identifiziert und deshalb erforscht. Hierzu wurden zwei Betonmischungen bereitgestellt, von denen eine Basismischung MI die Tragfähigkeit sicherstellt und eine Basismischung MII die Gewichtsreduktion ermöglicht. Für die Bestimmung der idealen Verteilung des Materials im Inneren des Bauteils konnten zwei grundlegende Entwurfsprinzipien auf Spannungs- und Verformungsniveau formuliert werden. Zur automatisierten Herstellung der entworfenen Gradientenlayouts wurde eine Plattform bestehend aus Manipulator und Betonverfahrenstechnik konzipiert und realisiert. Die prozessdeterminierenden Zustandsgrößen sowie Parameter wurden analysiert und können mithilfe des Prozessleitsystems zielgenau eingestellt werden. Abschließend konnten mit diesem Prozess gradierte Betonbauteile in reproduzierbarer Qualität hergestellt und experimentell geprüft werden. Die empirische Analyse an skalierten Bauteilen zeigt, dass mit diesem Technologiestand Masseneinsparungen von über 20 % bei gleichbleibender Tragfähigkeit erreicht werden.

Das Ziel der weiteren Forschung an den Instituten liegt in der systematischen und ganzheitlichen Entwicklung sowie der Effizienzsteigerung der Gradientenbetontechnologie. Hierzu müssen die Teilaspekte der Betontechnologie, des Bauteilentwurfs und der automatisierten Herstellung in einen interagierenden Gesamtprozess überführt werden. Neben der Erweiterung des Eigenschaftsspektrums durch eine gezielte Mischungsentwicklung unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte können durch den Einsatz mineralischer Hohlkörper neue Potentiale und Anwendungsgebiete für die Technologie erschlossen werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 213554648 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

proach of volume-specific superposition of two density-adjustable concrete mixtures in the graded dry-spraying procedure and hence, research was conducted into this matter. For this purpose, two concrete mixtures were provided, with a base mixture MI ensuring load-bearing capacity and a base mixture MII enabling weight reduction. To determine the ideal distribution of the material within the component, two basic design principles were formulated. On the one hand a stress related design principle and on the other hand a deformation related one. For the automated production of the designed graded layouts, a system consisting of a manipulator and concrete technology was planned and implemented. The process-determining parameters were analysed and, with the help of the process control system, precisely adjusted. In this way, functionally graded concrete components could be manufactured in reproducible quality and tested experimentally. The empirical analysis of scaled components indicates that the technology achieves mass reductions of more than 20%, while the load-bearing capacity remains constant.

The goal of further research to be conducted at the institutes involved at the University of Stuttgart is to systematically and holistically advance and improve the efficiency of the technology of graded concrete. For this purpose, the individual aspects of concrete technology, component design and automated production have to be converted into an overall process in which these aspects interact with each other. In addition to the expansion of the range of properties by means of a targeted development of mixtures under consideration of ecological aspects, the use of mineralized hollow bodies can establish new potentials and areas of application for the technology.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (number 213554648) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Sobek, W.: Die Zukunft des Leichtbaus: Herausforderungen und mögliche Entwicklungen. *Bautechnik* 92 (2015) 12, S. 879–882 – DOI: 10.1002/bate.201500093
- [2] Curbach, M.: Bauen für die Zukunft. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 11, S. 751 – DOI: 10.1002/best.201390098
- [3] Bever, M. B.; Duwez, P. E.: Gradients in composite materials. *Materials Science and Engineering* 10 (1972) 1, S. 1–8 – DOI: 10.1016/0025-5416(72)90059-6
- [4] Yamanouchi, M.; Koizumi, M.; Hirai, T.; Shiota, I. (Hrsg.): Proc. of the First Int. Symp. on Functionally Graded Materials – FGM '90, 08.–09.10.1990 in Sendai (Japan), Tokio: FGM Forum, 1990
- [5] Kieback, B.; Neubrand, A.; Riedel, H.: Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering A* 362 (2003) 1–2, S. 81–105 – DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00578-1
- [6] Rödel, J.; Guthmann, O.; Kastening, B.; Reller, A.; Knechtel, M.: Verfahren zur Herstellung von Gradientenwerkstoffen. Patent DE 4435 146 A1, 04.04.1996
- [7] Sobek, W.: Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume. In: Scheerer, S.; van Stipriaan, U. (Hrsg.): Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2016, S. 62–76
- [8] Heinz, P.; Herrmann, M.; Sobek, W.: Herstellungs- und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen. Schlussbericht, Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 2811, Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2011
- [9] Herrmann, M.; Sobek, W.: Entwicklung gewichtsoptimierter funktional gradierter Elementdecken. Schlussbericht, Forschungsinitiative Zukunft Bau; F 2945, Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2014
- [10] Thienel, K.-C.: Werkstoffe des Bauwesens – Leichtbeton. Vorlesungsskript, Neubiberg: Universität der Bundeswehr München, 2006
- [11] Wörner, M.; Schmeer, D.; Schuler, B.; Pfänder, J.; Garrecht, H.; Sawodny, O.; Sobek, W.: Gradientenbetontechnologie: von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 12, S. 794–805 – DOI: 10.1002/best.201600056
- [12] Fromm, A.: 3-D-Printing zementgebundener Formteile: Grundlagen, Entwicklung und Verwendung. Kassel: Kassel University Press, 2014
- [13] Wörner, M.: Automatisierte Herstellung funktional gradierter Betonbauteile. Diss., Universität Stuttgart, erschienen im Shaker-Verlag, 2017
- [14] Maidl, B.: Handbuch für Spritzbeton. Berlin: Ernst & Sohn, 1992
- [15] Sippel, T. S.; Reinhardt, H.-W.: Mischungsentwicklung für funktional gradierten Betonbau. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): *Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1*, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 162–167 – <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171477>
- [16] Wolf, C.; Herrmann, M.; Haase, W.; Sobek, W.: Entwurf und Herstellung von Optimalstrukturen aus funktional gradiertem Beton. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): *Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1*, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 112–121 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171424>
- [17] Harzheim, L.: *Strukturoptimierung: Grundlagen und Anwendungen*. 2. Aufl., Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer, 2014
- [18] Herrmann, M.: *Gradientenbeton – Untersuchungen zur Gewichtsoptimierung einachsiger biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile*. Diss., Universität Stuttgart, 2015
- [19] Bendsøe, M. P.; Sigmund, O.: *Topology optimization: theory, methods, and applications*. 2. Aufl., Berlin: Springer, 2004
- [20] Schmeer, D.; Herrmann, M.; Wörner, M.; Sippel, S.; Sawodny, O.; Garrecht, H.; Sobek, W.: Entwurf und automatisierte Herstellung von Bauteilen aus funktional gradiertem Beton. In: Garrecht, H.; Hofmann, J.; Sobek, W.; Novák, B. (Hrsg.): *Beiträge zur 3. DAfStb-Jahrestagung mit 56. Forschungskolloquium, 11./12.11.2015 an der Universität Stuttgart*, Stuttgart, 2015, S. 15–22
- [21] Wörner, M.; Sawodny, O.: Automatisierte Herstellung funktional gradierter Betonbauteile. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): *Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1*, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 168–175 – <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171483>
- [22] Wörner, M.; Sippel, S.; Schmeer, D.; Garrecht, H.; Sobek, W.; Sawodny, O.: Automated Spraying of Functionally Graded Concrete Components – Analysis of the Process Parameters. In: KIVI (Hrsg.): *Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande)*, 2015, Beitrag Nr. IASS2015-501665, publ. auf USB stick, 13 S.
- [23] solidian GmbH: Technisches Datenblatt solidian GRID Q85/85-CCE-21, Version 170726GN vom 26.07.2017 – URL: https://www.solidian.com/fileadmin/user_upload/pdf/TDS/170726_GN_TDS_EX_GRID_Q85_CCE_21.pdf (abgerufen am 27.02.2018)
- [24] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: *Bemessung im konstruktiven Betonbau: nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2)*. 2. Aufl., Berlin: Springer, 2010
- [25] Herrmann, M.; Haase, W.: Tragverhalten biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile aus funktional gradiertem Beton. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 6, S. 382–394 – DOI: 10.1002/best.201300017

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1 [11], 2, 4, 11 [20], 13–15: Daniel Schmeer
- Bild | Picture 3 links | left [15], rechts | right [16]: Gabriela Metzger
- Bilder | Pictures 5, 6 [21], 9, 10, 12 nach | acc. to [20]: Mark Wörner
- Bilder | Pictures 7, 8: Daniel Schmeer, Mark Wörner
Bereits publizierte Bilder wurden meist gegenüber der Originalquelle modifiziert. | Already published pictures were mostly modified compared to the original source.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen – Entwurf, Berechnung und automatisierte Herstellung | Optimal structures made of functional graded concrete – design, dimensioning and automated production

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek Institutsleiter Director of the institute
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	SO 365/14-1 (Projektnummer Project number: 213554648)
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Pfaffenwaldring 7+14, 70569 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685-6 6226/-6 3599 werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de http://www.uni-stuttgart.de/ilek/
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny Institutsleiter Director of the institute
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	SA 847/14-1 (Projektnummer Project number: 213554648)
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik (ISYS), Waldburgstraße 17/19, 70563 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685-66302 oliver.sawodny@isys.uni-stuttgart.de https://www.isys.uni-stuttgart.de/
Antragsteller 3 Applicant 3:	Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt Geschäftsführender Direktor i.V. Managing director
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	RE 691/38-1 (Projektnummer Project number: 213554648)
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685-63323 reinhardt@iwb.uni-stuttgart.de http://www.iwb.uni-stuttgart.de/
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	01.05.2012–31.04.2015
Team Team:	Michael Herrmann (ILEK, 05/2012–09/2014) Mark Wörner (ISYS) Sören Sippel (IWB) Jan Mittelstädt (ILEK, 05/2012–03/2014) Claudia Wolf (ILEK, 07/2014–04/2015) Walter Haase (ILEK) Alexander Assmann (IWB, 11 und 12/2012)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Herrmann, M.; Haase, W.: Tragverhalten biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile aus funktional gradiertem Beton. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 6, S. 382–394
- Herrmann, M.; Mittelstädt, J.; Wörner, M.; Sippel, S.; Sobek, W.; Sawodny, O.; Reinhardt, H.-W.: Precast components made from functionally graded concrete. *Concrete Plant International* (2013) 6, S. 44–49
- Herrmann, M.; Mittelstädt, J.; Wörner, M.; Sippel, S.; Sobek, W.; Sawodny, O.; Reinhardt, H.-W.: Optimalstrukturen aus funktional gradiertem Beton – Entwurf, Berechnung und automatisierte Herstellung. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium in Bochum, 07./08.11.2013, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 41–46
- Wolf, C.; Herrmann, M.; Haase, W.; Sobek, W.: Entwurf und Herstellung von Optimalstrukturen aus funktional gradiertem Beton. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 112–121 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171424>
- Sippel, T. S.; Reinhardt, H.-W.: Mischungsentwicklung für funktional gradierten Betonbau. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 162–167 – <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171477>
- Wörner, M.; Sawodny, O.: Automatisierte Herstellung funktional gradierter Betonbauteile. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 168–175 – <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171483>
- Wörner, M.; Sippel, S.; Schmeer, D.; Garrecht, H.; Sobek, W.; Sawodny, O.: Automated Spraying of Functionally Graded Concrete Components – Analysis of the Process Parameters. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the Int. Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), 2015, Beitrag Nr. IASS2015-501665, publ. auf USB stick, 13 S.
- Wörner, M.; Schmeer, D.; Schuler, B.; Pfänder, J.; Garrecht, H.; Sawodny, O.; Sobek, W.: Gradientenbetontechnologie: Von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 12, S. 794–805
- Wörner, M.; Schmeer, D.; Schuler, B.; Sawodny, O.; Sobek, W.: The technology of graded concrete – Interface between design and manufacturing. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU & IASS, 2017, book of abstracts: S. 153, full paper published digitally: paper no. 9601, 8 S.

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertationen | Dissertations

- Herrmann, M.: Gradientenbeton – Untersuchungen zur Gewichtsoptimierung einachsiger biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile. ILEK, 2015
- Wörner, M.: Automatisierte Herstellung funktional gradierter Betonbauteile. ISYS, 2017

Studienarbeiten | Student's research projects

- Haiati, O.: Untersuchung des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens von unterschiedlichen Mörtelmischungen. Bachelorarbeit, IWB, 2013
- Lasi, A.: Einsatz von granulierter pyrogener Kieselsäure als Leichtzuschlag für Gradientenbeton-Kernmischungen. Bachelorarbeit, IWB, 2013
- Gienger, A.: Mehrkriterielle Optimierung eines elektrisch angetriebenen Hexapods. Bachelorarbeit, ISYS, 2014
- Schwanda, S.: Entwicklung einer zerstörungsfreien Werkstoffprüfung an gradierten Betonbauteilen mittels Ultraschallmessungen. Masterarbeit, IWB, 2014

- Wettersten, C.: Planning and implementation of motion trajectories at the example of a Stewart-Gough-Plattform. Stuttgart University Program for Experiencing Research ISYS, 2014
- Bratukha, M.: Planning Motion Trajectories for a 3D Printer's Nozzle. Diplomarbeit, ISYS, 2015
- Liu, X.: Untersuchungen zur Regelung einer elektrisch angetriebenen Stewart-Gough-Plattform. Studienarbeit, ISYS, 2015
- Schmeer, D.: Experimentelle Untersuchung automatisiert hergestellter Bauteile aus funktional gradiertem Beton. Masterarbeit, ILEK, 2015

Patent | Patent

- DE 10 2011 102 337 A1: Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen von Bauteilen mit zumindest einer kontinuierlichen Eigenschaftsänderung. Anmelder: Sobek, W.; Offenlegungstag: 29.11.2012

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Effiziente automatisierte Herstellung multifunktionaler gradierter Bauteile mit mineralischen Hohlkörpern | Efficient automated Production of multifunctional graded components with mineral hollow bodies

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 1542
Laufzeit Period:	05/2015–06/2018

- Multifunktional gradierte Bauteile für das nachhaltige Bauen mit Beton – Automatisierte Prozesskette zur Realisierung einer wirtschaftlichen Herstellung | Multifunctional graded components for sustainable construction with concrete – Automated process chain for the realization of an economic production

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 1542
Laufzeit Period:	05/2015–06/2018

Teil 2 | Part 2



**Demonstratoren und
Anschlussprojekte |**

**Demonstrators and
follow-up projects**

uni-con² – universal concrete construction

► Daniel Busse¹, Lukas Ledderose²

► ¹ Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, FG Massivbau, TU Braunschweig

► ² Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig

1 Einleitung

Die Umsetzung der Ziele des DFG-Schwerpunktprogramms (SPP) 1542 „Leicht Bauen mit Beton – Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien“ erfordert eine Anpassung grundlegender, im Stahlbetonbau etablierter Konstruktionsformen. Ein Beispiel hierfür ist die Stahlbetonskelettbauweise. Aktuelle Konstruktionen weisen klare Strukturen aus Stützen, Unterzügen und Decken, im Regelfall mit rechteckigen, über die Bauteillänge konstanten Querschnitten auf. Um diese typischen Konstruktionen zu optimieren, können die im Rahmen des SPP 1542 an der TU Braunschweig entwickelten Bauteil-, Füge- und Herstellungstechnologien genutzt werden.

Um dies exemplarisch zu zeigen, wurde der Demonstrator uni-con² entwickelt und hergestellt. Der Demonstrator stellt einen Ausschnitt eines innovativen Tragwerks aus Hochleistungsbeton dar, das aus Platten- und Stabelementen, die nach dem Prinzip „form follows force“ an die einwirkenden Beanspruchungen angepasst werden, zusammengesetzt wird (Bild 1). Die vorgefertigten Elemente werden trocken gefügt. So kann der Aufbau beschleunigt und eine direkte Belastung ermöglicht werden. Die Verwendung von Trockenfugen erfordert eine hohe Präzision bei der Herstellung der Bauteile. Dies kann durch den Einsatz von hochpräzise hergestellten Schalungen sichergestellt werden. Der symmetrische Aufbau der Tragkonstruktion sowie die gleichbleibenden Spannweiten ermöglichen die multiple Verwendung der komplexen Schalungen. In Kombination mit der Reduktion des Zementverbrauchs ermöglicht dies zudem die Einsparung von natürlichen Ressourcen und Energie.

1 Introduction

The implementation of the objectives of the DFG Priority Programme (SPP) 1542 “Concrete light – Future concrete structures using bionic, mathematical and engineering formfinding principles” requires the modification of fundamental structural forms established in reinforced concrete construction. An example of this is the reinforced concrete framework construction. Current constructions show distinct structures consisting of columns, beams and slabs, usually having rectangular cross-sections that are constant over the entire length of the component. In order to optimise these standard structures, the construction, joining and manufacturing technologies developed within the scope of SPP 1542 at Technical University (TU) Braunschweig can be used.

The demonstrator uni-con² was developed and manufactured to exemplify this. The demonstrator represents a cutout of an innovative load-bearing structure made of high-performance concrete, which is composed of slab and beam elements designed according to the “form follows force” principle and adapted to the relevant stresses (Fig. 1). The prefabricated elements are joined dry. In this way the assembly can be accelerated and a direct loading can be made possible. The use of dry joints requires high precision in the production of the components. This can be achieved by high precision formwork. The symmetrical configuration of the structure and the constant spans allow the multiple use of the complex formwork. In combination with the reduction of cement consumption, this also enables the saving of natural resources and energy.

2 Umsetzung

Um den Demonstrator herstellen zu können, wurden folgende im Rahmen des SPP 1542 an der TU Braunschweig untersuchte Bauteil-, Füge- und Herstellungstechnologien genutzt:

- Für die Stütze wurden die im Projekt „Ultraleichte, dünnwandige Betonhohlbauteile“ entwickelten Betonhohlbauteile mit nur 30 mm Wandstärke bei einem Stützendurchmesser von 150 mm verwendet. Für die Bauteile wurde ein hochfester, selbstverdichtender Feinkornbeton basierend auf der Bindemittelmischung *Flowstone* verwendet. Die Stützen wurden mit einer mehrlagigen Mikrobewehrung mit Drahtdurchmessern von nur 1 mm ausgeführt (Bild 2 A).
- Die kraftflussoptimierte Ausformulierung der Stützenköpfe sowie der Plattenelemente wurde mit den im Projekt „Von der Bauteilfügung zu leichten Tragwerken: Hybride, trocken gefügte Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC“ entwickelten Entwurfs- und

2 Realization

In order to produce the demonstrator, the following construction, joining and manufacturing technologies were used within the framework of SPP 1542 at the TU Braunschweig:

- For the column, the hollow concrete components developed in the project “Ultralight, thin-walled hollow concrete components” with only 30 mm wall thickness and a column diameter of 150 mm were used. A high-strength, self-compacting fine-grained concrete based on the cement mixture *Flowstone* was used for the components. The column was constructed with a multi-layer microreinforcement with wire diameters of only 1 mm (Fig. 2 A).
- The force-flow-optimized design of the column heads as well as the slab elements was developed using the design and calculation principles described in the project “From component joining to lightweight supporting structures: Hybrid, dry-jointed beam, surface and space supporting elements from UHPFRC” (Fig. 2 B-D).



Bild 1: Innovative Stahlbetonstruktur | Fig. 1: Innovative reinforced concrete structure | Source: Lukas Ledderose

Bemessungsgrundlagen dimensioniert (siehe Bild 2 B–D).

- Zur Verbindung der einzelnen Elemente fanden die im Rahmen desselben Projektes entwickelten Verbindungstechniken für geometrisch komplexe Flächen- und Stabtragwerke Anwendung. Mittels einer Stabverbindung wurden die beiden Stützenssegmente untereinander gefügt (Bild 2 C). Durch Flächenverbindungen wurden die acht Plattenelemente untereinander sowie mit den Stützenköpfen verbunden (Bild 2 E–F). Um die Stabilität der Konstruktion sicherzustellen, wurden die Bauteile mit einem innerhalb des Hohlrums der Stützen verlaufenden Stabspannglied verspannt (Bild 2 G).
- Die Plattenelemente weisen Dicken von nur 15 mm, im Bereich der Fügungen 35 mm auf und wurden aus einem ultrahochfestem Stahlfaserbeton basierend auf der Bindemittelmischung *Nanodur* hergestellt (Bild 2 B). Um eine ausreichende Passgenauigkeit der Trockenfugen sicherzustellen, wurden die verzahnten Kanten der Platten mit dem Verfahren des 5-Achs-Wasserstrahlschneidens bearbeitet (Bild 2 E).
- Die Herstellung der freigeformten Stützenköpfe sowie der verzahnten Anschlussbereiche der Stützenköpfe erforderte den Einsatz einer hochpräzise gefrästen Schalung. Hierzu wurde die im Projekt „Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisions-Schalungen aus 100 % recycelbaren Industrie-Wachsen zur Herstellung von geometrisch komplexen Beton-Bauteilen“ entwickelte Wachs-Schalungstechnologie angewendet (Bild 2 H).

Die einzelnen Bauteile wurden zunächst unabhängig voneinander hergestellt. Bild 3 zeigt das Schalungskonzept sowie die Betonage der Stützen inkl. der angeformten Stützenköpfe. Während die Stützenelemente nach dem Ausschalen direkt verwendet werden konnten, war bei den Platten eine Nachbearbeitung der Fügebereiche erforderlich (Bild 4). Zum Fügen der Bauteile wurden eine Holzrahmenkonstruktion sowie ein Kran genutzt. Aufgrund der hohen Präzision der Trockenfugen konnten die Elemente ohne den Einsatz zusätzlicher Werkzeuge zusammengesetzt werden (Bild 5).

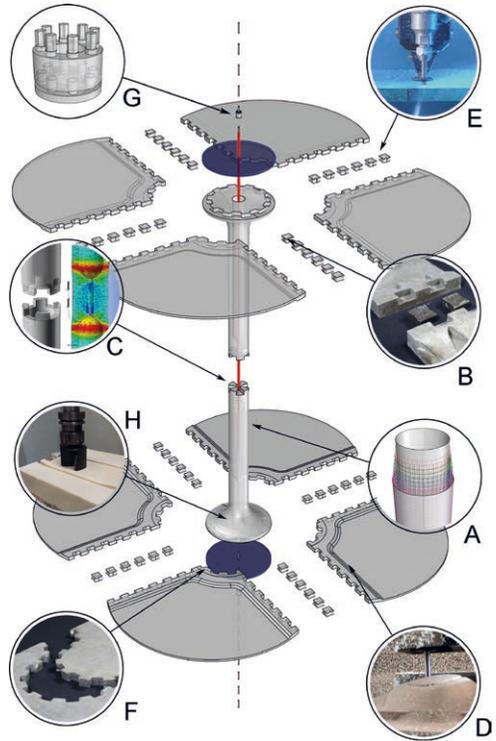


Bild 2: Aufbau des Demonstrators uni-con² | Fig. 2: Assembly of demonstrator uni-con² | Source: Lukas Ledderose

- To connect the individual elements, the joining techniques developed within the framework of the same project for geometrically complex surface and beam structures were applied. The two support segments were joined together by using a beam connection (Figure 2 C). The eight slab elements were connected to each other and to the column heads by planar joints (Fig. 2 E–F). In order to ensure the stability of the construction, the components were prestressed with a tendon bar running inside the cavity of the columns (Fig. 2 G).
- The slab elements have a thickness of only 15 mm, in the area of the joints 35 mm and were made of ultra high-strength steel fibre concrete based on the binder mixture *Nanodur* (Fig. 2 B). In order to ensure that the dry joints fit with sufficient accuracy, the toothed edges of the panels were machined using the 5-axis water jet cutting process (Fig. 2 E).



Bild 3: Schalungskonzept und Betonage der Stützelemente | **Fig. 3:** Formwork concept and concreting of column elements | Source: Jeldrik Mainka



Bild 4: Herstellung der Plattenelemente | **Fig. 4:** Manufacturing of slab elements | Source: Lukas Ledderose

3 Fazit

Im Rahmen des SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ wurden Bauteil-, Füge- und Herstellungstechnologien für innovative Betonbauteile entwickelt und erprobt. Um die Ergebnisse visuell und haptisch begreifbar zu machen, wurde der Demonstrator uni-con² entwickelt und hergestellt. Der Demonstrator uni-con² zeigt die Möglichkeiten des Einsatzes von Hochleistungsbetonen und innovativen Bewehrungsmaterialien ebenso wie die Potenziale innovativer Herstellungs- und Fügeverfahren. Er zeigt somit neue Wege in der Herstellung und Errichtung von Tragwerken aus Beton.

- The production of the free-form column heads as well as the toothed connection areas of the column heads required the use of high-precision milled formwork. For this purpose, the wax formwork technology developed in the project “Non-Waste wax formwork: Innovative precision formwork made of 100 % recyclable industrial waxes for the production of geometrically complex concrete components” was used (Fig. 2 H).

The individual components were initially produced separately. Fig. 3 shows the formwork concept as well as the concreting of the column including the integrated column heads. Whereas the column elements could be used directly after striking, the plates had to be cut in the joint areas (Fig. 4). A wooden frame construction and



Bild 5: Fertiggestellter Demonstrator uni-con² | **Fig. 5:** Finished demonstrator uni-con² | Source: Lukas Ledderose

a crane were used to join the components. Due to the high precision of the dry joints, the elements could be assembled without the use of additional tools (Fig. 5).

3 Conclusion

As part of the SPP 1542 "Concrete light", construction, joining and manufacturing technologies for innovative concrete components were developed and tested. In order to make the results visually and haptically conceivable, the demonstrator uni-con² was developed and manufactured. The demonstrator uni-con² shows the possibilities of the application of high-performance concretes and innovative reinforcement materials as well as the potentials of innovative production and joining techniques. Therefore it shows novel approaches in the production and erection of concrete structures.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Demonstrator uni-con² | Demonstrator uni-con²

Ausführung Execution:	TU Braunschweig
Team Team:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Daniel Busse, Sven Lehmborg (Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz iBMB, FG Massivbau) ■ Lukas Ledderose, Jeldrik Mainka, Franz Wirth (Institut für Tragwerksentwurf ITK) ■ Sarah Baron (Institut für Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik IWF) ■ Randi Beck, Jiri Becker, Stefan Ehrke, Jan Leo Goldenbaum, Sina Kalus, Felix Riemenschneider, Elena Stein und Neele Stumpe (studentische Hilfskräfte student assistants)
Wertvolle Ideen und Anregungen Valuable ideas and suggestions:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft (ITK) ■ Prof. Dr.-Ing. Martin Empelmann, Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann (iBMB) ■ Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder (IWF)
Beteiligte SPP-Projekte Participating SPP projects:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ultraleichte, dünnwandige Betonhohlbauteile Ultra-light, thin-walled hollow concrete members (Prof. Empelmann) ■ Von der Bauteilfügung zu leichten Tragwerken: Hybride, trocken gefügte Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC From joints to lightweight structures: Hybrid, dry-jointed bar, plane and three-dimensional structures made of UHPFRC (Prof. Budelmann, Prof. Kloft) ■ Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisions-Schalungen aus 100 % recycelbaren Industrie-Wachsen zur Herstellung von geometrisch komplexen Beton-Bauteilen Non-waste-wax-formwork: novel precise formwork-technology on basis of 100% recyclable industrial wax for the fabrication of geometrically complex concrete elements (Prof. Dröder, Prof. Kloft)
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
Förderzeitraum Funding period:	05/2016–02/2017
Partner Partners:	Wilhelm Dyckerhoff Institut, Wiesbaden StraTec Strahl- und Fasertechnik, Hemer Grace Bauprodukte GmbH, Lüdge TECETE-CHEMIE GmbH, Köln AWW Wasserstrahlschneidetechnik, Verden

Projektbezogene Publikation | Project related publication

- Ledderose, L.; Lehmborg, S.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Robot-assisted, magnetic alignment of microsteel fibers in thin-walled UHPFRC components, Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019) 11, S. 33–42

Carbonbeton-Schalendemonstrator | Shell demonstrator out of carbon reinforced concrete

- ▶ Christian Müller, Henrik Funke, Sandra Gelbrich, Lothar Kroll
- ▶ Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, TU Chemnitz

Ein Carbonbeton-Schalentragwerk, das im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ von der TU Chemnitz entwickelt wurde, wurde nach Projektabschluss erfolgreich errichtet.

Mitarbeiter*innen des Forschungsbereiches „Leichtbau im Bauwesen“ an der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung der TU Chemnitz errichteten am 20.03.2020 den Projekt-Demonstrator aus dünnwandigen, doppelt gekrümmten Carbonbetonschalen auf dem Firmengelände des Projektpartners Betonwerk Schuster GmbH in Cunewalde.

Nach umfassender Grundlagenforschung im SPP 1542 wurde an der TU Chemnitz unter der Leitung von Prof. Sandra Gelbrich und Prof. Lothar Kroll an einem neuen Schalungssystem aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) unter Nutzung der anisotropen Koppelleffekte zur Herstellung leichtbaugerechter doppeltgekrümmter Textilbetonschalen geforscht (1. Phase des SPP). Ferner wurden kraftflussangepasste Lasteinleitungselemente in Form von metallischen Fraktalinserts entwickelt, die eine optimierte Verzahnung der Werkstoffe Beton und Bewehrungstextil untereinander und somit einen bestmöglichen Lastabtrag gestatten. Zur technologischen Umsetzung von freigeformten Beton-Leichtbauelemente mittels flexibler GFK-Schalung war zudem – abhängig vom Krümmungszustand – die Anpassung des Feinbetons hinsichtlich der Verarbeitungstechnologie und rheologischer Eigenschaften durchzuführen. Dazu wurden ein neuronales Netz nach bionischem Vorbild erstellt und das Eigenschaftsprofil der mineralischen Matrix anforderungsgerecht rechnerisch optimiert (2. Phase des SPP).

A carbon reinforced concrete shell structure which was developed by Chemnitz University of Technology as part of the DFG Priority Programme SPP 1542 “Concrete light” was successfully erected after the project was completed.

A team of the research area “Lightweight Construction in Civil Engineering” at the Chair of Lightweight Structures and Polymer Technology at TU Chemnitz erected the project demonstrator made of thin-walled, double-curved carbon reinforced concrete shells on the company premises of the project partner Betonwerk Schuster GmbH in Cunewalde on 20 March 2020.

After extensive basic investigation in SPP 1542, research was carried out at TU Chemnitz under the direction of Prof. Sandra Gelbrich and Prof. Lothar Kroll on a new formwork system made of glass-fibre reinforced plastic (GRP) using the anisotropic coupling effects for the production of lightweight double-curved textile reinforced concrete shells (1st phase of the SPP). Furthermore, force flow-adapted load introduction elements in the form of metallic fractal inserts were developed, which allow an optimised interlocking of the materials concrete and reinforcement textile with each other and thus the best possible load transfer. For the technological implementation of free-formed lightweight concrete elements by means of flexible GRP formwork, the fine concrete also had to be adapted – depending on the state of curvature – with regard to processing technology and rheological properties. For this purpose, a neural network based on a bionic model was created and the property profile of the mineral matrix was computationally optimised according to the requirements (2nd phase of the SPP).

Die Ergebnisse der Grundlagenforschung wurden in der Transferphase in die Praxis überführt. Dazu wurde ein Schalentragswerk entworfen, was aus sechs doppelt gekrümmten Fertigteilen aus Carbonbeton besteht. Die einzelnen Fertigteile wurden mittels neuem GFK-Schalungssystem mit flexibel einstellbaren Krümmungszuständen hergestellt. Für die Formgebung kam das Spritzbetonverfahren zum Einsatz, wobei gezielt die Fußpunkte und Kopfverbindungen als Einlegeteile bereits während des Herstellprozesses integriert wurden. Die Plattenpaare sind gegeneinander versetzt angeordnet und treffen sich in einem gemeinsamen Punkt. Mit dem Carbonbeton-Schalendemonstrator wurde der erfolgreiche Transfer der Ergebnisse aus der Grundlagenforschung in die Praxis sowie das große Potenzial der Carbonbetonbauweise gezeigt.

The results of the basic research were transferred into practice in the transfer phase. For this purpose, a shell structure was designed consisting of six double-curved prefabricated parts made of carbon reinforced concrete. The individual prefabricated parts were produced using a new GRP formwork system with flexibly adjustable curvature states. The shotcrete method was used for the shaping, whereby the foot points and head joints were specifically integrated as inserts during the manufacturing process. The pairs of panels are offset from each other and meet at a common point. The carbon reinforced concrete formwork demonstrator was used to show the successful transfer of results from basic research into practice as well as the great potential of carbon reinforced concrete construction.



Bild 1: Fertigung der Schalenelemente mittels neuem GFK-Schalungssystems mit flexibel einstellbaren Krümmungszuständen | **Fig. 1:** Production of the shell elements using a new GRP formwork system with flexibly adjustable curvature states | Source: Christian Müller



Bild 2: Aufbau des Carbonbeton-Schalendemonstrators auf dem Firmengelände des Projektpartners Betonwerk Schuster GmbH in Cunewalde | **Fig. 2:** Construction of the carbon reinforced concrete formwork demonstrator on the company premises of the project partner Betonwerk Schuster GmbH in Cunewalde | Source: Christian Müller



Bild 3: Der Carbonbeton-Schalendemonstrator besteht aus 5 cm dicken doppeltgekrümmten Einzelelementen, die gegeneinander versetzt angeordnet sind | **Fig. 3:** The carbon reinforced concrete formwork demonstrator consists of 5 cm thick double-curved individual elements that are arranged offset from each other | Source: Roy Lange

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Carbonbeton-Schalendemonstrator

Shell demonstrator out of carbon reinforced concrete

Ausführung Execution:	TU Chemnitz
Team Team:	Christian Müller, Henrik Funke, Roy Lange
Beteiligte SPP-Projekte Participating SPP projects:	<ul style="list-style-type: none"> Flexible mehrschichtige GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit stabilisierten Abstandsgewirken Flexible multilayer GRP formworks for the production of double-curved lightweight concrete elements with stabilized spacer fabrics (Kroll/Gelbrich) Entwurf und Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen mit bionisch inspirierten Kräfteinleitungssystemen durch Einsatz flexibler GFK-Schalungen Design and production of double-curved lightweight concrete structures with bionic inspired force transmission elements by the use of flexible GFRP-formworks (Kroll/Gelbrich)
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
Zeitraum Period:	2019/2020
Partner Partners:	Betonwerk Schuster GmbH, Cunewalde FiberTech, Chemnitz

CarboLight Bridge – eine ultraleichte Konstruktion aus kohlefaserverstärktem und infraleichtem Beton | CarboLight Bridge – an ultra-lightweight construction made of carbon reinforced and infra-lightweight concrete for the German Museum in Munich

- ▶ Marc Koschemann, Silke Scheerer
- ▶ Institut für Massivbau, TU Dresden

1 Einleitung

Der Demonstrator für das SPP 1542 sollte die Erkenntnisse der Teilprojekte „Querschnittsadaption für stabförmige Druckbauteile“ und „Leichte Deckentragwerke aus geschichteten Hochleistungsbetonen“ aufgreifen und widerspiegeln. Zudem sollte ein Tragwerk verwendet werden, dessen Kraftfluss für jeden Betrachter deutlich erkennbar ist und dessen Erscheinung dem Prinzip *form follows force* folgt.

Da das Deutsche Museum in München im Zuge der Modernisierung zukunftsfähigen Innovationen mehr Raum bieten möchte, ergab sich die Möglichkeit, eine Ausstellungsbrücke in der Abteilung Brückenbau zu errichten. Das Deutsche Museum zählt zu den weltweit anerkanntesten Institutionen für Naturwissenschaft und Technik und gehört mit jährlich ca. 1,5 Millionen Besuchern zu den meistbesuchten Museen in Deutschland [1].

Für den Demonstrator steht ein ca. 9,5 m langer und ca. 2,0 m tiefer Bereich zwischen zwei Wänden zur Verfügung. Die Ausstellungsbrücke sollte in einer Höhe von ca. 3,50 m installiert werden, um diese sowohl von unten als auch von der in gleicher Höhe benachbarten Besucherbrücke von Jörg Schlaich [2] betrachten zu können.

1 Introduction

The demonstrator for SPP 1542 should take into account and reflect the findings of the SPP projects “Cross-section adaptation for bar-shaped compression components” and “Lightweight floor structures made of layered high-performance concretes”. In addition, a structure was to be designed where the flow of force is clearly recognisable to any observer from the external shape and whose design follows the principle of *form follows force*.

Since the Deutsches Museum in Munich wants to offer more space to future-oriented innovations in the course of modernisation, the opportunity came up to erect an exhibition bridge in the bridge construction department. The Deutsches Museum is one of the world’s most renowned institutions for natural science and technology and, with around 1.5 million visitors a year, one of the most visited museums in Germany [1].

An area approx. 9.5 m long and approx. 2.0 m deep between two walls was available for the demonstrator. The exhibition bridge was to be installed at a height of approx. 3.50 m so that it could be viewed from below as well as from the neighbouring visitor bridge by Jörg Schlaich [2] at the same height.

2 Entwurf, Planung, Berechnung

Obwohl die Brücke für Besucher nicht zugänglich ist, wurde mit dem Deutschen Museum vereinbart, sie für eine Nutzlast von mindestens $4 \times 1,0 \text{ kN}$ für mögliche Exponate auf der Brücke sowie eine Personenlast von einmal $1,5 \text{ kN}$ auszuliegen. Ausgehend von einem ersten Entwurf (Bild 1) wurde zunächst die Breite des Überbaus mit $1,20 \text{ m}$ festgelegt. Des Weiteren bestand der Wunsch nach einem möglichst flachen Bogenstich. Der anfänglich gewählte Höhenunterschied der Auflager von ca. 65 cm und eine daraus resultierende Stützenneigung von $12,5^\circ$ zur Horizontalen wurden im Zuge der weiteren Planung nicht wesentlich verändert. Anhand einer groben Vor-dimensionierung der Querschnitte wurden die zu erwartenden Auflagerkräfte ermittelt und die Lastweiterleitung in die Bestandskonstruktion durch den zuständigen Tragwerksplaner nachgewiesen. Zudem wurden die unteren und oberen Auflagerkonsolen bemessen und konstruiert.

Für die weitere Planung und Optimierung wurde ein vollparametrisiertes 3D-Modell der Brücke mit den Softwareprogrammen *Grasshopper* in Verbindung mit *Rhino* erstellt. Durch Programmierung einer Schnittstelle zu dem FEM-Programm *RFEM* war es im Sinne des *Building Information Modelling* zudem möglich, die Geometrie- und Materialdaten sowie Lasten aus *Grasshopper* quasi-simultan in ein FEM-Strukturmodell zu überführen. Anhand der Geometriedaten wurden vereinfachte Querschnitte für ca. 50 Stababschnitte generiert, welche die gleiche Masse- und Steifigkeitsverteilung wie das 3D-Modell besaßen. Die berechneten Schnittgrößen wurden anschließend wieder in *Grasshopper* überführt und zur Berechnung von Spannungen und zur Nachweisführung verwendet. Auf Basis einer Variantenuntersuchung wurden die feldweise Aufteilung des Überbaus – $3,50 \text{ m}$ für das mittlere und jeweils $3,00 \text{ m}$ für die Randfelder – und die Länge der Stützen festgelegt.

Im Weiteren wurde die Knicksicherheit der ca. $3,0 \text{ m}$ langen Stützen untersucht. Dabei war zu beachten, dass diese neben der Normalkraftbeanspruchung auch Biegung infolge Eigengewicht

2 Design, planning, calculation

Although the bridge is not accessible for visitors, it was agreed with the client to design it for a live load of at least $4 \times 1.0 \text{ kN}$ for possible exhibition items on the bridge as well as a man load of once 1.5 kN . Based on a first draft (Fig. 1), the width of the superstructure was initially determined to be 1.20 m . Furthermore, there was a desire for the arch to be as flat as possible. The initially selected height difference of the supports of approx. 65 cm and a resulting column inclination of 12.5° to the horizontal was not changed significantly in the course of further planning. Based on a rough pre-dimensioning of the cross-sections, the expected support forces were determined and the load transmission into the existing structure was verified by the responsible structural engineer. In addition, the lower and upper support brackets were dimensioned and designed.

For further planning and optimisation, a fully parameterised 3D model of the bridge was created with the software programmes *Grasshopper* in conjunction with *Rhino*. By programming an interface to the FEM programme *RFEM*, it was also possible to transfer the geometry and material data as well as loads from *Grasshopper* quasi-simultaneously into an FEM beam model in the sense of *building information modelling*. Using the geometry data, simplified cross-sections were generated for approx. 50 beam sections

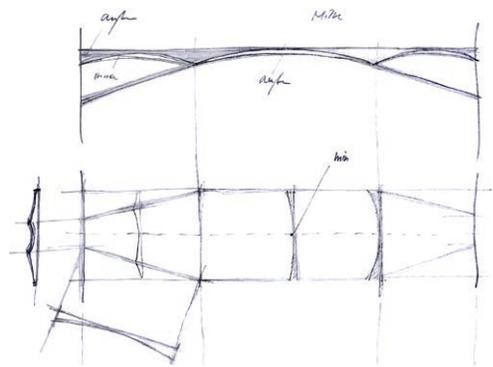


Bild 1: Erster Entwurf der Ausstellungsbrücke | Fig. 1: First sketch of the exhibition bridge | Source: Manfred Curbach

ausgesetzt sind. Entsprechend waren Verformungen inklusive Kriechen und damit Effekte aus Theorie II. Ordnung zu berücksichtigen. Da auch die Stützen möglichst schlank und materialeffizient mit einer Bauteilhöhe von lediglich 50 mm ausgebildet werden sollten, galt es, die Biegesteifigkeit mit einer geeigneten Querschnittsform zu erhöhen. Dafür wurde ein Kreissegmentquerschnitt mit einem Radius von 305 cm gewählt. Des Weiteren sollte verhindert werden, dass in den Stützen Zugspannungen größer $0,5 \cdot f_{ctk}$ auftreten. Ein Reißen des Querschnittes hätte einen Steifigkeitsabfall und damit unweigerlich ein Versagen zur Folge. Die Lösung dafür war eine leichte Überhöhung der Stützen in Längsrichtung. Die optimale Stichhöhe des Längsbogens von 15 mm wurde anhand von nichtlinearen Berechnungen nach Theorie II. Ordnung unter Zielsetzung eines überdrückten Querschnittes für alle Lastkombinationen bestimmt. Zur Minimierung von Rissen infolge von Schwinden wurde für die Stützen eine Oberflächenbewehrung an Unter- und Oberseite vorgesehen. Gewählt wurde das Carbondtextil SITgrid 040 (Wilhelm Kneitz Solutions in Textile GmbH).

Für den Überbau mit zweiachsig gekrümmter Unterseite war ein dreischichtiger Aufbau aus 20 mm dicken Carbonbetondeckschichten und einer Kernschicht aus Infralichtbeton (ILC, siehe z. B. [3]) mit einer Rohdichte von ca. 800 kg/m^3 vorgesehen. Er variiert in der Höhe zwischen 60 und 160 mm. In Längsrichtung folgen die zweiachsig gekrümmte Unterseite und damit die Querschnittshöhe dem Beanspruchungsverlauf aus Biegung. Folglich ergibt sich die maximale Höhe im Bereich der Stützpunkte und eine geringe an den Endauflagern und im Mittelfeld. Die Geometrie wurde durch mehrere Iterationsschritte unter Verwendung des 3D-Modells und anschließender Berechnung ermittelt. Zudem flossen Aspekte der Baubarkeit und Ästhetik ein.

Der Überbau wurde im Wesentlichen auf Biegung und Querkraft nachgewiesen. Vor allem aufgrund der dominierenden Krümmung in Querrichtung wurde für die Unterseite das einaxial orientierte Carbondtextil SITgrid 040 gewählt. Bei einer charakteristischen Garnzugfestigkeit

tions, which had the same mass and stiffness distribution as in the 3D model. The calculated internal forces and moments were then transferred back into Grasshopper and used for the calculation of stresses and for verification. On the basis of a variant study, the division of spans for the superstructure – 3.50 m for the middle field and 3.00 m for each of the edge fields – and the length of the supports were determined.

Furthermore, the buckling safety of the approx. 3.0 m long columns was investigated. It had to be considered that these are exposed to bending due to self-weight in addition to the normal force load. Accordingly, deformations including creep and thus effects from 2nd order theory had to be taken into account. As the supports were also to be designed as slim and material-efficiently as possible with a component height of only 50 mm, it was necessary to increase the bending stiffness with a suitable cross-sectional shape. For this purpose, a circular segment cross-section with a radius of 305 cm was chosen. Furthermore, tensile stresses greater than $0,5 \cdot f_{ctk}$ were to be prevented in the columns. A cracking of the cross-section would have resulted in a drop in stiffness and thus inevitably failure. The solution was a slight superelevation of the columns in the longitudinal direction. The optimum stitch height of the longitudinal arch of 15 mm was determined using non-linear calculations according to 2nd order theory. The goal was to achieve compression stresses over the whole cross-section for all load combinations. To minimise cracks due to shrinkage, surface reinforcement was provided for the columns on the bottom and top sides. The carbon textile SITgrid 040 (Wilhelm Kneitz Solutions in Textile GmbH) was chosen.

For the superstructure with a biaxially curved underside, a three-layer structure consisting of two 20 mm thick carbon reinforced concrete face layers and a core layer of infra lightweight concrete (ILC, see e.g. [3]) with a density of approx. 800 kg/m^3 was planned. It varies in height between 60 and 160 mm. In the longitudinal direction, the biaxially curved underside and thus the cross-section height follows the stress

von 2.200 N/mm² [4] verfügt das Textil über einen Bewehrungsquerschnitt von 141 mm²/m in Längs- und 28 mm²/m in Querrichtung, was die erforderliche Flexibilität der Bewehrungsmatte gewährleistet. Die obere, ebene Carbonbetonschicht wurde mit einer Lage solidian GRID Q95/Q95-CCE-38 bewehrt [5]. Dieses Textil weist eine höhere Eigensteifigkeit auf und bietet somit Vorteile beim lagegenauen Einbau in einer ebenen Fläche. Die rechnerische Tragfähigkeit konnte für beide Bewehrungslagen mit ausreichender Sicherheit erbracht werden.

Essentiell war zudem der Fugennachweis an den Schichtgrenzen. Trotz der geringen Zugfestigkeit von Infraleichtbeton von ca. 0,7 N/mm² konnten auch die Verbundfugen im Innern des Querschnitts rechnerisch nachgewiesen werden. Günstig hierfür waren die vorgesehene raue Fugenausführung und die sehr große Verbundfläche.

Bild 2 zeigt ein Rendering der finalen Geometrie der Ausstellungsbrücke.



Bild 2: Visualisierung der Ausstellungsbrücke | **Fig. 2:** Visualisation of the exhibition bridge | Source: Iurii Vakaliuk

3 Planung und Herstellung der Halb-fertigteile

Begleitend zur statischen und gestalterischen Planung wurde ein Konzept zur Herstellung der Brücke im Deutschen Museum erarbeitet. Aufgrund der baulichen Situation vor Ort war der Einbau als vorgefertigte komplette Brücke nicht möglich. Auch waren weder der Einsatz von größeren Hebezeugen im Gebäudeinneren als auch eine reine Fertigung im Museum verbunden mit einer langen Herstellungszeit und den erforderli-

curve from bending. Consequently, the maximum height results on the inner supports and a low one at the end supports and in middle of the bridge. The geometry was determined through several iteration steps using the 3D model and subsequent calculation. Aspects of constructability and aesthetics were also taken into account.

The superstructure was mainly calculated for bending and shear force. The uniaxially oriented carbon textile SITgrid 040 was chosen for the underside, mainly because of the dominating curvature in the transverse direction. This textile has a reinforcement cross-section of 141 mm²/m in the longitudinal direction and 28 mm²/m in the transverse direction, which ensures the required flexibility of the reinforcement mesh. The characteristic yarn tensile strength is 2,200 N/mm² [4]. The upper, flat carbon reinforced concrete layer was reinforced with one sheet of solidian GRID Q95/Q95-CCE-38 [5]. This textile has a higher inherent stiffness and thus offers advantages for positionally accurate installation in plane sections. The calculated load-bearing capacity could be provided with sufficient certainty for both reinforcement layers.

It was also essential to verify the load-bearing capacity of the interface(joint) between the layers. Despite the low tensile strength of infra-lightweight concrete (ILC) of approx. 0.7 N/mm², the composite joints inside the cross-section could also be verified by calculation. The intended rough joint design and the very large bond area were favourable for this.

Fig. 2 shows a rendering of the final geometry of the exhibition bridge.

3 Planning and production of the semi-precast parts

Accompanying the static and architectural design, a concept for the erection of the bridge in the Deutsches Museum was developed. Due to the limited space available on site, it was not

chen Frischbetonmengen umsetzbar. Die Lösung war eine Teilfertigteilbauweise mit anschließender Ortbetonergänzung. Dafür wurde die untere Carbonbetonschicht des Überbaus in drei Segmente mit Längen von 2,93 m (Randfelder) und 3,65 m (Mittelfeld) aufgeteilt. Die beiden Stützen sollten komplett hergestellt werden. Bild 3 zeigt die vorzufertigenden Teile im Überblick.

Grundlage der Schalungsplanung war das 3D-Modell der Brücke. Die Fertigung der einzelnen Schalungsteile aus massiven Sperrholzplatten mittels 3D-Frästechnik erfolgte durch die Firma HICONFORM. Die Schaloberfläche wurde durch eine Schicht Spritzpachtel mit anschließenden Feinschliff und einem Finish aus PU-Lack hergestellt. Die Qualität der Schaloberfläche war zuvor mit Testflächen und verschiedenen Betonage-techniken erprobt worden.

Für die Erfüllung der hohen Anforderungen an Optik und Oberflächenbeschaffenheit für ein Exponat in einem Museum war ein selbstverdichtender Feinbeton zu entwerfen, welcher eine möglichst dichte und porenfreie Struktur besitzt, pump- und fließfähig ist und über einen Zeitraum von mindestens 30 min verarbeitbar bleibt. Zudem bestand der Wunsch nach einer möglichst dunklen Eigentönung, um gegenüber dem helleren Infralichtbeton einen starken Kontrast herzustellen. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Baustoffe der TU Dresden wurden

possible to install the bridge as a complete prefabricated structure. Neither the use of larger lifting equipment inside the building nor a full production in the museum combined with a long production time and the necessary fresh concrete quantities were feasible. The solution was a partially prefabricated construction method with subsequent in-situ concrete supplementation. For this, the lower carbon reinforced concrete layer of the superstructure was divided into three segments with lengths of 2.93 m (side spans) and 3.65 m (centre field). The two columns were to be completely fabricated. Fig. 3 shows an overview of the parts to be prefabricated.

The formwork planning was based on the 3D model of the demonstrator. The production of individual formwork parts from solid plywood panels using 3D milling technology was carried out by the HICONFORM company. The formwork surface was prepared by a layer of spray filler with subsequent fine sanding and a finish of PU lacquer. The quality of the formwork surface had previously been tested with test surfaces and various concreting techniques.

A self-compacting fine concrete was to be designed to meet the high demands on visual appearance and surface quality for an exhibit in a museum. It had to have a dense and pore-free structure as possible, be pumpable and flow-

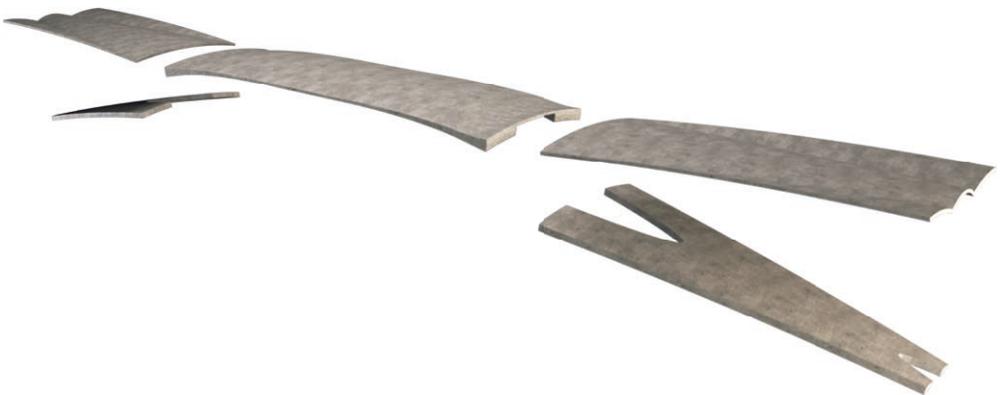


Bild 3: Überblick über die herzustellenden Carbonbeton-Halffertigteile | **Fig. 3:** Overview of the carbon reinforced concrete semi-precast parts | Source: Iurii Vakaliuk



Bild 4: Herstellung eines Überbau-Halbfertigteils; von links oben nach rechts unten: Anpassung der Bewehrung an die angestrebte Geometrie, Einfüllen des Betons für die erste Feinbetonschicht, Modellieren der Oberseite der Carbonbetonschale, aufgeraute Oberfläche | **Fig. 4:** Production of a superstructure semi-precaster part; from top left to bottom right: adapting the reinforcement to the desired geometry, filling in the concrete for the first fine concrete layer, modelling the top of the carbon concrete shell, roughened surface | Source: Marc Koschemann

verschiedene Betonentwürfe hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Optik getestet. Der finale Feinbeton besitzt ein Größtkorn von 4 mm. Die hohe Dichtigkeit und dunkle Farbgebung wurde durch den Einsatz von Quarzsand, Mikrofüller und Mikrosilika erreicht.

Die unteren Carbonbetonschalen für den Überbau wurden liegend im Laminierverfahren betoniert (Bild 4). Dazu wurde zunächst die Hälfte des benötigten Betons über die Schalfläche gleichmäßig verteilt. Anschließend wurde das Carbonbengelege in den frischen Beton gedrückt. Zur Wahrung der Betondeckung von ca. 10 mm wurden Abstandhalter des Typs DistTex eingesetzt [6], [7]. Anschließend wurde der restliche Beton eingebracht und die Geometrie der Oberseite mithilfe von Schablonen modelliert. Nach ca. 30 min Erhärtungszeit wurde die Oberseite mechanisch aufgeraut, um die Verbundwirkung zur Zwischenschicht aus Infraleichtbeton zu verbessern.

able and remain workable for at least 30 min. In addition, the fine-grained concrete had to be as dark as possible in order to create a strong contrast to the lighter-coloured ILC concrete. In cooperation with the Institute for Building Materials of TU Dresden, various concrete mix designs were tested with regard to workability and appearance. The final mixture has a maximum grain size of 4 mm. The high impermeability and dark colouring were achieved by using quartz sand, microfiller and microsilica.

The lower carbon reinforced concrete shells for the superstructure were concreted horizontally by laminating (Fig. 4). First, half of the required concrete was evenly distributed over the formwork surface. Then the carbon fabric was placed in the fresh concrete. To maintain the concrete cover of approx. 10 mm, DistTex spacers were used [6], [7]. The remaining concrete was then added and the geometry of the upper surface was modelled with the help of wooden stencils. After about 30 min of curing time, the surface

Da die Stützen im fertigen Zustand von allen Seiten betrachtet werden können, wurden diese stehend über eine Höhe von 3,0 m gegossen, was einen Betonierdruck von bis zu 80 kN/m² zur Folge hatte. Die Schalungsform wurde entsprechend versteift und die Fugen zwischen den einzelnen Schalenteilen mit Dichtmasse versehen. In Testbetonagen war zuvor erprobt worden, welche Konsistenz der Frischbeton haben sollte, damit der Beton das Carbondtextil vollständig umschließt und Luftporen vermieden werden. Zur Einbringung wurde eine Betonpumpe verwendet, wobei der Einfüllschlauch mit steigendem Beton aus der Schalung geführt wurde.

Das Ausschalen erfolgte in der Regel nach 7 bis 14 Tagen. Dafür, zum sicheren Transport und zur bauzeitlichen Unterstützung der filigranen Betonteile wurden hölzerne Unterstützungskonstruktionen entworfen und gefertigt. Die Holzkonstruktionen wurden umgekehrt auf die Betonteile gelegt und mit den Schalungen verspannt. Die verspannten Pakete wurden anschließend gewendet und die Schalung entfernt. Die Wendekonstruktionen wurden auch genutzt, um die Elemente in die richtige Lage zu bringen. Bild 5 zeigt die Unterseite eines Überbauteils.

4 Tragfähigkeitstests

Um die Tragfähigkeit des Sandwichaufbaus sowie der Gesamtkonstruktion experimentell zu testen, wurde die gesamte Brücke einmal als Prototyp im Otto-Mohr-Laboratorium (OML) der



Bild 5: Unterseite eines Carbonbeton-Halbfertigteils für ein Randfeld | **Fig. 5:** Underside of a carbon reinforced concrete semi-precast part for a side span | Source: Marc Koschemann

was mechanically roughened to improve the bond to the next layer of infra-lightweight concrete.

Since the columns can be viewed from all sides in their finished state, they were cast in upright position over a height of 3.0 m, which resulted in a concreting pressure of up to 80 kN/m². The formwork was stiffened accordingly and the joints between the individual formwork parts were provided with sealing compound. The consistency of the fresh concrete was tested beforehand in order to ensure that the concrete completely encloses the textile and to avoid air pores. A concrete pump was used for concreting.

The formwork was usually stripped after 7 to 14 days. For this purpose, for safe transport and support of the filigree concrete parts during construction, wooden support constructions were designed and manufactured. They were placed upside down on the concrete parts and braced with the formwork. The braced packages were then flipped over and the formwork removed. The turning constructions were also used to bring the elements into the right position. Fig. 5 shows the underside of a superstructure element.

4 Load-bearing tests

A prototype of the entire CarboLight Bridge was manufactured in the Otto Mohr Laboratory (OML) of the TU Dresden and loaded to failure to experimentally confirm the load-bearing capacity of the sandwich structure as well as the overall construction. In addition, a column and a separate side span element were tested. Furthermore, it was also possible to test the planned assembly procedure as well as the concreting of the intermediate and surface layers and to identify possible optimisation possibilities.

The column element was tested horizontally. Due to the very shallow inclination of the columns, they are subjected to bending due to

TU Dresden erstellt und bis zum Bruch belastet. Zudem wurden eine Stütze und ein separates Randfeld getestet. Durch die Realisierung des Prototyps konnten auch der geplante Montageablauf sowie die Betonagen der Zwischen- und der Deckschicht erprobt und eventuelle Optimierungsmöglichkeiten identifiziert werden.

Das Stützelement wurde liegend getestet. Aufgrund der sehr flachen Neigung der Stützen unterliegen diese einer Biegebeanspruchung infolge Eigengewichts, welche mit einer entsprechenden Verformung einhergeht. Um diese zu bestimmen, wurde die Stütze über 6 Tage als Einfeldträger gelagert. In Stützenmitte stellte sich eine Durchbiegung von ca. 7 mm ein. Dieser Wert liegt oberhalb der errechneten Verformung, wird aber durch die Überhöhung in Längsrichtung von 15 mm kompensiert. Im anschließenden Vier-Punkt-Biegeversuch wurden ab einem Biegemoment von ca. 0,6 kNm erste Biegerisse beobachtet. Das Bruchmoment betrug ca. 7,5 kNm zu. Basierend auf der errechneten Stützennormalkraft von ca. 35 kN und dem Rissmoment reicht demnach eine Lastausmitte von weniger als 2 cm aus, um ein Stabilitätsversagen zu verursachen. Das Versuchsergebnis bestätigt die Vorgabe, dass die Stützen während des gesamten Herstellungsprozesses ungerissen bleiben müssen, um die Knicksicherheit zu gewährleisten.

Die Tragfähigkeit des ebenfalls unter Biegung getesteten Randfelds wurde durch das Versagen der Verbundfuge zwischen Kern- und Deckschicht infolge einer Auflast von knapp 30 kN bestimmt. Die Fugentragfähigkeit lag im Versuch bei 0,23 N/mm² und damit nur geringfügig unter der rechnerischen Tragfähigkeit nach DIN EN 1992-1 [8] (0,28 N/mm²).

Den Abschluss der experimentellen Untersuchungen bildeten Bau und Beprobung der Testbrücke. Die Errichtung des Prototyps erfolgte schrittweise (Bild 6) wie folgt:

- Verankerung behelfsmäßiger Stahlaulager im Hallenboden,

their own weight, which is accompanied by a corresponding deformations. To determine these, the column was stored as a single-span beam for 6 days. In the centre of the column, a deflection of approx. 7 mm was recorded. This value is above the calculated deformation, but is compensated by the longitudinal superelevation of 15 mm. In the subsequent four-point bending test, the first bending cracks were observed under a bending moment of ca. 0.6 kNm. The ultimate moment was approx. 7.5 kNm. Based on the calculated column normal force of about 35 kN and the cracking moment, a load eccentricity of less than 2 cm is therefore sufficient to cause a stability failure. The test result confirms the requirement that the columns must remain uncracked throughout the entire manufacturing process in order to ensure buckling safety.

The load-bearing capacity of the side span, which was also tested under bending, was determined by the failure of the bond joint between the core and the surface layer as a result of a superimposed load of almost 30 kN. The joint load-bearing capacity was 0.23 N/mm² in the test, which was thus only slightly below the calculated load-bearing capacity according to DIN EN 1992-1 [8] (0.28 N/mm²).

The experimental investigations were finished by the construction and testing of the prototype. It was erected step by step as follows (see Fig. 6):

- Anchoring of temporary steel supports in the lab's floor,
- Adjustment of the columns' inclination by means of mechanical jacks,
- Fine adjustment and compensation of slight irregularities with thin steel sheets,
- Inserting and aligning the centre section using a height-adjustable system that can be moved horizontally by roller rails,
- Joining of columns and middle superstructure semi-precast part by gluing,
- Assembly of the side parts of the superstructure,

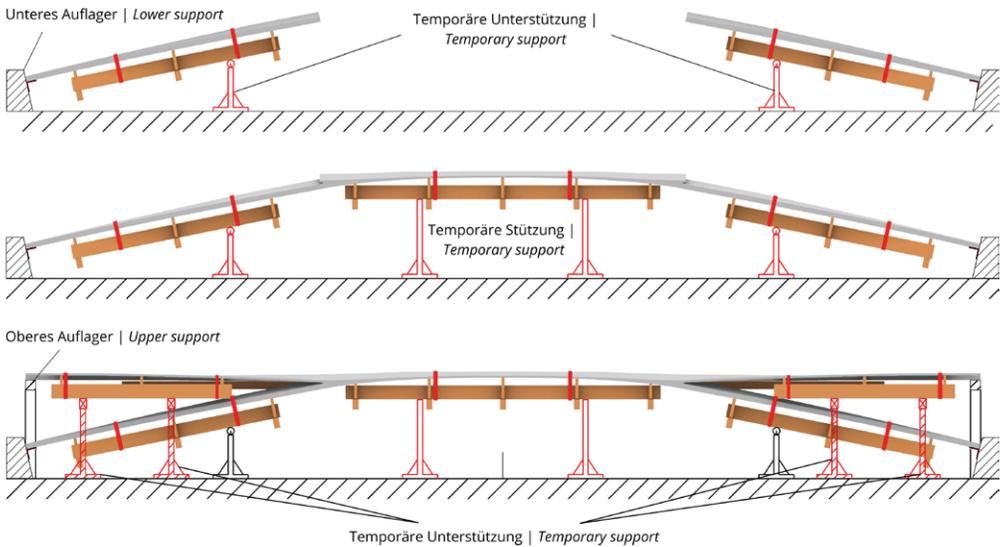


Bild 6: Schematische Darstellung der Montageschritte zur Errichtung der CarboLight-Brücke mit Hilfe der Unterstütkonstruktion; die temporären Unterstütkungen waren dabei höhenverstellbar und horizontal verschieblich ausgeführt | **Fig. 6:** Schematic representation of the assembly steps for erecting the CarboLight bridge using the support structure; the temporary supports were height-adjustable and horizontally movable | Source: Marc Koschemann

- Einstellung des Stützenwinkels mittels mechanischer Heber,
- Feinjustierung und Ausgleich leichter Ungleichmäßigkeiten mit dünnen Stahlblechen,
- Einsetzen und Ausrichten des Mittelteils unter Nutzung eines höhenverstellbaren und durch Rollschienen horizontal verschiebbaren Systems,
- Verbinden von Stützen und Überbau-Halb fertigteil durch Kleben,
- Montage der Randteile,
- Befestigung und Ausrichtung der umlaufenden Randschalung für die anschließende Betonage mit ca. 580 l ILC, welcher in der Mischanlage des OML in zwei Chargen hergestellt und dessen Oberfläche nach dem Ansteifen aufgeraut wurde,
- Montage der Randschalung und abschließende Betonage der Carbonbeton-Deckschicht,
- Abdecken mit feuchten Tüchern als Schutz vor zu schneller Austrocknung.

- Fixing and alignment of the surrounding formwork for the subsequent concreting with approx. 580 l ILC, which was produced in two batches in the mixing plant of the OML and whose surface was roughened after stiffening,
- Formwork modification and final concreting of the carbon reinforced concrete top layer,
- Covering with damp cloths as protection against drying out too quickly.

Nach 28 Tagen wurden die Unterstütkonstruktion entfernt. Bereits zuvor war die Brücke mit Wegaufnehmern ausgestattet worden, um die Verformung infolge Eigengewichts aufzu-

After 28 days, the support structure was removed. The bridge had already been equipped with displacement transducers to record the deformation due to its own weight. After one day, four steel girders circa 100 kg each (this corresponds to the planned service load) were placed for three days, two in the centre span and one in each of the side spans. In the middle of the bridge, a deflection of approx. 30 mm was recorded. Therefore, a super-elevation of the superstructure and a possibility for subsequent compensation was planned for the exhibition bridge in the museum.

For the load test, two tension rods were attached to each of the steel girders and an-



Bild 7: Biegeversuch am Prototyp | Fig. 7: Bending test on the prototype | Source: Stefan Gröschel

zeichnen. Nach einem Tag wurden für drei Tage vier Stahlträger von je knapp 100 kg Gewicht aufgelegt (dies entspricht der geplanten Gebrauchslast), zwei im Mittelfeld und je einer in den Randfeldern. In Brückenmitte stellten sich ca. 30 mm Durchbiegung ein, weshalb für die Ausstellungsbrücke im Museum eine Überhöhung des Überbaus und eine Möglichkeit des nachträglichen Ausgleichs eingeplant wurden.

Für die Belastungsprüfung wurden an den Stahlträgern je zwei Zugstangen befestigt und im Hallenboden verankert (Bild 7). Die Lastaufbringung erfolgte stufenweise mit hydraulischen Pressen. Es wurde eine Maximallast von ca. 14 kN je Achse erreicht, was in Summe, inklusive der Stahlträger, dem 2,8-Fachen des Eigengewichts entsprach. Das Versagen stellte sich durch schlagartig eintretende Risse in den Anschlussbereichen der Stützen ein. Die Klebefuge blieb intakt.

Während des Belastungstests wurden auch die beiden Stützen beobachtet. Bereits unter Eigengewicht und Gebrauchslast kam es infolge der Gesamtabenkung zu einer Neigungsänderung, die den inneren Spannungszustand beeinflusste. Zum Versagenszeitpunkt herrschten ca. 5 N/mm² Zug an der Oberseite und ca. 17,5 N/mm² Druck an der Unterseite des Bauteils, die Normalkraft betrug ca. 140 kN, was etwa dem 4-Fachen der geplanten Belastung entspricht.

An der Herstellung der Testbrücke wurden wichtige Erkenntnisse und Erfahrungen zu Betonkonsistenzen, Verarbeitungszeiten und Schalungs-

chored in the hall floor (Fig. 7). The load was applied stepwise with hydraulic presses. A maximum load of approx. 14 kN per axle was achieved, which in total, including the steel girders, corresponded to 2.8 times the dead weight. The failure occurred due to sudden cracks in the connection areas of the columns. The adhesive joint remained intact.

During the load test, the columns were also observed. Already under dead load and service load, a change in inclination occurred as a result of the overall lowering, which influenced the internal stress state. At the time of failure, there were circa 5 N/mm² tension on the upper side and approx. 17.5 N/mm² pressure on the underside of the component; the normal force loading was approx. 140 kN, which corresponds to about 4 times the planned load.

Important findings and experience regarding concrete consistencies, processing times and formwork preparation were gathered during the fabrication and erection of the prototype. Even minor deviations in the manufacturing process can influence the quality of the concrete surface. In addition, various curing methods were tested in combination with different impregnation systems. By grinding the carbon concrete surfaces, for example, the thin, light hydrate layer can be removed, revealing the distinctive dark tint of the concrete. The effect was intensified by a colour-deepening impregnation with a low gloss level.

vorbereitung gesammelt. Bereits geringfügige Abweichungen im Herstellungsprozess können die Qualität der Betonoberflächen beeinflussen. Zudem wurden verschiedene Verfahren der Nachbehandlung in Kombination mit unterschiedlichen Imprägnierungssystemen erprobt. Durch einen Anschliff der Carbonbetonflächen kann bspw. die dünne, helle Hydratschicht entfernt werden, wodurch die markante dunkle Tönung des Betons zu Tage tritt. Verstärkt wurde der Effekt durch eine farbvertiefende Imprägnierung mit geringem Glanzgrad.

5 Herstellung und Errichtung der Ausstellungsbrücke

Für den Demonstrator im Museum wurden die fünf Halbfertigteile erneut betoniert und auf den Holzunterkonstruktionen zwischengelagert. Alle Sichtflächen der Segmente wurden maschinell geschliffen und anschließend imprägniert. Partiiell wurden Fehlstellen betonkosmetisch bearbeitet.

Auf den Unterkonstruktionen gesichert wurden die Einzelteile zusammen mit den Ausgangsstoffen für die obere Carbonbetonschicht und allen erforderlichen Hilfsmitteln zum Museum transportiert. Dort wurden die Segmente mittel mechanischen Hebezeugen auf eine ca. 2,5 m hohe Arbeitsplattform gehoben und gemäß Bild 6 im Bezug auf die vormontierten Auflagerkonsolen ausgerichtet und justiert. Die beiden Stöße zwischen Mittelteil und den Randfeldern wurden geklebt ausgeführt und zusätzlich mit einem übergreifenden Carbongelege in Feinbeton verstärkt. Nach der Montage der Randschalung wurde der von Heidelberger Beton aus München bereitgestellte Infralichtbeton händisch einge-

5 Fabrication and erection of the exhibition bridge

For the final CarboLight Bridge, the five semi-precast segments were concreted again and temporarily stored on the wooden substructures. All visible surfaces of the segments were machine grinded and then impregnated. Partial defects were treated with concrete cosmetics.

Secured on the substructures, the individual parts were transported to the museum together with the raw materials for the upper carbon reinforced concrete layer and all the necessary aids. There, the segments were lifted onto an approx. 2.5 m high working platform by means of mechanical hoists and aligned and adjusted in relation to the pre-assembled support brackets as shown in Fig. 6. The two joints between the middle section and the side parts were glued and additionally strengthened with overlapping carbon fabrics in fine concrete. After assembling the edge formwork, the ILC provided by Heidelberger Beton from Munich was placed by hand, and the surface was roughened. In contrast to the test bridge, the top layer was poured. For this purpose, the carbon fabric was placed on the core layer and the consistency of the fine concrete was adjusted accordingly on site. Finally, the surface was smoothed.

After 28 days, the supporting structure was removed. Remarkable was the small lowering in the third points of only 10 mm. Since the bridge will be loaded with exhibits later, an additional weight of approx. 320 kg was placed on it during the first 24 hours to anticipate deformations. In the following days, the demonstrator



Bild 8: Mit viel Liebe zum Detail erfolgte der Feinschliff | **Fig. 8:** The finishing touches were made with great attention to detail | Source: Ansgar Pudenz

bracht und die Oberfläche aufgeraut. Im Unterschied zur Testbrücke wurde die Deckschicht gegossen. Dazu wurden das Carbongelege auf der Zwischenschicht platziert und die Konsistenz des Feinbetons vor Ort entsprechend eingestellt. Abschließend wurde die Oberfläche geglättet.

Nach 28 d wurde die Unterstützungsstruktur entfernt. Bemerkenswert war die geringe Absenkung von lediglich 10 mm in den Drittelpunkten. Da die Brücke zu einem späteren Zeitpunkt mit Exponaten belastet wird, wurde in den ersten 24 h eine Zusatzgewicht von ca. 320 kg aufgelegt, um Verformungen infolge Last vorwegzunehmen. In den Folgetagen wurde der Demonstrator betonkosmetisch nachbehandelt (Bild 8). Dabei wurden die Stoßfugen zwischen den Elementen farblich angeglichen, Fehlstellen in den Seitenflächen beseitigt und die Schichtgrenzen zwischen dem Carbonbeton und dem Infraleichtbeton aufgearbeitet. Die Deckschicht wurde grob angeschliffen, mit einer homogenisierenden Silikatlasur versehen und abschließend imprägniert.

Die 2,1 t leichte Demonstrationsbrücke (Bild 9) kann nach der geplanten Wiedereröffnung Mitte

was subjected to concrete cosmetic treatment (Fig. 8). The colour of the butt joints between the elements was adjusted, defects in the side surfaces were removed and the layer boundaries between the carbon reinforced concrete and the infra-light concrete were reworked. The top layer was roughly ground, given a homogenising silicate glaze and finally impregnated.

The Bridges and Hydraulic Engineering Section of the Deutsches Museum will be reopened in mid-2022. Then, the 2.1 t light CarboLight Bridge (Fig. 9) can be visited.

Acknowledgement

The project team at the Institute of Concrete Structures of TU Dresden would like to thank the German Research Foundation (DFG) for the funding within the framework of SPP 1542 and the Deutsches Museum Munich for the opportunity to show this unique construction in this setting and for the support during transport and assembly. In addition, we would like to thank the company HICONFORM for the form-



Bild 9: Formoptimierte CarboLight Bridge bereit für die Exponate | **Fig. 9:** Shape-optimised CarboLight Bridge ready for the exhibits | Source: Ansgar Pudenz

2022 in der Abteilung Brücken und Wasserbau des Deutschen Museums besichtigt werden.

Danksagung

Das Projektteam dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung im Rahmen des SPP 1542 und dem Deutschen Museum München für die Möglichkeit, diese einzigartige Konstruktion in diesem Rahmen zu zeigen und für die Unterstützung bei Transport und Montage. Zudem danken wir der Firma HICON-FORM für den Schalungsbau, der Heidelberger Beton GmbH für die Bereitstellung des ILC und dem Institut für Baustoffe der TU Dresden für die Unterstützung bei der Betonoptimierung. Bei unseren Kolleg:innen des Otto-Mohr-Labors bedanken wir uns für die Begleitung des gesamten Projekts, beginnend mit der Vorbereitung der Schalung, über Herstellung und Prüfung von Probekörpern und Elementen verschiedener Dimensionen einschließlich der Herstellung der endgültigen Fertigteile bis zur Unterstützung bei der Fertigstellung der Brücke in München.

work construction, Heidelberger Beton GmbH for providing the ILC, the Institute for Building Materials of TU Dresden for their support in optimising the concrete mixtures, and the team of the Otto Mohr Laboratory (TU Dresden) for accompanying the project, starting with the preparation of the formwork, the production and testing of specimens and elements of various dimensions including the manufacturing of the final pre-cast parts, and the assistance in completing the bridge in Munich.

Literatur | References

- [1] Wikipediaeintrag zum Deutschen Museum München: https://de.wikipedia.org/wiki/Deutsches_Museum.
- [2] Bühler, D.; Schlaich, J.; Göppert, K; Justiz, S.; Kupfer, H.; Nather, F.; Kreuzinger, H.; Albrecht, G.; Siebert, G.: Die Brücke im Raum – Besucherbrücke Deutsches Museum, Stahl-Informations-Zentrum, Deutsches Museum, VEGLA Vereinigte Glaswerke GmbH (Hrsg.), Dokumentation 539 (1999), Düsseldorf
- [3] Schlaich, M.; Hückler, A.; Lösch, C.: Infraleichtbeton (ILC). In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2021, Kap. 10, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2021, S. 907–952 – DOI: 10.1002/9783433610206.ch10
- [4] Wilhelm Kneitz Solutions in Textile GmbH (Hrsg.): Datenblatt SITgrid040KI. Ausgabe 03/2020
- [5] solidian (Hrsg.): Technisches Datenblatt solidian GRID Q95/95-CCE-38. Ausgabe 26.07.2017
- [6] Schladitz, F.; Walther, T.: DistTEX – für Textilbeton. TUDALIT Magazin (2013) 9, S. 13 – Tagungsband zur 5. Anwendertagung Textilbeton, 24./25.09.2013 in Friedrichshafen – online: <http://tudalit.de/aktuelles/tudalit-magazin/>
- [7] Übersicht DistTEX-System: <https://www.disttex.com/> (abgerufen am 06.01.2022)
- [8] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.

Alle Internetquellen wurden am 01.03.2022 geprüft. | All internet sources were proofed on 01.03.2022.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Demonstrator für die Teilprojekte Curbach im SPP 1542

Demonstrator for the subprojects Curbach in SPP 1542

Ausführung Execution:	TU Dresden
Beteiligte SPP-Projekte Participating SPP projects:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Curbach (1D): Querschnittsadaption für stabförmige Druckbauteile Cross sectional adaption for rod-shaped elements in compression ■ Curbach (2D): Leichte Deckentragwerke aus geschichteten Hochleistungs-betonen Lightweight ceiling structures made of layered high-performance concrete
Team Team:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Marc Koschemann (Projektingenieur Project engineer), Iurii Vakaliuk (Tragwerksplaner Structural engineer), Manfred Curbach (Entwurf und Projektleitung Design and project leader), Stefan Göschel (fotografische Begleitung photographic support); alle Institut für Massivbau all from Institute of Concrete Structures, TU Dresden ■ Kolleg:innen des Otto-Mohr-Laboratoriums, v. a. Colleagues of the Otto Mohr Laboratory, above all: Rainer Belger, Jens Hohensee, Mario Polke-Schmincke (Herstellung Manufacturing), Heiko Wachtel, Michael Liebe (Messtechnik Measurement technology), Torsten Hampel, Tino Jähnke, Maik Patricny, Andreas Thieme, Bernd Wehner (Versuchsvorbereitung und -durchführung Preparing and carrying out the laboratory tests), Sabine Wellner (Dokumentation Documentation) ■ Phillip Eckstein, Philipp Göbel (studentische Hilfskräfte student assistants)
Förderung Funding:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) ■ Deutsches Museum München ■ Institut für Massivbau der TU Dresden
Zeitraum Period:	02/2018–05/2021
Partner und Unterstützer Partners and supporters:	<ul style="list-style-type: none"> ■ HICONFORM – Freitaler Modellwerkstätten eG (Fertigung der Holzschalung Manufacturing wooden formwork) ■ Heidelberger Beton GmbH, München (ILC) ■ Institut für Baustoffe der TU Dresden (Rezeptur Feinbeton) Institute for Building Materials of the TU Dresden (recipe fine concrete) ■ Lehrstuhl für Massivbau der TU München (logistische Unterstützung) Chair of Concrete and Masonry Structures, TU of Munich (logistical support)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Koschemann, M.; Curbach, M.; Scheydt, J.: Leicht Bauen mit Beton – Vom Entwurf zur Realisierung einer Brücke aus Carbon- und Infraleichtbeton | Concrete light – A bridge made of carbon reinforced and infra-lightweight concrete. Beitrag zu den Ulmer Betontagen 2022, 21.–23.06.2022 in Neu-Ulm, zur Publikation angenommen | Contribution to the Ulmer Betontage 2022, 21.–23.06.2022 in Neu-Ulm, accepted for publication
- Koschemann, M.; Vakaliuk, I.; Curbach, M.: An ultra-light carbon concrete bridge: from design to realisation. Beitrag eingereicht zum | Contribution submitted to the: fib Congress 2022, 12.–16.06.2022 in Oslo

ANSCHLUSSPROJEKTE

SFB/Transregio 280 zu Konstruktionsstrategien für Carbonbeton | CRC/Transregio 280 on design strategies for carbon reinforced concrete

► Silke Scheerer¹, Birgit Beckmann¹, Jan Bielak², Sven Bosbach², Christopher Schmidt², Josef Hegger², Manfred Curbach¹

► ¹ Institut für Massivbau, TU Dresden

► ² Institut für Massivbau, RWTH Aachen University

1 Intention

Ein Blick in die Baugeschichte zeigt, dass sich in Abhängigkeit der vorhandenen Baumaterialien jeweils typische, sinnvolle Konstruktionsformen herausgebildet haben. Bereits vor mehr als 10.000 Jahren errichtete man Gebäude aus Ziegelmauerwerk [1]. Im antiken Rom erlebte der opus caementitium seine Glanzzeit [2]. Beide Materialien sind sehr druck-, aber wenig zugfest. Folglich findet man hauptsächlich druckbeanspruchte Strukturen wie Wände oder Kuppeln, für Decken wurde beispielsweise Holz genutzt. Für Naturbrücken aus zugfesten Pflanzenmaterialien hingegen sind Hängekonstruktionen prädestiniert. Mit Stahl und bewehrtem Beton können auch biegebeanspruchte Konstruktionen realisiert werden. Allerdings nimmt man hierbei in der Regel in vielen Tragwerksbereichen eine mangelhafte Materialausnutzung in Kauf.

Carbonbeton wird in Deutschland seit nunmehr fast 30 Jahren intensiv erforscht, zahlreiche Praxisprojekte wurden verwirklicht [3]. Dennoch muss man konstatieren, dass wir nun zwar filigraner bauen können, uns aber grundsätzlich sehr eng an die bewährten Konstruktionsweisen des Stahlbetonbaus halten. Dies hat zur Folge, dass das Potential des neuartigen Komposits nicht wirklich gut ausgenutzt wird. Um dieses Manko zu beheben, wurde gemeinsam von TU Dresden und RWTH Aachen University der Sonderforschungsbereich/Transregio 280 initiiert [4], [5]. Losgelöst von etablierten Denkmustern und basierend auf dem strukturme-

1 Intention

A look at the construction history shows that typical, sensible forms of construction have developed depending on the building materials available. More than 10,000 years ago, buildings were already made of brickwork [1]. In ancient Rome, the opus caementitium experienced its heyday [2]. Both materials were very resistant to pressure, but had little tensile strength. Consequently, one mainly finds structures subject to compressive stress such as walls or cupolas; for ceilings, for example, wood was used. For natural bridges made of tension-resistant plant materials, on the other hand, suspended structures are predestined. With steel and reinforced concrete, structural elements subject to bending stress can also be realised. However, in many areas of such structures, insufficient utilisation of the material is accepted.

Carbon reinforced concrete has been intensively researched in Germany for almost 30 years now; numerous practical projects have also been realised in the meantime [3]. Nevertheless, it must be stated that although we can now build more filigree, we basically stick very closely to the approved construction methods of steel reinforced concrete construction. As a result, the potential of the new type of composite is not really well exploited. To remedy this shortcoming, the Collaborative Research Centre/Transregio 280 was initiated jointly by TU Dresden and RWTH Aachen University [4], [5]. Detached from established thought patterns and based on the structur-

chanischen Verhalten neuartiger, mineralisch basierter Komposite sollen die Grundlagen für neue Leichtbau-Konstruktionsstrategien für ein zukunftsfähiges Bauen mit Beton geschaffen werden. Von der Nutzung innovativer Werkstoffkombinationen erwarten wir einen reduzierten Ressourcen- und Energieverbrauch bei gleichzeitig hoher Gebrauchstauglichkeit, Tragsicherheit und Dauerhaftigkeit. Zudem wird eine erhöhte Formenvielfalt einen ästhetischen Mehrwert im Sinne einer neuen Baukultur leisten.

2 Konsortium

Der langjährige Forschungsverbund von TU Dresden und RWTH Aachen vereint exzellente Kompetenzen. Zusätzlich ist das Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V. (ipf) eingebunden. Dem interdisziplinären Team an den zwei Standorten gehören Forschende aus den Fachgebieten Bauingenieurwesen, Botanik, Informatik, Maschinenwesen, Materialwissenschaften, Mathematik, Nachhaltigkeitsforschung, Photogrammetrie und Wissensarchitektur an.

al-mechanical behaviour of novel, mineral-based composites, the foundations for new lightweight construction strategies for building with concrete are to be created. We expect that the use of innovative material combinations will reduce resource and energy consumption while ensuring a high level of serviceability, load-bearing safety and durability at the same time. In addition, an increased variety of forms will provide aesthetic benefits in the sense of a new building culture.

2 Consortium

The long-standing research alliance of TU Dresden and RWTH Aachen University combines excellent competences. In addition to the two universities, the Leibniz Institute of Polymer Research Dresden e. V. (ipf) is also involved. The interdisciplinary team at the two locations includes researchers from the fields of civil engineering, botany, computer science, mechanical engineering, materials science, mathematics, sustainability research, photogrammetry and knowledge architecture.

3 Forschungsbereiche

Die Forschungsthemen sind in fünf Projektbereichen angesiedelt (Bild 1).

3 Research areas

The research topics are grouped into five project areas (Fig. 1).



Bild 1: Struktur des SFB/Transregio 280 | **Fig. 1:** Structure of CRC/Tranregio 280 | Graphic: Stefan Gröschel



Bild 2: Peltate Blätter als Vorbilder für materialeffiziente Knotenaus-bildungen und Flächentragwerke | **Fig. 2:** Peltate sheets as models for material-efficient nodes and plane load-bearing structures | Photo: Silke Scheerer

Ergebnis der Forschung in Projektbereich A – Inspiration – sind Impulse und Ideen als Basis für neuartige, carbonbetongerechte Geometrien, Konstruktionsweisen und Bauformen. Die Bandbreite reicht von botanischen „Tragwerken“ (Bild 2), über mathematische Methoden und kristallographische Gruppen bis hin zu Malerei und Science-Fiction (Bild 3).

Im Projektbereich B – Materialien – werden die einzelnen Komponenten des Werkstoffkomposits Carbonbeton weiterentwickelt. In Förderphase 1 wird (a) ein zielgerichteter Verbund zwischen Filamenten und Matrix sowohl im Hinblick auf die mechanischen als auch die Erhärtungseigenschaften angestrebt, werden (b) lastangepasste, dreidimensionale Bewehrungstechnologien entwickelt und wird (c) an umweltfreundlichen Matrixformulierungen gearbeitet.

Im Bereich C findet experimentelle und theoretische Forschung auf Bauteilebene statt. Schwerpunkte sind spezielle Eigenschaften filigraner Carbonbetonbauteile wie Rissbildung, Stabilität, Quasi-Duktilität und Resilienz sowie lastangepasste, materialeffiziente Konstruktionsformen auf Basis von Schalen und Faltwerken. Parallel zur experimentellen werden Modellierungsmethoden weiterentwickelt.

Projektbereich D adressiert grundlegende Fragen zur Herstellbarkeit gewichtsminimierter Betonkonstruktionen. In Förderphase 1 werden die generative Fertigung durch selektive Ablage

The results of the research in project area A – Inspiration – are impulses and ideas as a basis for new types of geometries, construction methods and structural types suitable for carbon reinforced concrete. The spectrum ranges from botanical load-bearing structures (Fig. 2), mathematical methods and crystallographic groups to painting and science fiction (Fig. 3).

In project area B – Materials – the individual components of the composite carbon reinforced concrete are being further developed. In funding phase 1, (a) a targeted bond between filaments and matrix is being developed with regard to both mechanical and hardening properties, (b) load-adapted, three-dimensional reinforcement technologies are being researched and (c) environmentally friendly matrix formulations are being worked on.

In area C, experimental and theoretical research is carried out at component level. The focus is on special properties of filigree carbon reinforced concrete components such as cracking, stability, quasi-ductility and resilience as well as load-adapted, material-efficient construction designs based on shells and folded structures. In parallel to the experimental work, modelling methods are being further developed.

Project area D addresses fundamental questions about the manufacturability of weight-minimised concrete structures. In funding phase 1, gener-



Bild 3: Science-Fiction als Inspirationsquelle für neue Bauformen | **Fig. 3:** Science fiction as a source of inspiration for new structural designs | Photo: Stefan Gröschel, sketch: Manfred Curbach

von mineralischer Matrix und Carbonbewehrung und die Extrusion von Carbonbeton betrachtet. Als vielversprechend werden Bewehrungen angesehen, die eine Inline-Umformung und eine zweistufige Aushärtung ermöglichen. Im Projektbereich D ist des Weiteren methodische Forschung zur räumlichen Analyse der äußeren und inneren Gestalt von Carbonbetonstrukturen z. B. mittels Computertomographie angesiedelt. Hiervon erhoffen wir uns vertiefte Erkenntnisse zum inneren Aufbau (a) des Komposits und (b) ganzer Bauteile, auf deren Basis das Tragverhalten zutreffender beschrieben und die Herstellungsprozesse gezielt weiterentwickelt werden können.

Hauptziel von Projektbereich E ist die Weiterentwicklung der Nachhaltigkeitsbewertung materialminimierter Carbonbetonstrukturen. Zudem obliegt den Forscher:innen eine übergreifende Beratungsfunktion in puncto Nachhaltigkeit für den gesamten SFB/TRR 280.

Das Grundanliegen des SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ – Bauen nach dem Prinzip „*form follows force*“ – findet im SFB/TRR 280 eine direkte Fortsetzung. Exemplarisch seien drei Teilprojekte (TP) hervorgehoben, die quasi direkt auf Erkenntnissen des SPP aufbauen:

- TP A01 (Reese/Simon) – Eine neue Methodologie zur Übertragung effizienter Lastabtragsmechanismen aus der Natur auf Strukturen aus Carbonbeton – hat zum Ziel, mit Hilfe eines modularen Strukturgenerators möglichst viele in die Praxis umsetzbare Varianten von bioinspirierten Strukturen aus Carbonbeton zu liefern. Für deren Zusammenwirken wird eine Art Modulbaukasten erstellt. Mittels Substrukturtechnik werden Systeme in einzelne Module zerlegt, die dann mit Methoden der Modellreduktion analysiert werden können; materielle Anisotropie, wie sie bspw. durch variierende Faseranordnung entsteht, wird berücksichtigt.
- Aus dem Titel des TP C01 (Curbach/Scheerer) – Auflösung kompakter Bauteile mittels sich durchdringender, lastabtragender schalenförmiger Strukturen – kann das Projektziel abgelesen werden. Nachdem sich verschiedene

ative manufacturing by selective deposition of mineral matrix and carbon reinforcement and the extrusion of carbon reinforced concrete are considered. Reinforcements that allow inline forming and two-stage curing are considered promising. Project area D also includes systematic research on the spatial analysis of the external and internal shape of carbon reinforced concrete structures, e.g. by means of computer tomography. We expect this to provide in-depth knowledge of the internal structure (a) of the composite and (b) of entire components. Based on this, the load-bearing behaviour can be described more accurately and the manufacturing processes can be improved.

The main objective of project area E is the further development of the sustainability assessment of material-minimised carbon reinforced concrete structures. In addition, the researchers have an overarching advisory function with regard to sustainability for the entire CRC/Transregio 280.

The basic concern of SPP 1542 – building according to the principle “*form follows force*” – finds a direct continuation in SFB/TRR 280. Three sub-projects (SP) are highlighted as examples, which are quasi directly based on the findings of the SPP:

- SP A01 (Reese/Simon) – A new methodology to transfer efficient mechanisms of load transmission from nature to structures made of carbon reinforced concrete – aims to use a modular structure generator to deliver as many variants of bio-inspired structures made of carbon reinforced concrete as possible that can be implemented in practice. A kind of modular construction kit is being created for their interaction. Using substructure technology, systems are divided into individual modules that can then be analysed using model reduction methods; material anisotropy, e.g. caused by varying fibre arrangement, is taken into account.
- The goal of SP C01 (Curbach/Scheerer) – Use of pervading internal shell-type substructures to dissolve compact components – can be read from the title. After several research groups in SPP 1542 have already worked on various methods of cross-section grading (see, for example, the SPP projects Curbach (2D), Sobek as well

Forscher:innen im SPP 1542 bereits mit diversen Methoden der Querschnittsgradierung beschäftigt haben (s. z. B. die SPP-Projekte Curbach (2D), Sobek sowie Sobek bzw. Garrecht et al.), wollen wir im SFB nun noch einen Schritt weiter gehen und im Bauteilinneren nicht nur Gewicht sparen, sondern dieses Innere gezielt durch effiziente, lastabtragende Strukturen gestalten (Bild 4). Im Vergleich zu Balken und Rahmentragwerken, bei denen mit steigender Spannweite die Biegebeanspruchung infolge Eigengewichts überproportional zunimmt, können räumlich gekrümmte Schalentragwerke mit minimalem Materialaufwand deutlich größere Spannweiten bewältigen. Im Idealfall herrschen in den dünnwandigen Strukturen ausschließlich Membranspannungen; statisch und bezüglich der Materialausnutzung ungünstige Biegespannungen werden vermieden. Diese Grundsätze sollen nun eine Skala kleiner im Inneren von Bauteilen zur Anwendung kommen.

- In TP C04 (Chudoba/Schladitz) – Stabilität und Quasiduktilität von dünnwandigen Carbonbetonbauteilen – wird unter anderem die im SPP 1542 an der RWTH Aachen entwickelte Oricrete-Methode (SPP-Projekt Chudoba/Hegger) weiterentwickelt. Neu ist die Idee, mittels Faltungen gezielt Umlagerungseffekte so zu nutzen, dass eine Quasiduktilität der (globalen) Struktur entsteht.

Angestrebt ist für den SFB/TRR 280 eine Laufzeit von zwölf Jahren. Perspektivisch wird sich der Forschungsfokus mit der Zeit in Richtung der Herstellung von Bauteilen verlagern. Auch werden wir zukünftig über die Bauteilebene hinaus auf Baustrukturen fokussieren, um einen klaren Schritt hin zu einer adäquaten architektonischen Formensprache zu gehen. Die Ideen aus Phase I sind Grundlage für die Entwicklung eines architektonischen Gesamtkonzeptes, das über rein bauliche/bautechnologische Aspekte hinaus auch die Auswirkungen des Bauens auf Umwelt und Gesellschaft berücksichtigt.

as Sobek and Garrecht et al.), we now want to go one step further. We not only want to save weight; we want to design the component's interior specifically with efficient, load-bearing structures (Fig. 4). Compared to beams and frame structures, in which the bending stress due to dead weight increases disproportionately with increasing span, spatially curved shell structures can cope with significantly larger spans requiring a minimum of material. Ideally, only membrane stresses prevail in the thin-walled structures; bending stresses that are unfavourable statically and in terms of material utilisation are avoided. These principles are now to be applied one scale smaller inside components.

- In SP C04 (Chudoba/Schladitz) – Stability and quasi-ductility of carbon reinforced concrete structural members – the Oricrete method developed in SPP 1542 at RWTH Aachen University (SPP project Chudoba/Hegger) is being further developed. The idea of using redistribution effects by means of folding in such a way that a quasi-ductility of the (global) structure is created is new.

The CRC/Transregio 280 is planned to run for twelve years. In perspective, the research focus will shift over time towards the production of building components. In the future, we will also focus beyond the component level to building structures in order to take a clear step towards an adequate architectural design language. The ideas from Phase I are the basis for the development of an overall architectural concept that goes beyond purely structural/building technology aspects and also takes into account the effects of building on the environment and society.

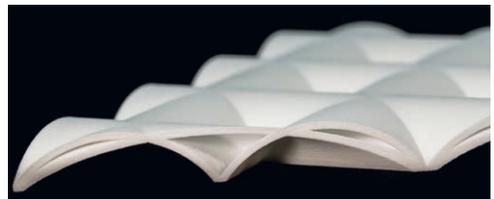


Bild 4: Idee für die innere Auflösung flächiger Bauteile mittels Schalenstrukturen | **Fig. 4:** Idea for the internal weight reduction of cross sections of planar components by shells structures | Photo: Sylke Scholz, Dresden

Literatur | References

- [1] Heinle, E.; Schlaich, J.: Kuppeln aller Zeiten, aller Kulturen. Stuttgart: DVA, 1996
- [2] Lamprecht, H.-O.: Opus Caementitium: Bautechnik der Römer. 5., verb. Aufl., Düsseldorf: Beton-Verlag, 1996
- [3] Scheerer, S.; Schladitz, F.; Curbach, M.: Textile reinforced Concrete – from the idea to a high performance material. In: Brameshuber, W. (Hrsg.): Proc. of FERRO-11 and 3rd ICTRC (PRO 98), 07.-10.06.2015 in Aachen, Bagnoux: RILEM Publ. S.A.R.L., 2015, S. 15–33
- [4] Homepage des SFB/TRR 280: <https://www.sfbtrr280.de/>. (02.03.2022)
- [5] Beckmann, B.; Bielak, J.; Bosbach, S.; Scheerer, S.; Schmidt, Chr.; Hegger, J.; Curbach, M.: Collaborative research on carbon reinforced concrete structures in the CRC/TRR 280 project. Civil Engineering Design 3 (2021) 3, S. 99–109 – DOI: 10.1002/cend.202100017

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

SFB/Transregio 280: Konstruktionsstrategien für materialminimierte Carbonbetonstrukturen – Grundlagen für eine neue Art zu bauen

CRC/Transregio 280: Design strategies for material-minimised carbon reinforced concrete structures – Principles of a new approach to construction

Sprecher Speaker:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Adresse Address:	TU Dresden, Institut für Massivbau, 01062 Dresden
Kontakt Contact:	+49 351 463-37660 manfred.curbach@tu-dresden.de https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb
Stellvertretender Sprecher Deputy speaker:	Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Adresse Address:	RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Massivbau Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 51074 Aachen
Kontakt Contact:	+49 241 80 25170 jhegger@imb.rwth-aachen.de https://www.imb.rwth-aachen.de/
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 280
Förderzeitraum Period:	seit since: 01.07.2020
Partner Partner:	Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V.
Homepage Website:	https://www.sfbtrr280.de/

ANSCHLUSSPROJEKTE

Industrieller 3D-Betondruck durch selektive Zementaktivierung – Verfahren, Material, Anwendungen | Industrial 3D concrete printing by selective cement activation – process, material, applications

► Daniel Talke¹, Daniel Weger², Klaudius Henke¹, Thomas Kränkel², Dirk Lowke³, Christoph Gehlen², Stefan Winter¹

► ¹ Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München

► ² Centrum für Baustoffe und Materialprüfung, TU München

► ³ Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig

Die selektive Zementaktivierung (SCA) ist ein additives Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus Beton. Die SCA gehört zu den Verfahren des selektiven Bindens, bei denen schüttfähiges Material (hier eine Trockenmischung aus Zement und Gesteinskörnung) in dünnen Schichten ausgebracht und durch Einbringen einer flüssigen Komponente (hier Wasser) selektiv gebunden wird. Verglichen mit anderen Verfahren der additiven Fertigung mit Beton sind bei der SCA sowohl die Auflösung als auch die geometrische Freiheit besonders hoch.

Die SCA erlaubt die automatische Herstellung komplexer, frei geformter Betonbauteile auf der Basis eines digitalen 3D-Modells der gewünschten Bauteilgeometrie. Die SCA zeigt damit ein großes Potential im Hinblick auf die Realisierung einer durchgängig digitalen Baufabrikation. Die in diesem Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse, zusammen mit den entwickelten Materialien, Prozessen und Geräten, liefern einen wichtigen Beitrag, um die additive Fertigung durch SCA von der Grundlagenforschung in die prototypische Industrieanwendung zu überführen.

Mithilfe von eigens für das Projekt entwickelten Versuchsdruckern (Bild 1, links) konnten umfangreiche Materialversuche durchgeführt werden, um die Material-Verfahrens-Kombination zu erforschen. Dabei kamen Portlandzement

Selective cement activation (SCA) is an additive manufacturing process for the fabrication of concrete elements. SCA belongs to the group of the selective binding processes in which bulk material (here a dry mixture of cement and aggregate) is spread in thin layers and selectively bound by applying a liquid component (here water). Compared to other additive manufacturing processes using concrete, both resolution and geometric freedom are particularly high with SCA.

SCA allows the automatic fabrication of complex, free-formed concrete elements based on a digital 3D model of the desired geometry. SCA thus shows great potential with regard to the realization of end-to-end digital construction. The findings gained in this research project, together with the developed materials, processes and equipment, provide an important contribution to transfer additive manufacturing by SCA from basic research to a prototypical industrial application.

With the aid of experimental 3D printers specially developed for the project (Fig. 1, left), extensive material tests were carried out to investigate the material-process combination. Portland cement was used as binder and quartz sand or expanded glass granules as aggregates. Tests on the influence of the water/cement ratio showed that, in contrast to conventionally produced

als Bindemittel und Quarzsand bzw. Blähglasgranulat als Gesteinskörnung zum Einsatz. Versuche zum Einfluss des Wasser/Zement-Werts zeigten, dass, im Gegensatz zu konventionell hergestelltem Beton, die Festigkeit des Materials mit steigendem Wasser/Zement-Wert zunimmt. Allerdings beeinflussen höhere Wassergehalte die Formtreue negativ. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass durch die Zugabe von Methylcellulose die Formtreue der hergestellten Objekte signifikant verbessert werden kann [1]. Neben diversen standardisierten Prüfkörpern (i. d. R. Würfel, Prismen und Zylinder) zur Prüfung insbesondere der Formtreue, Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons wurden im Projekt auch zahlreiche frei geformte Demonstrationsojekte gefertigt (Bild 1, rechts). Versuche mit Blähglasgranulat zeigten schließlich, dass es mit der SCA auch möglich ist, gut wärmedämmende Leichtbetonbauteile z. B. für Anwendungen in der Gebäudehülle herzustellen [2].

Projektbegleitend wurde vom Anwendungspartner Progress Maschinen & Automation AG (Brixen, Italien) ein Großgerät mit einem Bau- raum von 10 m³ entwickelt und damit das Ver-

crete, the strength of the material increases with increasing water/cement ratio. On the other hand, higher water contents also have a negative influence on the dimensional accuracy. However, it was shown that the addition of methylcellulose can significantly improve the dimensional accuracy of the manufactured objects [1]. In addition to various standardized test specimens (usually cubes, prisms and cylinders) for testing the dimensional accuracy, strength and durability of the concrete, numerous free-formed demonstration objects were also manufactured in the project (Fig. 1, right). Finally, tests with expanded glass granules showed that with SCA it is also possible to produce thermally insulating lightweight concrete components, e.g. for applications in the building envelope [2].

Accompanying the project, a large-scale device with a build volume of 10 m³ was developed by the application partner Progress Maschinen & Automation AG (Brixen, Italy), thus transferring the process to the large scale. Due to the promising results, a new department for additive manufacturing in construction was established within the existing company structure. SCA services and

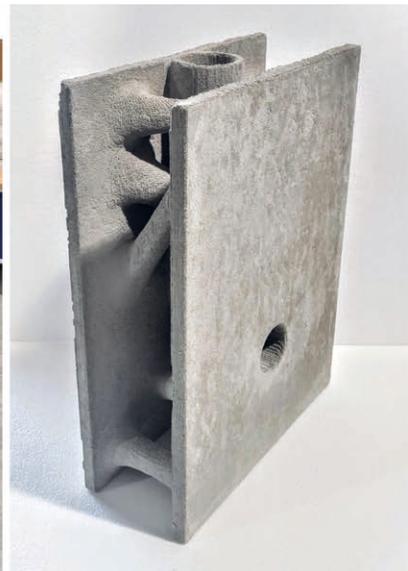


Bild 1: Versuchsdrucker V2 (links) und im Gerät gefertigtes Wandelement (rechts) | **Fig. 1:** Experimental 3D printer V2 (left) and wall element fabricated with the device (right) | Source: Daniel Talke, Klaudius Henke

fahren in den großen Maßstab übertragen. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse wurde innerhalb der bestehenden Unternehmensstruktur eine eigene Abteilung für die additive Fertigung im Bauwesen etabliert. Unter dem Namen „Progress 3D Innovation“ werden SCA-Dienstleistungen und 3D-Drucker angeboten. Ein erstes Großgerät sowie ein Versuchsgesetz wurden bereits an zwei Standorte in Deutschland ausgeliefert.

Die Forschungsarbeiten an der SCA werden an der Technischen Universität Braunschweig im Rahmen des Teilprojektes A01 im DFG SFB/Transregio TRR 277 „Additive Manufacturing in Construction – The Challenge of Large Scale“ weitergeführt. Schwerpunkte des Projektes sind die noch offenen Fragestellungen zur Material-Verfahrens-Interaktion auf Makro- und Mikroebene sowie die Integration von Bewehrung.

3D printers are offered under the name “Progress 3D Innovation”. A first large-scale device as well as an experimental device have already been delivered to two locations in Germany.

The research work on SCA is being continued at the Technische Universität Braunschweig as part of project A01 in the DFG SFB/Transregio TRR 277 “Additive Manufacturing in Construction – The Challenge of Large Scale”. The project focuses on the still open questions of material-process interaction at the macro and micro level, as well as the integration of reinforcement.

Literatur | References

- [1] Lowke, D.; Talke, D.; Dressler, I.; Weger, D.; Gehlen, C.; Ostertag, C.; Rael, R.: Particle bed 3D printing by selective cement activation – Applications, material and process technology. *Cement and Concrete Research* 134 (2020), 106077 – DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106077
- [2] Weger, D.; Kim, H.; Talke, D.; Henke, K.; Kränkel, T.; Gehlen, C.: Lightweight Concrete 3D Printing by Selective Cement Activation – Investigation of Thermal Conductivity, Strength and Water Distribution. In: Bos, F. P.; Lucas, S. S.; Wolfs, R. J. M.; Salet, T. A. M. (Hrsg.): *Proc. of 2nd RILEM Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication*, 06.–09.07.2020 (online), publ. in RILEM Bookseries, vol. 28), Cham: Springer Int. Publ., 2020, S. 162–171 – https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_17

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Industrieller 3D-Betondruck durch selektive Zementaktivierung – Verfahren, Material, Anwendungen

Industrial 3D concrete printing by selective cement activation – process, material, applications

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Adresse Address:	TU München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Franz-Langinger-Straße 10, 81245 München
Kontakt Contact:	+49 89 289 27061 gehlen@tum.de www.mae.ed.tum.de/cbm
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Adresse Address:	TU München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion (hb), Arcisstraße 21, 80333 München
Kontakt Contact:	+49 89 289 22416 winter@tum.de www.cce.ed.tum.de/hbb
Antragsteller 3 Applicant 3:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke
Adresse Address:	TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig
Kontakt Contact:	+49 531 391 5508 D.Lowke@ibmb.tu-bs.de https://www.tu-braunschweig.de/ibmb/fachgebiete/fachgebiet-baustoffe
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project (Projektnummer Project number: 389705984)
Förderzeitraum Period:	01.11.2017–29.02.2020
Team Team:	Daniel Talke Daniel Weger Klaudius Henke Thomas Kränkel
Partner Partners:	Progress Maschinen & Automation AG, Brixen (Italien)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Talke, D.; Henke, K.; Weger, D.: Selective Cement Activation (SCA) – new possibilities for additive manufacturing in construction. In: Lázaro, C.; Bletzinger, K.-U.; Oñate, E. (Hrsg.): Form and Force – Proc. of the IASS Annual Symp. 2019/Structural Membranes 2019, 07.–10.10.2019 in Barcelona (Spanien), 2019, S. 1294–1301
- Weger, D.; Kim, H.; Talke, D.; Henke, K.; Kränkel, T.; Gehlen, C.: Lightweight Concrete 3D Printing by Selective Cement Activation – Investigation of Thermal Conductivity, Strength and Water Distribution. In: Bos, F. P.; Lucas, S. S.; Wolfs, R. J. M.; Salet, T. A. M. (Hrsg.): Proc. of 2nd RILEM Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication, 06.–09.07.2020 (online), publ. in RILEM Bookseries, vol. 28), Cham: Springer Int. Publ., 2020, S. 162–171 – https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_17
- Lowke, D.; Talke, D.; Dressler, I.; Weger, D.; Gehlen, C.; Ostertag, C.; Rael, R.: Particle bed 3D printing by selective cement activation – Applications, material and process technology. Cement and Concrete Research 134 (2020), 106077 – DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106077

Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

- Papadopoulou, C.: Additive Fertigung durch selektive Zementaktivierung – Versuche zur Erhöhung der Packungsdichte. Bachelor's Thesis, 2018
- Heggie, A.: Additive Fertigung mittels der selektiven Zementaktivierung – Einfluss des Wasserdrucks und des Wassergehalts auf die Festigkeit und Formtreue. Bachelor's Thesis, 2018
- Kleiber, J.: Additive Fertigung mittels der Selektiven Zement Aktivierung – Verbesserung der (Biegezug-)Festigkeit durch Zugabe von Additiven im Trockengemisch. Bachelor's Thesis, 2019
- Mihuta, V.: Additive Fertigung mittels der Selektiven Zement Aktivierung – Beeinflussung der Formtreue mittels Zugabe von Additiven. Master's Thesis, 2019
- Eichhorn, M.: Additive Fertigung mittels der Selektiven Zement Aktivierung – Optimierung der Packungsdichte des Partikelbetts. Bachelor's Thesis, 2020
- Saile, B.: Additive Fertigung mittels der Selektiven Zement Aktivierung – Untersuchungen zur Packungsdichte. Master's Thesis, 2020
- Talke, T.: Additive Manufacturing of concrete by selective cement activation – SCA. Diss. (Einreichung voraussichtlich | Submission expected: 2022)

ANSCHLUSSPROJEKTE

Automatisierte Herstellungstechnologie zur Fertigung von dünnwandigen 3D-geformten Verbundelementen für nachhaltige energieeffiziente Fassadenlösungen – „GreenFACE“ | Automated manufacturing technology for the production of thin-walled 3D-shaped composite elements for sustainable, energy-efficient facade solutions – “GreenFACE”

- ▶ Daniel Schönfelder, Henrik Funke, Sandra Gelbrich, Lothar Kroll
- ▶ Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung (SLK), TU Chemnitz

Zielstellung des Forschungsprojektes war die Entwicklung eines montagefertigen Verbundsystems aus vorgefertigten Elementen, Verankerungen und Unterkonstruktion zur Umsetzung nachhaltiger Fassadenlösungen. Dabei wurde ein neuer mineralischer Materialverbund mit textiler Verstärkung eingesetzt, der die Fertigung extrem dünnwandiger 3D-geformter Elemente mit hoher Passgenauigkeit gestattet. Das somit eröffnete sehr große Leichtbaupotential geht mit einer starken Gewichtsreduktion einher und ermöglicht damit erhebliche Ressourcen- und Energieeinsparungen.

Zur technisch-technologischen Umsetzung der neuen Fassadenelemente wurde eine teilautomatisierte Herstellungstechnologie entwickelt und erprobt (Bild 1), welche die Entwicklung einer effizienten mehrfach verwendbaren multifunktionalen Schalung, die exakte Positionierung von Verstärkungstextilien und Einbauelementen sowie die Einbringung von Matrix beinhaltet.

Für die Umsetzung der genannten Arbeitsschritte wurde eine prototypische Versuchsanlage konzipiert und technisch umgesetzt (Bild 2), bei welcher der Fokus auf einer ganzheitlichen

The aim of the research project was the development of an assembly working system consisting of careful elements, anchors and substructure for the development of leading facade solutions. Has become a new mineral composite material with a textile effect, which allows the production of extremely narrow-walled 3D high-performance elements with a high degree of accuracy. This means that there is a very great potential for lightweight construction, with a strong weight reduction and thus enables what it is to do.

For a better technological check of the new facade elements, a partially automated production technology was developed and tested (Fig. 1), which works the development of an effective common multifunctional formwork, the exact positioning of reinforcement textiles and built-in elements as well as the introduction of matrix.

To take into account the workforce, a prototype test facility was run and controlled (Fig. 2), with each focus on a holistic energy and cost-efficiency management solution. With the help of political manufacturing technology and the prototype test facility, it was possible to improve

energie- und kosteneffizienten Lösung lag. Mit Hilfe der entwickelten Fertigungstechnologie sowie der prototypischen Versuchsanlage war es möglich, doppelt gekrümmte Fassadenelemente mit einem hohen Vorfertigungsgrad herzustellen. Die damit einhergehende deutliche Verringerung der Montagezeit und somit der gesamten Bauzeit eröffnet für die innovative energieeffiziente Fassadenlösung GreenFACE neue Einsatzgebiete in den Bereichen Neubau und Sanierung von Bestandsbauten.

double-curved facade elements with a high degree of prefabrication. The associated rights of assembly time and thus the total construction time for the innovative energy efficiency of the GreenFACE facade solution new areas of application in the new construction and renovation of existing buildings.

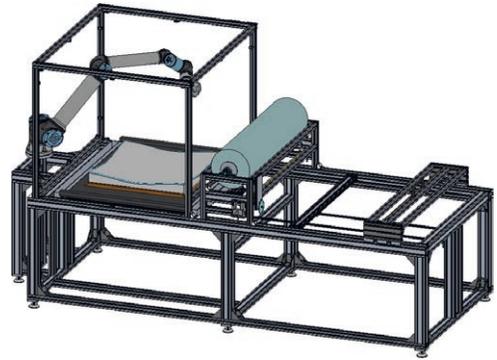


Bild 1: Versuchsanlage zur Fertigung doppelt gekrümmter Fassadenelemente | **Fig. 1:** Test facility for the production of double-curved facade elements | Source: Daniel Schönfelder



Bild 2: GreenFACE Referenzfassade | **Fig. 2:** GreenFACE reference façade | Source: Daniel Schönfelder

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Automatisierte Herstellungstechnologie zur Fertigung von dünnwandigen 3D-geformten Verbundelementen für nachhaltige energieeffiziente Fassadenlösungen – „GreenFACE“

Automated manufacturing technology for the production of thin-walled 3D-shaped composite elements for sustainable, energy-efficient facade solutions – „GreenFACE“

Antragstellerin Applicant:	TU Chemnitz, Institut für Strukturleichtbau, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung
Adresse Address:	Reichenhainer Straße 31/33, 09126 Chemnitz
Kontakt Contact:	Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich +49 371 531 321 92 sandra.gelbrich@mb.chemnitz.de www.leichtbau.tu-chemnitz.de
Förderer Funding:	Sächsische Aufbaubank (SAB) aus dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE-Technologieförderung)
Förderzeitraum Funding period:	01.09.2017–31.08.2020
Team Team:	Forschungsbereich Leichtbau im Bauwesen (LBW), TU Chemnitz
Partner Partners:	Medicke Metallbau GmbH, Glauchau Fiber-Tech Construction GmbH, Chemnitz

ANSCHLUSSPROJEKTE

Weitspannende Sandwichelemente mit vorge- spannten Deckschichten aus Carbonbeton | Wide-span sandwich elements with prestressed facings made of carbon reinforced concrete

- ▶ Ann-Christine von der Heid, Norbert Will, Josef Hegger
- ▶ Lehrstuhl und Institut für Massivbau der RWTH Aachen University

Sandwichelemente mit Betondeckschichten besitzen gute bauphysikalische Eigenschaften, einen hohen Vorfertigungsgrad, geringe Montagezeiten und eine gute architektonische Gestaltbarkeit. Werden die Deckschichten mit einer Betonstahlbewehrung ausgeführt, ergibt sich ihre Dicke aufgrund der in EC 2 [1] geforderten Mindestbetondeckung zum Korrosionsschutz der Bewehrung zu etwa 80 mm [2]. Weiterhin wird bei der Bemessung von Stahlbetonsandwichelementen die Verbundtragwirkungen zwischen den einzelnen Schichten nicht angesetzt, sodass das volle Potenzial der Sandwichbauweise bei Stahlbetonsandwichelementen nicht ausgeschöpft wird. Das Forschungsvorhaben beschäftigte sich daher, aufbauend auf den Ergebnissen aus den Projekten HE 2637/16-1 und HE 2637/16-2 [3], s. S.356 ff., mit der praxisnahen Umsetzung von weitspannenden Sandwichelementen mit dünnen Deckschichten unter Ausnutzung der Sandwichtragwirkung. Ein analytisches Berechnungsmodell, das im Zuge des Vorhabens entwickelt wurde, berücksichtigt die Verbundtragwirkung zwischen den einzelnen Schichten und kann das Trag- und Verformungsverhalten zutreffend abbilden.

Das ursprüngliche Projektziel waren Entwicklung und Herstellung von weitspannenden Dachelementen mit doppelt gekrümmter oder gefalteter Geometrie. Nach Rücksprache mit verschiedenen Fertigteilwerken wurde jedoch ein deutlich größeres Interesse an ebenen Strukturen bekundet, um die Elemente flexibel als Dach- oder auch als Fassadenelemente einzusetzen. Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde daher im Projektverlauf mit der Herstel-

Sandwich elements with concrete facings have excellent physical properties, a high level of prefabrication, short assembly times and various architectural design options. The facings are usually produced with steel reinforcement, which leads to a thickness of about 80 mm due to the minimum concrete cover required in EC 2 [1] for corrosion protection of the reinforcement [2]. Furthermore, the bond between the single layers are not taken into account in the design of sandwich elements, so that the full potential of sandwich constructions with reinforced concrete facings is not completely exhausted. Based on the projects HE 2637/16-1 and HE 2637/16-2 [3], see page 356 et seq., the focus of the transfer project was set on wide-span sandwich elements with thin facings made of carbon reinforced concrete and their practical production. An analytical model, which was developed during the project term, takes into account the bond between the single layers and can accurately represent the load-bearing and deformation behaviour of the novel sandwich elements.

The first project aim was the development and production of wide-span roof elements with double-curved or folded geometry. However, after consulting various precast factories, a much greater interest was expressed in flat structures in order to use the elements flexibly as roof or façade elements. Hence, the aim of the research project was adjusted during the project term and the focus was set on the production of elements with plane geometry.

For the production of the thin concrete facings, a non-metallic reinforcement made of carbon fi-

lung von Elementen mit ebener Geometrie angepasst.

Zur Herstellung der dünnen Deckschichten wird anstelle einer konventionellen Betonstahlbewehrung eine nichtmetallische Bewehrung aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) verwendet (Bild 1). Während ebene maschenartige Bewehrungsgitter aus CFK ein fein verteiltes Rissbild im Zustand II sicherstellen, vergrößert die Vorspannung der Deckschichten mit Litzen aus CFK die Biegeschlankheit der Elemente und verringert das Risiko einer Rissbildung im Gebrauchszustand. Die beiden Deckschichten aus hochfestem Beton werden durch einen Kern aus Zwei-Komponenten-Polyurethan (PUR) verbunden, der einen gleichmäßig guten Verbund zwischen den einzelnen Schichten sicherstellt. Zusätzlich wurden auch linienförmige Verbindungsmittel aus alkaliresistentem Glas (Bild 2) verwendet, um deren Auswirkung auf die Sandwichtragwirkung zu untersuchen.

Die in Bild 1 dargestellte Dicke der Deckschicht von 6 cm ergibt sich aus der erforderlichen Mindestbetondeckung der Bewehrungselemente, die zum einen für eine rissfreie Spannkrafteinleitung der CFK-Litzen und zum anderen für die Kraftübertragung in den Übergreifungsstößen der Bewehrungsgitter notwendig ist. Dafür wurden Spannkrafteinleitungsversuche und Dehnkörperversuche durchgeführt. Das Verbundverhalten der CFK-Litzen für die Anwendung der Vorspannung mit sofortigem Verbund wurde

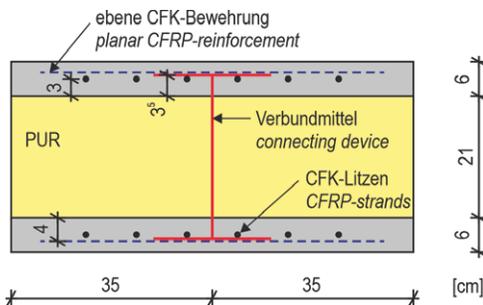


Bild 1: Untersuchte Sandwichelemente – exemplarischer Querschnitt eines großformatigen Versuchskörpers | **Fig. 1:** Sandwich panels investigated – exemplary cross section of a large-sized specimen | © IMB der RWTH Aachen

bre reinforced plastic (CFRP) was used instead of conventional steel reinforcement (Fig. 1). While plane mesh-shaped reinforcement grids made of CFRP ensure a finely distributed crack pattern, the prestressing of the facings with strands made of CFRP increases the span of the elements and reduces their deformation. The two facings made of high-strength concrete are connected by a core of two-component polyurethane (PU), which ensures a uniformly good bond between the single layers. In addition, linear connecting devices made of alkali-resistant glass (Fig. 2) were also used to investigate their impact on the sandwich effect.

The thickness of the facings of 6 cm shown in Fig. 1 results from the required minimum concrete cover of the reinforcement elements. On the one hand, the concrete cover is necessary for a crack-free transmission zone of the CFRP strands and on the other hand for force transmission in the lap joints of the reinforcement grids. For this purpose, tests on the transfer length and uniaxial tensile tests were conducted. The bond behaviour of the pretensioned CFRP strands was investigated in pull-out tests with different degrees of prestressing in order to

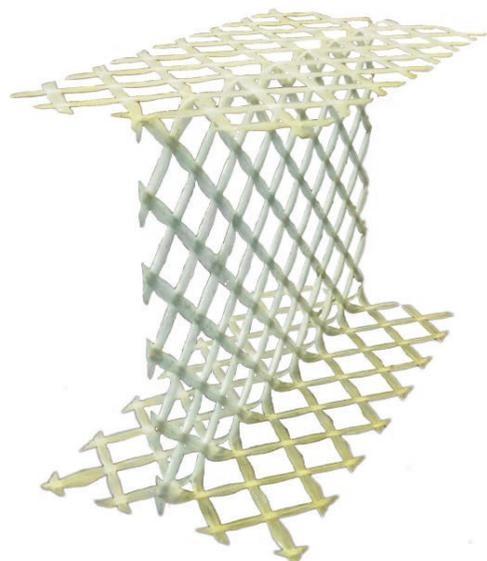


Bild 2: Verwendetes Verbindungsmittel | **Fig. 2:** Connection device used | © IMB der RWTH Aachen, s. a. [3], [5]

in Pull-out-Versuchen mit unterschiedlichen Vorspanngraden untersucht, um den günstigen Einfluss des Hoyer-Effekts zu bestimmen. Experimentelle Untersuchungen an kleinformatigen Sandwichelementen gaben Aufschluss über das Zug- und Schubverhalten des Polyurethans und der Verbundmittel. Die Ergebnisse der kleinformatigen Versuche [4] dienen im weiteren Projektverlauf der Vorbemessung von großformatigen Elementen unter Biegebeanspruchungen sowie als Eingangsparameter für die numerischen und analytischen Modelle.

Konventionelle Herstellungsmethoden, wie das Positiv- oder Negativverfahren, können für Sandwichelemente mit einem geschäumten Kern nicht angewendet werden. Daher wurde ein neuartiges Verfahren entwickelt, bei dem zunächst die Deckschichten auf der langen Seite stehend simultan vorgespannt und betoniert werden. Die stehende Position der Elemente ermöglicht im nächsten Schritt das Eingießen des flüssigen PUR-Dämmstoffs zwischen die bereits erhärteten und vorgespannten Betonschalen. Um den bei der Expansion des PUR entstehenden Druck aufnehmen zu können, werden die Deckschichten mit einer biegesteifen und verformungsarmen Schalung umschlossen. Die neuartige Fertigungsmethode wurde durch die Herstellung von vier großformatigen Elementen mit Abmessungen von $8,2 \times 0,7 \times 0,33$ m validiert. Anschließend wurden in Vier- und Drei-Punkt-Biegeversuchen das Tragverhalten untersucht. Bild 3 zeigt beispielhaft das Querkraftversagen eines Trägers mit einer Verbundmittelreihe. Eine genauere Beschreibung des Herstellungsverfahrens und der Ergebnisse der Vier-Punkt-Biegeversuche finden sich in [5] und [6]. Die im Projekt hergeleiteten analytischen

measure the positive influence of the Hoyer effect. With tests on small-scale sandwich elements the tensile and shear behaviour of the polyurethane and the connecting devices could be determined. The results of small-scale tests [4] were used in the further project term for the preliminary design of large-scale elements under bending loads and as input parameters for the numerical and analytical models.

Conventional manufacturing methods, such as the face-up or face-down method, cannot be used for sandwich elements with a foamed core. Therefore, a novel method was developed where the facings are simultaneously concreted and prestressed standing on the longitudinal side. This position of the elements allows the pouring of the liquid PUR between the already hardened and prestressed concrete facings. To absorb the pressure of the expanding PU, the facings are enclosed with a braced wooden formwork. The novel manufacturing method was validated by producing four large-sized elements with dimensions of $8.2 \times 0.7 \times 0.33$ m³. Subsequently, the load-bearing behaviour was investigated in four- and three-point bending tests. Fig. 3 shows an example of the shear failure of a beam with one connecting device. A more detailed description of the manufacturing process and the results of the four-point bending tests can be found in [5] and [6]. The analytical models derived in the project for the calculation of the load-bearing and deformation behaviour were finally validated using the large-scale tests and FE simulations.

The large-sized sandwich elements with prestressed, filigree concrete facings developed in the transfer project impressively demonstrate the great potential of this construction method,



Bild 3: Versagen eines Versuchskörpers im Vier-Punkt-Biegeversuch | **Fig. 3:** Failure of a test specimen in a four-point bending test | © IMB der RWTH Aachen

Modelle zur Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens wurden abschließend anhand der großformatigen Versuche und FE-Simulationen validiert.

Die im Transferprojekt entwickelten großformatigen Sandwichelemente mit vorgespannten, filigranen Betondeckschichten belegen eindrucksvoll das große Potenzial dieser Bauweise, die gleichermaßen für schlanke Fassaden- und Dachelemente mit großer Tragfähigkeit hervorragend geeignet ist. Bei der Materialauswahl und Herstellung der Elemente stand eine möglichst praxisnahe Herstellung im Vordergrund. Für die Etablierung in der Baupraxis sollte der Fokus auf einer optimierten Fertigung liegen, wie sie beispielsweise durch Wendeanlagen mit Stahlschalungen möglich ist.

which is suitable for slender façade and roof elements with great load-bearing capacity. The materials and the production method were chosen for a practical application. For the establishment in building practice, the focus should be set on an optimised production in further investigations, for example with rotation devices and steel formwork.

Literatur | References

- [1] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 +AC:2010.
- [2] Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e.V. (FDB e.V., Hrsg.): Merkblatt Nr. 3 zur Planung vorgefertigter Stahlbetonfassaden (11/2016). Bonn, 2016
- [3] Stark, A.: Analysis of Prestressed Sandwich Panels with Ultra-High Performance Concrete Facings. Diss., RWTH Aachen University, 2017
- [4] von der Heid, A.; Bosbach, S.; Stark, A.; Schulze-Ardey, J. P.; Hegger, J.: Thin Sandwich Elements Prestressed with CFRP Tendons. In: Ilki, A.; Ispir, M.; Inci, P. (Hrsg.): Proc. of 10th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2020), 30.06.–02.07.2021 in Istanbul (Türkei), S. 351–362
- [5] von der Heid, A.; Bosbach, S.; Hegger, J.: Production and performance of sandwich elements with textile reinforced facings prestressed with CFRP. In: Zhao, B.; Lu, X. (Hrsg.): Concrete Structures for Resilient Society – Proc. of fib Symp. 2020, 22.–24.09.2020 in Shanghai (China; digitale Veranstaltung), 2020, S. 248–255
- [6] von der Heid, A.; Stark, A.; Will, N.; Hegger, J.: Weitspannende Sandwichelemente mit vorgespannten Textilbetondeckschichten und geschäumtem PUR-Kern. Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021) 7, S. 498–507 – DOI: 10.1002/best.202100023

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Gefaltete und gekrümmte Sandwichbauteile aus Hochleistungswerkstoffen für weitgespannte Dachelemente

Folded-plate and curved sandwich panels made of high performance materials for long-span roof elements

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Adresse Address:	RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
Kontakt Contact:	+49 241 80 25170 hegger@imb.rwth-aachen.de www.imb.rwth-aachen.de
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnisstransferprojekt Knowledge Transfer Project
Förderzeitraum Funding period:	01.11.2017–31.10.2019 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 31.10.2020
Team Team:	Ann-Christine von der Heid Norbert Will
Partner Partners:	BASF Construction Chemicals GmbH, Mannheim BASF Polyurethanes GmbH, Boxtel (Niederlande) FTA Forschungsgesellschaft für Textiltechnik Albstadt mbH (Groz-Beckert KG), Albstadt

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- von der Heid, A.; Stark, A.; Hegger, J.; Schmidt, M.; Bielak, J.: Production and structural performance of thin doubly curved elements prestressed with CFRP tendons. In: Institute for FRP in Construction (Hrsg.): Proc. of Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures 14 – FRPRCS 14, 04.–07.06.2019 in Belfast (Irland), 2019 (digitaler Tagungsband)
- von der Heid, A.; Stark, A.; Hegger, J.: Doppelt gekrümmte Sandwichelemente mit Deckschichten aus vorgespanntem Carbonbeton. In: C³ – Carbon Concrete Composite e. V.; TUDALIT e. V. (Hrsg.): Tagungsband der 11. Carbon- und Textilbetontage 2019, 24./25.09.2019 in Dresden, 2019, S. 74/75
- von der Heid, A.; Bosbach, S.; Hegger, J.: Production and performance of sandwich elements with textile reinforced facings prestressed with CFRP. In: Zhao, B.; Lu, X. (Hrsg.): Concrete Structures for Resilient Society – Proc. of fib Symp. 2020, 22.–24.09.2020 in Shanghai (China; digitale Veranstaltung), 2020, S. 248–255
- von der Heid, A.; Stark, A.; Will, N.; Hegger, J.: Weitspannende Sandwichelemente mit vorgespannten Textilbetondeckschichten und geschäumtem PUR-Kern. Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021) 7, S. 498–507 – DOI: 10.1002/best.202100023
- von der Heid, A.; Bosbach, S.; Stark, A.; Schulze-Ardey, J. P.; Hegger, J.: Thin Sandwich Elements Prestressed with CFRP Tendons. In: Ilki, A.; Ispir, M.; Inci, P. (Hrsg.): Proc. of 10th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2020), 30.06.–02.07.2021 in Istanbul (Türkei), S. 351–362
- von der Heid, A.: Zum Tragverhalten von Sandwichelementen aus Textilbeton mit schlaff bewehrten und vorgespannten Deckschichten. Diss., 2021

ANSCHLUSSPROJEKTE

Magnetische Ausrichtung von Mikro-Stahldrahtfasern in UHPFRC | Magnetic alignment of microsteel fibers in UHPFRC

- ▶ Lukas Ledderose, Harald Kloft
- ▶ Institut für Tragwerksentwurf (ITE), TU Braunschweig

1 Einleitung

Ausgangspunkt für dieses Anschlussprojekt am Institut für Tragwerksplanung der TU Braunschweig war der Wunsch, die Effektivität des Faseraanteils derjenigen Betonbauteile zu erhöhen, die zuvor im SPP-Projekt *Entwicklung neuartiger Verbindungen für komplexe Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC* (S. 50 ff. in diesem Buch) hergestellt und untersucht wurden. Voruntersuchungen und Versuche zum Thema der magnetische Faserausrichtung in UHPFRC werden am ITE seit 2014 kontinuierlich durchgeführt [1]–[4]. Diese Voruntersuchungen berührten bereits zentrale Aspekte dieses Forschungsvorhabens und lieferten konkrete Hinweise auf die zu erwartenden Ergebnisse zur robotergestützten, magnetischen Ausrichtung und Verteilung der Mikrostahtfasern (MSF). Im Fokus der Forschungsarbeiten standen zum einen die Möglichkeiten der digitalen und robotergestützten Bauteilfertigung und zum anderen das Potenzial der Faserausrichtung zur Steigerung der Materialeffizienz von UHPFRC. In der Entwicklung des Verfahrens der magnetischen Faserausrichtung (MFA) wurden diese beiden Ansätze zusammengeführt.

2 Projektziele

Das MFA-Verfahren zur definierten Verteilung und Ausrichtung der Mikrostahtfasern in UHPFRC basiert auf dem physikalischen Phänomen des Magnetismus. Da Stahtfasern ferromagnetisch sind, kann ihre Position im Frischbeton durch den Einsatz von Magnetfeldern spezifisch verändert werden. Ziel dieser magnetischen

1 Introduction

The starting point for this follow-up project, which was carried out at the Institute of Structural Design at the Technical University of Braunschweig, was the desire to increase the effectiveness of the fibre content of the type of concrete components that were previously manufactured and investigated in the SPP project *Development of novel jointing systems for complex beam surface and spatial elements made of UHPFRC* (p. 50 et seq. in this book). Preliminary investigations and tests on the topic of magnetic fiber alignment in UHPFRC have been carried out continuously at ITE since 2014 [1]–[4]. These preliminary investigations already touched upon central aspects of this research project and provided concrete indications of the expected findings on robot-assisted magnetic alignment and distribution of the micro steel fibres (MSF). The research focused on the possibilities of digital and robot based component production on the one hand and the potential of fibre orientation to increase the material efficiency of UHPFRC on the other. In the development of the magnetic fibre alignment (MFA) process, these two approaches were brought together.

2 Project aims

The MFA process for the defined distribution and orientation of the micro steel fibres in UHPFRC is based on the physical phenomenon of magnetism. Since steel fibres are ferromagnetic, their position in the fresh concrete can be modified in a controlled manner by the application of

Behandlung war es, die Position der Mikrostaahlfasern in der Betonmatrix während des Herstellungsprozesses nach dem Kräftefluss und dem Motto „*form follow force*“ auszurichten. Die definierte Anordnung der Fasern in einem Bauteil sollte die Effektivität des eingesetzten Faserteils deutlich erhöhen und damit, neben einer verbesserten Verarbeitbarkeit, zu einer erheblichen Reduzierung der eingesetzten Fasermenge führen, die ein großes Potenzial zur Einsparung ökologischer und ökonomischer Ressourcen bietet und damit zur Herstellung ressourceneffizienterer Betonbauteile genutzt werden kann.

Das Verfahren könnte bei der Herstellung von modular aufgebauten Plattenelementen, dünnwandigen Tragwerken wie gegliederte Balken und Deckenelemente sowie bei hoch belasteten Zahnverbindungen eingesetzt werden, um eine deutliche Leistungssteigerung dieser UHPFRC-Bauteile zu erreichen (Bild 1). Die Faserausrichtung stellt einen von mehreren aufeinander abgestimmten Bearbeitungsschritten zur Herstellung eines Bauteils in einer zukünftigen digitalen Fertigungskette dar. Die praktischen Anwendungen für diese Methode der magnetischen Faserausrichtung sind vielfältig und für unterschiedliche Bauteilgruppen wie räumliche Fertigteilstrukturen und Schalenelemente denkbar (Bild 2). Entscheidend für eine wirtschaftliche, baupraktische Anwendung des Verfahrens wird die reproduzierbare Steuerung

magnetic fields. This magnetic treatment aimed to align the position of the micro steel fibres in the concrete matrix during the production process according to the flow of forces and the motto “*form follow force*”. The defined arrangement of the fibres in a component was intended to significantly increase the effectiveness of the fibre content used and thus, in addition to improved processability, led to a considerable reduction in the amount of fibres used, which offers great potential for saving ecological and economic resources and thus can be used to produce more resource-efficient concrete components.

The method could be used in the production of modularly constructed plate elements, thin-walled load-bearing structures such as filigree beams and ceiling elements as well as in the highly stressed tooth connections with the aim of achieving a clear increase in performance of these UHPFRC components (Fig. 1). The fibre alignment represents one of several aligned processing steps for the production of a component in a prospective digital manufacturing chain. The practical applications for this method of magnetic fibre alignment are manifold and conceivable for different component groups such as precast spatial structures and shell elements (Fig. 2). The reproducible control of the process, which was ensured by the use of the latest developments in the field of robotic production, will be decisive



Bild 1: Faseranordnung in einer Zahnverbindung; links: chaotisch, rechts: magnetisch ausgerichtet | **Fig. 1:** Fibre arrangement in a toothed bond; left: chaotic, right: magnetically aligned | Source: Lukas Ledderose, [4]

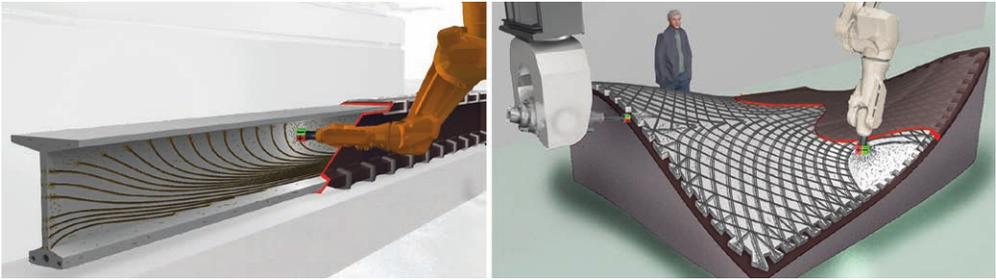


Bild 2: Mögliche Anwendungen der MFA-Methode; links: UHPFRC-Träger, rechts: Schalensegmente | **Fig. 2:** Possible applications of the MFA method; left: UHPFRC beam, right: shell segment | Source: Lukas Ledderose, [4]

des Prozesses sein, die durch den Einsatz neuester Entwicklungen auf dem Gebiet der Robotertfertigung sichergestellt werden kann.

3 Arbeitspakete

Das Projekt umfasste experimentelle, theoretische, numerische und bildanalytische Methoden, die aufeinander aufbauend in fünf Arbeitspaketen (AP) organisiert waren: In AP 1 wurden Permanentmagnete und Elektromagnete auf ihre Eignung für das MFA-Verfahren sowie grundlegende Prozessparameter untersucht. AP 2 hatte zum Ziel, eine digitale Prozesskette zur Steuerung des robotergestützten Ausrichtungsprozesses zu entwickeln, die eine definierte Reproduzierbarkeit des MFA-Verfahrens ermöglicht. Darüber hinaus wurden Adapter für die Montage der Magnete an den Roboterarmen entwickelt. In AP 3 wurden verschiedene Probekörper mit mono- und biaxial ausgerichteten Stahlfasern hergestellt und geprüft und in AP 4 Fasermischungen aus verschiedenen Fasermaterialien und deren Wechselwirkungen experimentell untersucht. AP 5 schließlich befasste sich mit der Entwicklung und Prüfung von robotergestützten Stahlfaseranordnungen im Fügebereich von Betonbauteilen zur lokalen Verstärkung des Lasteinleitungsbereichs.

4 Ergebnisse

Grundsätzlich können mit dem MFA-Verfahren drei Strategien für eine nachhaltigere Nutzung

for an economic, building-practical application of the method.

3 Work packages

The project included experimental, theoretical, numerical, and image analysis methods that were organized sequentially in five work packages (WP): WP 1 investigated permanent magnets and electromagnets for their suitability for the MFA process as well as basic process parameters. WP 2 aimed to develop a digital process chain for controlling the robot-assisted alignment process, which enabled defined reproducibility of the magnetic fibre alignment process. In addition, adaptations for mounting the magnets on the robot arms have been engineered. In WP 3, different test specimens with steel fibres mono- and biaxially aligned were produced and tested. In WP 4, fibre mixtures of different fibre materials and their interactions were experimentally investigated. WP 5 finally dealt with the development and testing of robot-assisted steel fibre arrangements in the joining area of concrete components for local reinforcement of the load application area.

4 Results

In principle, three strategies for a more sustainable use of MSF could be pursued with the MFA process. First, starting from a given fibre content, an increase in ultimate load could be achieved by transferring the individual fibres into a more

von MSF verfolgt werden. Erstens könnte, ausgehend von einem bestimmten Fasergehalt, eine Erhöhung der Tragfähigkeit erreicht werden, indem die einzelnen Fasern in eine effizientere Position und Ausrichtung gebracht werden. Zweitens könnte unter Beibehaltung einer gewünschten Materialfestigkeit der Fasergehalt durch gezielte Orientierung reduziert werden. Drittens boten die durch das MFA-Verfahren erzielten höheren Festigkeiten des Faser-Matrix-Systems die Möglichkeit, UHPFRC-Bauteile schlanker zu gestalten und damit Matrix und Eigengewicht zu reduzieren.

Anhand verschiedener Bauteilversuche konnten sowohl ökonomische als auch ökologische Einsparpotenziale durch die Reduktion des Fasergehaltes abgeleitet werden. Die mittlere Einsparung des Faservolumenanteils von 43 % führte zu einer Senkung der Materialkosten des UHPFRC um ca. 24 % und zu einer Reduzierung des Treibhauspotenzials (GWP) um ca. 25 % für die verwendete Betonrezeptur (siehe Tabelle 3 auf S. 66 in diesem Buch). Durch die Verwendung von recycelten Mikrostaalfasern aus dem Altreifenrecycling wurden sowohl die Materialkosten (ca. 55 %) als auch das GWP (ca. 49 %) weiter drastisch reduziert [5].

efficient position and orientation. Second, while maintaining a desired material strength, the fibre content could be reduced through targeted orientation. Third, the higher strengths of the fibre-matrix system achieved by the MFA process provided the opportunity for a leaner design of UHPFRC components and thus for a reduction in matrix and deadweight.

Based on various component tests, it was possible to derive both economic and ecological savings potentials by reducing the fibre content. The average fibre volume fraction saving of 43% led to a reduction in the material cost of the UHPFRC of about 24% and to a reduction in the global warming potential (GWP) of about 25% for the concrete formulation used (see Table 3, page 60 in this book). The use of recycled micro steel fibres from scrap tire recycling further drastically reduced both the material cost (about 55%) and GWP (about 49%) [5].

Literatur | References

- [1] Ledderose, L.; Kloft, H.: Preliminary Investigations for Magnetic rearrangement of Steel Fibers in UHPFRC. In: Brasil, R. und Pauletti, R. (Hrsg.): Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints – Proc. of the IASS-SLTE 2014 Symp., 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 2014, 8 S. – <https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2014/00002014/00000011/art00012>
- [2] Ledderose, L.; Kloft, H.: Robot-aided rearrangement of steel fibres in UHPFRC via magnetic forces. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proc. of the IASS Annual Symp. 2015, 17.–20.08.2015 in Amsterdam (Niederlande), Beitrag Nr. IASS2015-517423, publiziert auf USB-Stick: 12 S.
- [3] Ledderose, L.; Kloft, H.: Snap-fits made of reinforced concrete: From advanced manufacturing to novel applications. In: Adriaenssens, S.; Mueller, C. (Hrsg.): Creativity in Structural Design – Proc. of the Annual Symp. of the Int. Association of Shell and Spatial Structures (IASS). 16.–20.07.2018 in Boston (USA), 2018, paper no. 172, 8 S. – <https://www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2018/00002018/00000007/art00005>
- [4] Ledderose, L.; Lehmsberg, S.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Robotergestützte, magnetische Ausrichtung von Mikro-Stahldrahtfasern in dünnwandigen UHPFRC-Bauteilen. Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019) 1, S. 33–42 – DOI: 10.1002/best.201800083
- [5] Ledderose, L.; Baghdadi, A.; Kloft, H.: Magnetic Alignment of Microsteel Fibers as Strategy for Reinforcing UHPFRC. Open Conf. Proc. 1 (2022) February, S. 99–114 – Proc. of Vision and Strategies for Reinforcing Additively Manufactured Concrete Structures, 04.11.2021 in Dresden, Fromm, A.; Mechtcherine, V. (Hrsg.) – <https://www.tib-op.org/ojs/index.php/ocp/issue/view/3/8>

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Grundlegende Untersuchungen zur robotergestützten magnetischen Verteilung und Ausrichtung von Mikrostahtfasern in dünnwandigen UHPFRC-Bauteilen

Fundamental research on robot-assisted magnetic distribution and alignment of microsteel fibers in thin-walled UHPFRC components

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Adresse Address:	TU Braunschweig, Institut für Tragwerksentwurf (ITE), Pockelsstrasse 4, 38106 Braunschweig
Kontakt Contact:	+49 531 391 3571 h.kloft@tu-braunschweig.de www.ite.tu-bs.de
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG (Projektnummer Project number: 408043955)
Förderzeitraum Period:	01.01.2019–31.12.2021
Team Team:	Lukas Ledderose
Homepage Website:	https://www.tu-braunschweig.de/ite/team

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- siehe Literaturverzeichnis | see reference list

ANSCHLUSSPROJEKTE

Wiederverwendbare flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen | Re-usable and flexible GFRP formwork for the production of double curved concrete lightweight elements

- ▶ Carolin Petzoldt, Christian Müller, Henrik Funke, Sandra Gelbrich, Lothar Kroll
- ▶ Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung (SLK), TU Chemnitz

1 Ausgangsfragen

Für die Herstellung großformatiger dünnwandiger Schalenträgerwerke bedarf es geeigneter Schalungssysteme, die eine frei geformte Geometrie, eine erhöhte Wiederverwendbarkeit sowie eine glatte Sichtbetonqualität der Elemente ohne Fehlstellen (Architekturbeton) in Kombination mit einer hohen Produktivität gestatten [1]. Derzeit ist die Herstellung frei geformter Beton-Leichtbauelemente sowohl mit einem erheblichen Material- und Montageaufwand als auch Kostenaufwand verbunden [2]–[4]. Zu üblichen Schalungstechniken zählen konventionell segmentierte Holz- und Stahlsysteme, pneumatisch gestützte und modellierte Schalungen sowie deren Kombinationen. Für einfach verformbare Schalungssysteme sind dazu einige Patente angemeldet worden, z. B. [5]–[7]. Aktuelle Forschungen (wie bspw. [8]–[11]) beschäftigen sich weiterhin mit flexiblen Schalungssystemen, die über zahlreiche einstellbare Aktuatoren frei formbare Flächen mit zumeist polymeren Schalhäuten erzeugen.

Zur kosteneffizienten Herstellung von einfach und doppelt gekrümmten Fassadenelementen mit definierter Änderung des Krümmungsradius ist demnach ein flexibles Schalungssystem erforderlich, welches die wiederholte Nutzung der Schalung für Elemente mit ähnlichen Krümmungen erlaubt. Hierfür werden die erarbeiteten Grundlagen und Erkenntnisse aus den beiden SPP-Projekten der TU Chemnitz (siehe S. 436 ff. und S. 452 ff.) innerhalb der Förderpha-

1 Initial objective

For the production of large-size concrete shell structures with thin walls, it is necessary to provide formwork systems, which permit freely formed geometries, enhanced reusability and smooth, fair-faced concrete quality of the elements without defects (architectural concrete) in combination with high productivity [1]. Currently, the production of lightweight, free-formed concrete elements is characterized by high material and installation efforts as well as costs [2]–[4]. Common formwork techniques include segmented systems made of wood or steel, pneumatically supported and modelled formworks as well as combinations thereof. There are some pending patents on simply deformable formwork systems, e.g. [5]–[7]. Furthermore, recent research activities encompass flexible formwork systems, which generate free-form areas with the help of numerous adjustable actuators and polymer membranes [8]–[11].

A cost-efficient production of single and double curved façade elements with defined curvature radius variation requires a flexible formwork system, which allows the re-use for elements with similar curvatures. Therefore, the fundamentals and results concerning the anisotropic material behaviour of multilayer GFRP frameworks, which were achieved in two projects of TU Chemnitz during the two funding phases of the DFG-SPP 1542 “Concrete light” (see p. 436 and 452 et seq.). Thus, a flexible adjustment of

sen des DFG-SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ zum anisotropiebedingten Materialverhalten mehrschichtiger GFK-Schalungen herangezogen, um eine flexible Einstellung von Flächen mit verschiedenen Krümmungszuständen unter Anpassung des GFK-Laminataufbaus bzgl. definierter Biegesteifigkeiten zu erreichen. Die Ergebnisse der Teilprojekte konnten das besondere Potential von flexiblen GFK-Elementen zur Herstellung von Fassadenelementen mit kleinen und großen Krümmungen aufzeigen. Ziel des Erkenntnistransfers ist nun die Überführung der wissenschaftlichen Ergebnisse in industriell anwendbare Lösungen, indem ein flexibles und wiederverwendbares Schalungssystem aus GFK-Elementen entsteht, das die effiziente Herstellung von Beton-Leichtbauelementen mit verschiedenen Krümmungszuständen gestattet.

Schwerpunkt des hier vorgestellten DFG-Erkentnistransferprojekts ist die Entwicklung einer industriell anwendbaren Systemschalung mit gekoppelter Bauteilvermessung (Kamerasystem) zur Herstellung von dünnwandigen Faser- und Textilbetonfertigelementen mit integrierten Krafteinleitungselementen. Die Systemschalung, bestehend aus einer GFK-Schalhaut mit definiertem Lagenaufbau und steuerbarer Unterkonstruktion, soll hierbei über ein neu zu entwickelndes Programmsystem flexibel einstellbar sein und folglich doppelt gekrümmte Oberflächen erzeugen.

2 Anwendungspartner

Der für die Umsetzung der Projektidee erforderliche Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis erfolgt durch Kooperation mit den industriellen Anwendungspartnern FIBER-TECH Group und Betonwerk Schuster GmbH. Die Schwerpunkte der Unternehmen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

surfaces with varying curvature states is possible by adaption of the GFRP laminate structure with regard to the bending stiffness. The results of the previous projects were able to show the special potential of flexible GFRP elements for the production of façade elements with small and large curvatures. The aim of the knowledge transfer is to transfer the scientific results into industrially applicable solutions, by creating a flexible and re-usable formwork system made of GFRP elements, which allows the efficient production of lightweight concrete elements with different curvature states.

Focus of the here presented DFG knowledge transfer project is the development of a system formwork with coupled component measurement (camera system) for the production of thin-walled prefabricated fibre and textile reinforced concrete elements with integrated force transmission elements. The system formwork, consisting of a GFRP formwork skin with defined layer structure and a controllable supporting construction, is to be flexibly adjustable via a newly developed program system and will consequently be able to produce double curved surfaces.

2 Application partners

The exchange between science and practice required for the implementation of the project idea takes place through cooperation with the industrial application partners FIBER-TECH Group and Betonwerk Schuster GmbH. The priorities of the companies are summarised in Table 1.

	FIBER-TECH Group	Betonwerk Schuster GmbH
Relevante Geschäftsfelder und Kernkompetenzen Relevant business areas and core competencies	Konstruktion, Herstellung und Montage großformatiger Produkte aus Faserverbunden (GFK, CFK, NFK) Design, manufacture and assembly of large-format fibre composites products (GFRP, CFRP, NFRP)	Individuelle Betonfertigteile für Hoch- und Tiefbau, Lärmschutz- und Schachtsysteme aus Beton Individual precast concrete members for structural and civil engineering, noise protection and shaft systems made of concrete
Wesentliches Projektziel Main project goal	Angebotsweiterung für komplexe wiederverwendbare GFK-Schalungssysteme Extension of the range for complex reusable GFRP formwork systems	Einführung einer effizienten, flexiblen und wiederverwendbaren Schalungstechnologie im Unternehmen Introduction of efficient, flexible and reusable formwork technology in the company
Projektaufgaben Project tasks	Herstellung des steuerbaren GFK-Schalungssystems Production of the controllable GFRP formwork system	Test, Anpassung und Anwendung des GFK-Schalungssystems zur Herstellung von Fertigelementen Test, adaptation and application of the GFRP formwork system for the production of prefabricated elements

Tabelle 1: Schwerpunkte der beteiligten Unternehmen | **Table 1:** Main focus of the companies involved

3 Zielsetzung und Lösungsansatz

Das neue flexible GFK-Schalungssystem als integraler Bestandteil des Transferprojektes dient zur Umsetzung präzise gefertigter Filigranelemente aus textilbewehrtem Beton mit einer hohen Sichtbetonqualität. Die Integrationselemente (Krafteinleitungen und Bewehrungen) im Textilbeton-Fertigteil sollen bereits in der Schalung positionsgenau angeordnet werden, so dass bei einer Montage der Fertigteile an der Fassade ein exaktes Fugenbild resultiert. Zur Umsetzung der hohen qualitativen Anforderungen an komplex gestaltete Fassaden wird ein optisches Kamerasystem in den Herstellungsprozess integriert, welches die exakte Positionierung von Integrationselementen sowie die Fertigung der definierten Krümmungen auf der Schalung überwacht (siehe Bild 1). Mit Hilfe einer Rückkopplung zwischen theoretischen und realen Krümmungen wird eine on-time Nachjustierung der Schalung oder der zu produzierenden Elemente integriert. Hierbei sollen nicht nur die gestalterisch wichtigen Fassadenstrukturen exakt umgesetzt werden, sondern auch Toleranzen im Millimeterbereich, damit letztlich eine einfachere Montage erfolgreich durchgeführt werden kann.

3 Goals and solution approach

The new flexible GFRP formwork system as an integral part of the transfer project serves to implement precisely manufactured filigree elements made of textile reinforced concrete with a high quality of exposed concrete. The integration elements (force transmission and reinforcements) in the precast textile reinforced concrete part should already be positioned accurately in the formwork so that an exact joint pattern results when the prefabricated parts are installed on the façade. To implement the high quality requirements for complex façades, an optical camera system is integrated into the manufacturing process, which monitors the exact positioning of integration elements as well as the production of the defined curvatures on the formwork skin (see Fig. 1). By means of a feedback between theoretical and real curvatures, an on-time readjustment of the formwork or the produced elements is integrated. Here, not only the facade structures, which are important in terms of design, are to be implemented exactly, but also tolerances in the millimetre range, so that finally an easier installation can be carried out successfully.

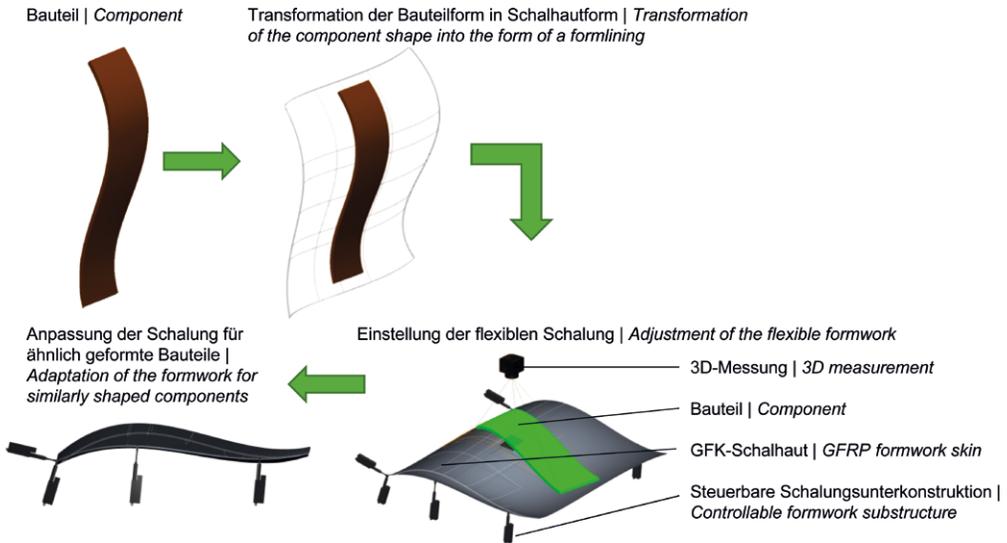


Bild 1: Schematische Darstellung der Funktionalität der flexiblen GFRP-Formalung | **Fig. 1:** Schematic representation of the functionality of the flexible GFRP-formwork | Source: Carolin Petzoldt

Die anzuwendenden Krafteinleitungselemente dienen der direkten Einleitung von konzentrierten Kräften in die dünnwandigen Beton-Leichtbauelemente. Hierfür sollen die in der zweiten Förderphase des SPP entwickelten metallischen Fraktal-Inserts eingesetzt werden, um eine gleichmäßige Krafteinleitung in die Textilbewehrung aus 3D-Gewirken sicherzustellen. Dazu sind die Fraktal-Inserts derart konstruktiv gestaltet, dass die Steifigkeit und Festigkeit im lokalen Bereich auf die Materialpaarung Metall/Textilverstärkung abgestimmt ist.

Die hierzu durchgeführten Untersuchungen sowie erweiterten Berechnungs- und Optimierungsverfahren führten zur Adaption von Geometrie-, Werkstoff- und Fertigungsparametern für die ausgewählten Belastungen und Textilverstärkungen. Im Ergebnis der Entwicklung und Erprobung von bionisch inspirierten Krafteinleitungen lässt sich die Anzahl der Verankerungspunkte verringern, wodurch der Zeit- und Montageaufwand drastisch reduziert und gleichzeitig das vorliegende Leichtbaupotential der Textilverstärkungen voll ausgeschöpft werden kann.

The applied force application elements act as direct transmissions for concentrated forces in the thin-walled lightweight concrete elements. For this purpose, the metallic fractal inserts developed in the second funding phase of the SPP are to be used in order to ensure a uniform transmission of forces into the textile reinforcement of 3D knitted fabrics. For this purpose, the fractal inserts are constructively designed in a manner that matches the local deformations of the material pairing metal/textile.

The investigations carried out as well as extended calculation and optimization procedures led to the adaptation of geometry, material and production parameters for the selected loads and textile reinforcements. As a result of the development and testing of bionically inspired force transmission elements, the number of anchoring points can be reduced, which drastically reduces the time and assembly costs, while simultaneously taking full advantage of the existing lightweight construction potential of textile reinforcements.

Ein weiterer Fokus des Transferprojektes ist auf die Datenverarbeitung vom entwurfsspezifischen Volumenmodell über ein Linienmodell der GFK-Schalhaut bis zur Übergabe an die steuerbare Unterkonstruktion gerichtet. Da bei den unterschiedlichen Arbeitsschritten des Herstellungsprozesses, wie z. B. dem Design der Fassadenelemente und der Form der Schalhautoberfläche, verschiedene Modellarten benötigt werden, ist eine detailgetreue Übergabe der Daten unbedingt notwendig. Ferner erfordert die Einstellung der Schalhautoberfläche über die steuerbare Unterkonstruktion eine Umrechnung der Modellierungsdaten sowohl nach simulierten als auch experimentell verifizierten Vorgaben. Auf Grundlage dessen wird ein Programmsystem entwickelt, das die schnelle und effiziente Anwendung der Systemschalung gestattet.

Das SLK der TU Chemnitz übernimmt hierbei die Dimensionierung der GFK-Schalungshaut sowie die Entwicklung des intelligenten Steuer- und Regelsystems. Die Aufgaben zur Konstruktion und Validierung der steuerbaren Unterkonstruktion sind am Forschungsbereich Leichtbau im Bauwesen (LBW) angesiedelt. Zudem erfolgt die fertigungstechnische Umsetzung und experimentelle Verifikation inkl. optischer Vermessung und Nachjustierung zum Systemaufbau GFK-Schalung/Beton-Leichtbauelement sowie die Umsetzung eines Prototyps in Form einer flexiblen mehrschichtigen GFK-Schalung mit Herstellung repräsentativer Hüllelemente für Infrastrukturen (Verkehrsweegelemente, Betonverkleidungen etc.) durch die Industriepartner FIBER-TECH Group und Betonwerk Schuster GmbH.

Die Erfolgskriterien für das Projekt sind:

- Übertragung der Forschungsergebnisse in die Praxis,
- Validierung der gezielten Einstellung definierter Krümmungen im großen Maßstab,
- Nachweis der Reproduzierbarkeit.

Mögliche Rückwirkungen auf die Wissenschaft sind die wissenschaftlichen Fragestellungen, die sich aus den Resultaten des Verfahrens

Another focus of the transfer project is the data processing which includes the whole path from the design-specific volume model via a line model of the GFRP formwork skin to the controllable substructure. Since different model types are required in the various steps of the manufacturing process, such as the design of the façade elements and the shape of the formwork surface, a detailed data transfer is essential. Furthermore, the adjustment of the formwork surface via the controllable substructure requires a conversion of the modelling data both according to simulated and experimentally verified specifications. Based on this, a program system is being developed which allows the fast and efficient use of the system formwork.

At SLK of TU Chemnitz, the researchers are responsible for the dimensioning of the GFRP formlining as well as for the development of the intelligent control and regulation system. The tasks with regard to the construction and validation of the controllable substructure are carried out at research department Lightweight Constructions in Civil Engineering (LBW). The industrial partners FIBER-TECH Group and Betonwerk Schuster GmbH carry out the technical implementation and experimental verification (including optical measurement and readjustment to the system structure fiberglass formwork/concrete lightweight element) as well as the implementation of a prototype. The prototype includes a flexible multilayer GFRP formwork and the production of representative envelope elements for infrastructures (road construction elements, concrete claddings, etc.).

The success criteria for the project are:

- transfer of research results into practice,
- validation of the specific setting of defined curvatures on a large scale and
- verification of the reproducibility.

Possible feedback effects on science are the scientific questions that arise from the results of the process from concrete spraying, optical measurement and readjustment of the GFRP formwork, for example:

aus Betonspritzten, optischer Vermessung und Nachjustierung der GFK-Schalung ergeben, beispielsweise:

- Wie stark ändert sich die eingestellte Krümmung durch den Frischbetondruck, der wiederum abhängig von der Dicke und Dichte der Betonschicht ist?
- Wie kann man diese Abweichungen vorausberechnen und vorab einstellen, sodass eine Nachjustierung nicht notwendig ist?
- Wie kann die Dimensionierung der Schalung optimiert werden?
- How much does the adjusted curvature change due to the fresh concrete pressure, which in turn depends on the thickness and density of the concrete layer?
- How can these deviations be calculated and adjusted in advance so that readjustment is not necessary?
- How can the dimensioning of the formwork be optimized?

To answer these questions, further basic research is necessary.

Um diese Fragen zu beantworten, ist weitere Grundlagenforschung notwendig.

Literatur | References

- [1] Hofstadler, C.: Schalarbeiten. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- [2] Curbach, M.; Michler, H.; Weiland, S.; Jesse, D.: Textilbewehrter Beton – Innovativ! Leicht! Formbar! BetonWerk International 11 (2008) 5, S. 62–72
- [3] Herzog, T.; Moro, J. L.: Gespräch mit Felix Candela. In: Arcus 18: Zum Werk von Felix Candela – Die Kunst der leichten Schalen. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolph Müller, 1992, S. 10 ff.
- [4] Preisinger, C.; Harrer, J.; Ressler, C.; Kollegger, J.: Stahlbetonschalen ohne Schalung – ein neuer Weg im Schalenbau. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005) 1, S. 31–38
- [5] DE 3500153 A1: Pneumatische Schalung. Schlaich, J.; Bergemann, R. (07/1986)
- [6] DE 3841579 A1: Schalung für großformatige gekrümmte Stahlbetonfertigteile. Werner Zapf KG. Zapf, W. (13.06.1990)
- [7] EP 0 238 168 A1: Verfahren und Vorrichtung zum Formen von gebogenen Sektionen aus Beton. Vidal, H.; Muelas-Medrano, S. (23.09.1987)
- [8] Michel, M.: Electronic controlled adaptive formwork for freeform concrete walls and shells. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am KIT Karlsruhe, Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 281–289
- [9] Michel, M.; Knaack, U.: Grundlagen zur Entwicklung adaptiver Schalungssysteme für frei geformte Betonbauteile. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 186–197 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171637>
- [10] Schipper, H. R.: Double-curved precast concrete elements. Diss., TU Delft, 2015
- [11] Raun, C.; Kirkegaard, P. H.: Adaptive mould – A cost-effective mould system linking design and manufacturing of double-curved GFRP panels. In: Proc. of the 17th Int. Congress of the GRCA – GRC 2015, 19.–21.04.2015 in Dubai (VAE), 2015, 7 S. – <https://www.grca.online/about-grca/previous-grca-congress/grca-2015-congress-radison-blu-dubai>

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Wiederverwendbare flexible GFK-Schalungen zur Herstellung von doppelt gekrümmten Beton-Leichtbauelementen

Re-usable and flexible GFRP formwork for the production of double curved concrete lightweight elements

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr. h. c. Prof. Lothar Kroll
Kontakt Contact:	+49 371 531 231 20 slk@mb.tu-chemnitz.de www.leichtbau.tu-chemnitz.de
Antragstellerin 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich
Kontakt Contact:	+49 371 531 321 92 sandra.gelbrich@mb.chemnitz.de www.leichtbau.tu-chemnitz.de
DFG-Projektnummer DFG Project number:	390296555
Adresse Address:	TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, 09107 Chemnitz
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project
Förderzeitraum Funding period:	01.01.2018–31.12.2019
Team Team:	Christian Müller Henrik Funke Lars Ulke-Winter
Partner Partners:	FIBER-TECH Group, Chemnitz Betonwerk Schuster GmbH, Cunewalde

ANSCHLUSSPROJEKTE

UHFB-Drucktragglieder (basierend auf wickelverstärkten Hybridrohren) in voll digital datengestützter Fließfertigung als Basis für eine modulare Betonbauweise | UHPC compression rods (based on wrapped hybrid tubes) in fully digitally data-supported flow production as the basis for a modular concrete construction method

- ▶ Ludger Lohaus¹, Jan Markowski¹, Raimund Rolfes², Franz Ferdinand Tritschel²
- ▶ ¹ Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover
- ▶ ² Institut für Statik und Dynamik, Leibniz Universität Hannover

Im Vergleich zur automatisierten Fertigung anderer industrieller Branchen ist das Bauen mit Beton noch immer stark durch handwerkliche Tätigkeiten geprägt. Dazu kommt, dass die endgültigen Eigenschaften von Betonbauteilen stark von den Umgebungsbedingungen während der Herstellung abhängig sind. Dieser Zustand führt zu Ungenauigkeiten und Unsicherheiten bei der Bauwerkserstellung, welche in einem wenig effi-

Compared to the automated production of other industrial sectors, construction with concrete is still strongly characterized by craftsmanship. In addition, the final properties of concrete components are strongly dependent on the environmental conditions during production. This leads to inaccuracies and uncertainties during construction, which result in inefficient use of materials and disruptions in the construction

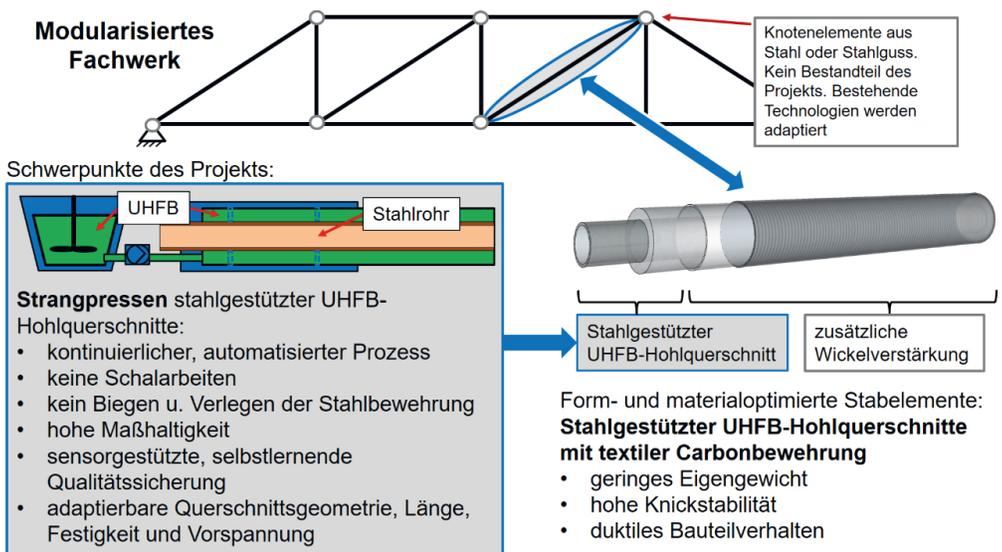


Bild 1: Schematische Darstellung der Forschungsschwerpunkte des Projekts | Quelle: Jan Markowski

zienten Materialeinsatz und Störungen im Bauprozess resultieren. Lange Bauzeiten und Wartezeiten bei Störungen sind die Folgen.

Unter dem Ansatz „Individualität im Großen – Ähnlichkeit im Kleinen“ sollen im DFG-Schwerpunktprogramm 2187 *Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsverfahren – Präzisionsschnellbau der Zukunft* grundlegend neue Bauweisen erforscht werden, deren Ziel ein disruptiver Wandel des Bauens ist.

Gemeinsam mit dem Projektpartner Institut für Statik und Dynamik (Leibniz Universität Hannover) forscht das Institut für Baustoffe an einem neuartigen Herstellungsverfahren für Bauteile aus ultra-hochfestem Beton mit einer Stützung aus Stahlblech und gewickelter Carbonfaserbewehrung. Diese Bauteile sind eine Weiterentwicklung der im SPP 1542 *Leicht Bauen mit Beton* erforschten wickelverstärkten Hybridrohre und sollen wie diese als Basiselement von Stabtragwerken dienen.

Während bei den *wickelverstärkten Hybridrohren* noch die Bauteile selbst und ihr Tragverhalten im Vordergrund standen, wird im Folgeprojekt

process. Long construction times and waiting periods in the case of disruptions are the consequences.

Under the approach “Individuality on a large scale – similarity on a small scale”, the DFG Priority Program 2187 *Adaptive modularized constructions made in a flux* aims to research fundamentally new construction methods whose goal is a disruptive change in concrete construction.

Together with the project partner Institute of Statics and Dynamics (Leibniz Universität Hannover), the Institute of Building Materials is researching a new production process for components made of ultra-high performance concrete with a support of sheet steel and wrapped carbon fiber reinforcement. These components are a further development of the *Wrapped Hybrid Tubes* researched in SPP 1542 *Concrete light – Future concrete structures using bionic, mathematical and engineering formfinding principles* and are intended to serve as the basic element of trusses.

The focus of the *wrapped hybrid tubes* was on the components themselves and their load-bearing

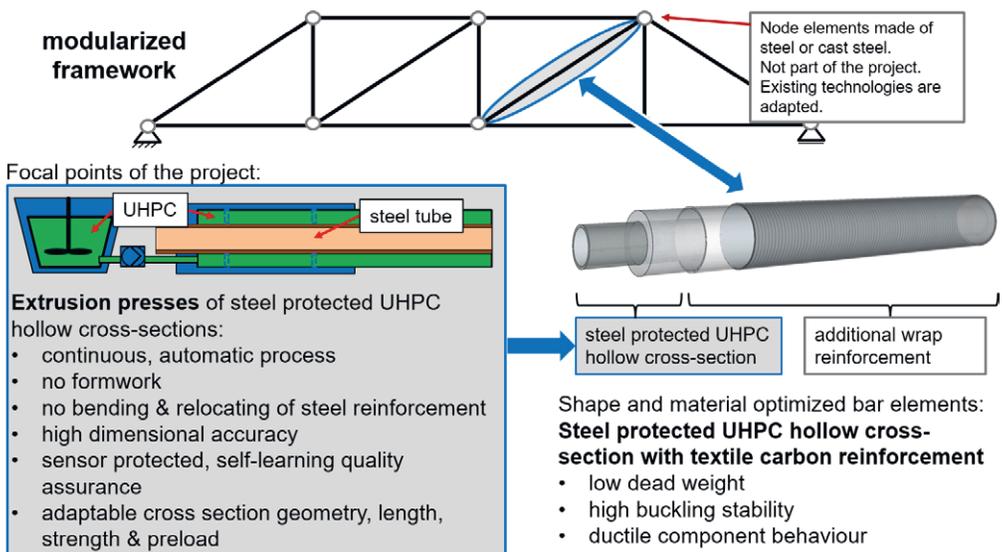


Fig. 1: Schematic representation of the research focus of the project | Source: Jan Markowski

an einer möglichen Fließproduktion solcher Bauteile geforscht. Die Bauteile werden in einem in einem speziell auf die Betonbauweise anzupassenden Strangpressverfahren hergestellt, was eine Fließfertigung der Bauteile erlaubt. Dabei wird ein Stahlblechrohr, welches als Bewehrung oder innere Stützung dient, in einem Extrusionsprozess mit ultra-hochfestem Beton ummantelt. Anstatt einer aufwändigen, handwerklich geprägten, seriellen Fertigung, bei der die Bauteile durch das Gießen des frischen Betons in eine (verlorene) Schalung hergestellt werden, können durch den Extrusionsprozess höhere Wiederholungsraten erreicht werden. Die einzelnen Prozessschritte der Herstellung sind in einem hohen Maße automatisierbar, was eine engmaschige Inline-Qualitätssicherung erlaubt.

Dazu wird ein Sensorkonzept entwickelt, welches in der Lage ist, die Bauteile „ab Bauteilgeburt“ zu überwachen. Die Messdaten werden genutzt, um den Prozess des Strangpressens mithilfe eines Künstlichen Neuronalen Netzes zu steuern, sodass eine gleichbleibend hohe Qualität der Bauteile für den Schnellbau der Zukunft gewährleistet werden kann.

behavior. In the follow-up project research is focused on the flow production of such components. The components are produced in an extrusion process specially adapted to the concrete construction method, which permits flow production of the components. In this process, a sheet steel tube, which serves as reinforcement or internal support, is encased in ultra-high-strength concrete in an extrusion process. Instead of a complicated, manual serial production process in which the components are produced by pouring the fresh concrete into a (lost) formwork, the extrusion process allows higher repetition rates to be achieved. The individual process steps of the production can be automated to a high degree, which allows a close-meshed in-line quality assurance.

A sensor concept is being developed for this purpose, which is capable of monitoring the components “from its birth”. The measurement data will be used to control the extrusion process with the aid of an artificial neural network so that a consistently high quality of the components can be guaranteed for the rapid construction of the future.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Qualitätsgesicherte Fließfertigung leichter UHFB-Stabelemente mittels Künstlicher Neuronaler Netze

Quality-assured flow production of lightweight UHPC rod elements using artificial neural networks

Antragsteller 1 Applicant 1:		Prof. Dr.- Ing. Ludger Lohaus
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	LO 751/27-1	
Adresse Address:	Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe (IfB), Appelstr. 9A, 30419 Hannover	
Kontakt Contact:	+49 511 762 3722 lohau@baustoff.uni-hannover.de www.baustoff.uni-hannover.de	
Antragsteller 2 Applicant 2:		Prof. Dr.-Ing. habil. Raimund Rolfes
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	RO 706/18-1	
Adresse Address:	Leibniz Universität Hannover, Institut für Statik und Dynamik (ISD), Appelstr. 9A, 30419 Hannover	
Kontakt Contact:	+49 511 762 3867 r.rolfes@isd.uni-hannover.de www.isd.uni-hannover.de	
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 2187	
Förderzeitraum Funding period:	01.01.2020–31.12.2022	
Team Team:	Jan Markowski (IfB) Nikolai Penner (ISD) Franz Ferdinand Tritschel (ISD)	
Webseite Website:	https://www.ruhr-uni-bochum.de/spp2187/	

ANSCHLUSSPROJEKTE

Auslegung von Parabolrinnen für Solarkraftwerke im Originalmaßstab

- Patrick Forman¹, Tobias Stallmann², Peter Mark¹, Jürgen Schnell²
- ¹ Lehrstuhl für Massivbau, Ruhr-Universität Bochum (RUB)
- ² Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion, TU Kaiserslautern (TU KL)

Vorwort

Das Erkenntnistransferprojekt baut auf die im SPP-Projekt „Leichte Verformungsoptimierte Schalentragwerke aus mikrobewehrtem UHPC am Beispiel von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke“ (s. S. 536 ff.) erzielten Ergebnisse der ersten Förderperiode auf. Der Fokus liegt auf der Entwicklung von linienartig verstärkten, vollwandigen Parabolschalen mit zur bestehenden Kraftwerkstechnik passenden EuroTrough-Rinnenabmessungen. Es sollten die bisherigen Erkenntnisse zusammen mit professionellen Anwendungspartnern vorwettbewerblich ausgebaut werden, so dass sie Grundlage für eine Serienfertigung bilden können. Dementsprechend setzten sich die Kooperationspartner aus dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR (Systemführer für linienfokussierende Solarkraftwerke), der Fa. Solarlite CSP (Hersteller von Solaranlagen in Parabolrinnentechnik), der INNOGRATION GmbH (Hersteller von Stahlbetonfertigteilen) und der Fa. Dyckerhoff Zement (Hersteller von Ausgangsstoffen für Hochleistungsbetone) zusammen.

1 Einleitung

Parabolrinnen sind solarthermische Kollektoren, die die einfallende solare Strahlung nach dem Konzentrationsprinzip bündeln. Orthogonal zur Parabelöffnung einfallende Strahlen, welche sich auf der Parabeloberfläche spiegeln, werden entlang der Fokallinie im Absorberrohr fokussiert. Das darin befindliche Wärmeträgermedium erhitzt sich und mithilfe eines nachgeschalteten Kraftwerksblocks wird Elektrizität erzeugt. Bisherige kommerzielle Kollektormodule

(z. B. *EuroTrough* [1]) bestehen i. d. R. aus einer Stahlfachwerkstruktur mit punktuell aufgelagerten Reflektorelementen (s. Bild 1 im Vorgängerprojekt). Als Ergebnis des SPP-1542-Projekts [2]–[4] wurde ein kleinformatiges Kollektormodul als einfach gekrümmte Hochleistungsbetonschale (Modullänge 3,20 m, Aperturweite 2,205 m) errichtet, welches Trag- und Reflektorstruktur zu einem schlanken, einwandigen, außerordentlich maßhaltigen Demonstrator mit lediglich 2–3 cm Dicke vereint (Bild 1). Die Dimension des kommerziellen Kollektormoduls *EuroTrough* (Apertur: 5,77 m × 12,00 m) dient als strukturelles Vorbild zum *Upscaling* im Erkenntnistransferprojekt. Dabei wird die patentrechtlich geschützte Abrolllagerung [5] adaptiert.

Alle nachfolgend beschriebenen Arbeiten zur Optimierung der Schalenstruktur stützte sich auf das umfangreiche Spezialwissen des Projektpartners DLR, Institut für Solarforschung, Köln. Dadurch wurde es möglich, alle in der Praxis tatsächlich gestellten Anforderungen zu



Bild 1: Demonstrator aus Hochleistungsbeton an der TU Kaiserslautern | Quelle: Thomas Brenner

berücksichtigen und auftauchende Fragestellungen fortlaufend zu diskutieren.

Wesentliche Beanspruchungen eines Parabolrinnenkollektors sind auslenkungsabhängige Eigen- und Windlasten sowie Temperaturbeanspruchungen, s. [6]. Zur Sicherstellung eines ungerissenen Zustands I werden neben Windlasten die Eigenlasten maßgeblich. Während in Längsrichtung einzelne Module aneinander gereiht werden, bietet die Querrichtung maßgebliches Potential zur Optimierung. Hier kann der Kollektor als parabolisch gekrümmter Kragarm (Systemlänge = $\frac{1}{2}$ der Öffnungsweite) idealisiert werden. Bei gleichbleibender Ausnutzung (Spannungsrestriktion an der Einspannstelle) zeigt sich ein exponentieller Zusammenhang zwischen Systemlänge und Materialbedarf. Mit sich zum Rand hin verjüngendem Querschnitt, wie beim Demonstrator, reduziert sich dieser Effekt (Bild 2, links). Zudem kann Material durch die Auflösung des vollwandigen Querschnitts gespart werden, Bild 2, rechts. Es zeigt sich, dass für Kleinstrukturen wie den Demonstrator ein vollwandiger Querschnitt sinnvoll ist. Für großformatige Kollektoren (*large aperture collectors* – LAC), wie sie in der zweiten SPP-Förderperiode untersucht wurden, bieten sich Verdrängungskörper an, um bei vergleichbarer Systemsteifigkeit die Eigenlasten zu reduzieren [7]. Für dem *EuroTrough* vergleichbare Abmessungen haben rippenverstärkte Querschnitte, z. B. T-Profile, das größte Potential zur Massenreduzierung bei noch vertretbaren Verformungen.

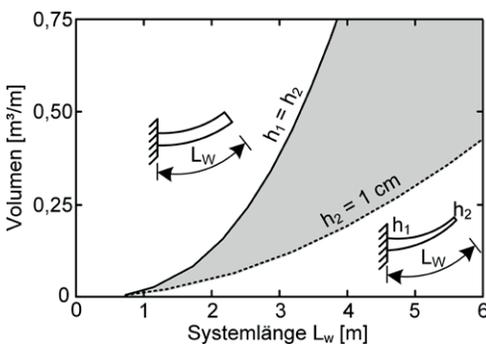


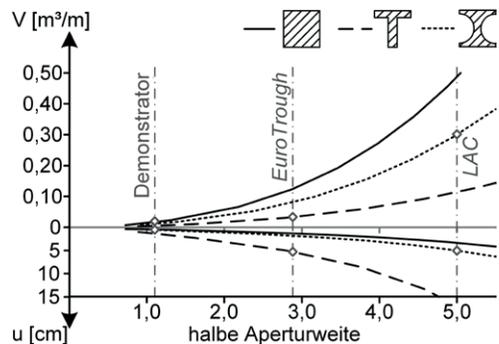
Bild 2: Betonbedarf eines Kragarms in Abhängigkeit der Systemlänge; links: konstanter Querschnitt, rechts: sich verjüngender Kragarm mit verschiedenen Querschnittsformen und zugehörige Maximalverformungen | Quelle: Patrick Forman, [7], [8]

Daher sollen mittels multiobjektiver Topologieoptimierung unter Berücksichtigung verschiedener Beanspruchungen kraftflussaffine Verstärkungsrippen auf der Schalenrückseite identifiziert und als modulare Teilstrukturen umgesetzt werden. Da durch den multiobjektiven Ansatz der Topologieoptimierung bereits eine gewisse Robustheit im Entwurf sichergestellt ist, wird ein linienartig verstärktes Gesamtmodell für die Umsetzung des Demonstrators mithilfe direkter Optimierung und unter Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen entwickelt, sodass – parallel zu sensitivitätsbasierten Optimierungsstrategien an konkurrierenden modularen Teilstrukturen – geeignete Herstellungs- und Betonageverfahren von Schalungsmatrizen und die experimentelle Entwicklung zum Prototyp erfolgen können.

2 Identifikation von rippenartig verstärkten Schalenstrukturen mithilfe multiobjektiver Topologieoptimierung (RUB)

2.1 Topologieoptimierung mit vereinfachten Lastansätzen

Die Topologieoptimierung [9] gehört zur Strukturoptimierung und dient zur Ermittlung des generellen topologischen Aufbaus einer Tragstruktur unter gegebenen Randbedingungen. Das Ziel ist i. d. R. die Minimierung der Nachgiebigkeit c , also die Maximierung der System-



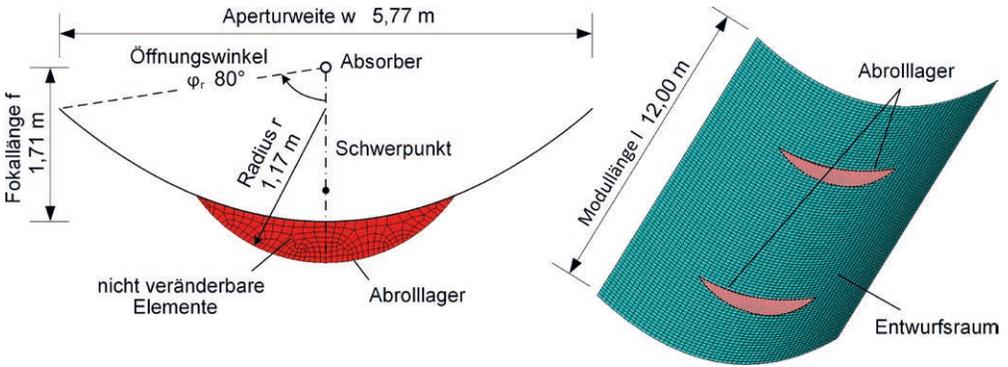


Bild 3: FE-Modell der Parabolschale | Quelle: Patrick Forman

steifigkeit eines Tragwerks, durch iterative Umverteilung eines prozentualen Anteils des Materials. Dazu dient die Pseudodichte ρ_i (je Element i) im Wertebereich 0 (kein Material) bis 1 (Material vorhanden). Im in ANSYS implementierten Lösungsalgorithmus wird ein SIMP-Ansatz (*solid isotropic microstructure with penalization*) [10] genutzt, um typische 0-1-Designs zu generieren, welche dann die Interpretation von kraftflussaffinen Mustern linienartiger Verstärkungen ermöglichen.

Das Finite-Elemente-Modell bestehend aus einer Schalenstruktur entsprechend den geometrischen Abmessungen des *EuroTrough*-Moduls und zwei Abrollsiceln zeigt Bild 3. Die Schalenstruktur entspricht dem Entwurfsraum für die topologische Optimierung, die Siceln sind als nicht veränderlicher Elemente ($\rho = 1$) modelliert.

Da bei Parabolrinnen die Beanspruchung der Schale stetig variieren, wurden vorerst vereinfachte Ansätze für Eigen-, Wind- und Torsionslasten bei konstanter Kollektormodulauslenkung (Mittagsposition, nach oben geöffnet) angesetzt, Bild 4. Ergänzt sind Ergebnisse der Topologieoptimierung als Dichteverteilungen, welche in einer Volumenreduktion von 70 % resultieren. Alle Dichteverteilungen ergeben einen erhöhten Materialbedarf an den Auflagerrändern aufgrund von Spannungsspitzen. Ansonsten unterscheiden sich die Designs deutlich voneinander und sind eben nur für ihren speziellen Lastfall das topologische Optimum.

2.2 Robuste Topologieoptimierung und Schalmatrix

Zur Integration unterschiedlicher Lastfälle sollte die Zielfunktion im Sinne eines multiobjektiven Optimierungsansatzes als gewichtete Summenachgiebigkeit der Einzellastfälle definiert werden. Das Optimierungsproblem erweitert sich zu $\min \sum_k c_k(\rho_i)$. Ergebnis ist ein gegen alle drei Lastfälle k (Bild 4) robustes Design (Bild 5, links). Die Wichtungen w_k der einzelnen Nachgiebigkeiten c_k wurde hier gleich gewählt. Die so generierte Dichteverteilung dient der Entwurfsunterstützung für die Verstärkungsrippen, die sich als maßgeblich rautenartige Rippen mit Randverstärkungen an den Schalenlängsseiten ergaben

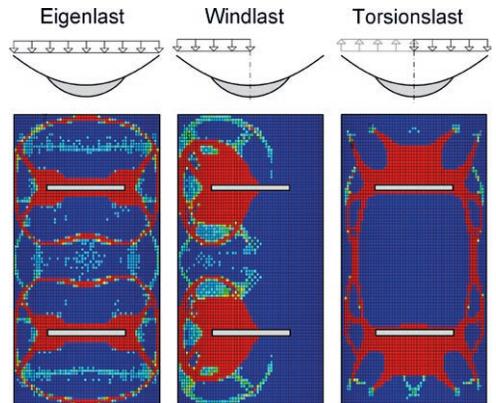


Bild 4: Ergebnisse der Topologieoptimierung als Verteilung der Pseudodichte (rot = 1 → potentielle Verstärkungsrippen, blau = 0 → kein Material) für einzelne Lastfälle | Quelle: Patrick Forman

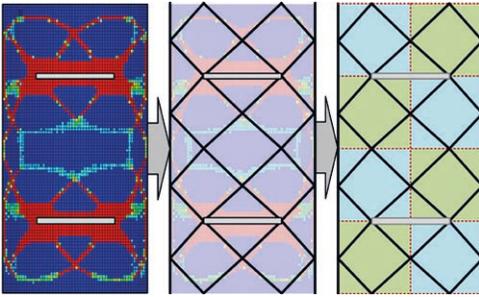


Bild 5: Pseudodichteverteilung für den Ansatz einer minimierten Summennachgiebigkeit (links), identifizierte Verstärkungsrippen (Mitte) und resultierenden Schalungsmatrizen (rechts | Quelle: Patrick Forman

(Bild 5, Mitte). Sie kann in zwei unterschiedliche, farblich markierte, quadratische Substrukturen unterteilt werden, Bild 5, rechts, die als einzelne Schalungsmatrizen dienen können (Abschnitt 4).

2.3 Topologieoptimierung mit verbesserten Lastansätzen

In Weiterentwicklungen wurde der Detailgrad der Belastung erhöht. Beispielsweise wurden auslenkungsabhängige Eigen- und Windlasten explizit hergeleitet [6] und Torsionslasten qualitativ und quantitativ berücksichtigt, wobei letztere nur einen vernachlässigbaren Anteil zur Strukturfindung beitragen und für die Topologieoptimierung nicht weiter angesetzt werden; bei der Dimensionierung mittels Formoptimierungsansätzen hingegen schon. Weitere Untersuchungen betrafen u. a. Elementgrößen und -arten (*solid* oder *shell*), die Wichtung von Eigen- und Windlasten beim Summennachgiebigkeitsansatz, die Variation der Auflagerabstände (Feldlängen) und den Ansatz unterschiedlicher Volumenreduktionen.

Die daraus resultierenden Strukturkonzepte zeigten meist ähnliche Muster für potentielle Verstärkungsrippen auf. Jedoch können Ersatzmodelle als Quadranten der gesamten Schale in Rand- und Feldmodelle unterteilt werden, da diese sich von den Symmetrieauflagerungen und auch, infolge unterschiedlicher Auflagerabstände, in ihrer Grundgeometrie unterscheiden. Bild 6 zeigt verschiedene Ansätze von Verstärkungsrippen für beide Arten von Ersatzmodel-

len (vereinfachend als Quadranten), die später in der sensitivitätsbasierten Formoptimierung weiter analysiert, bewertet und zurück in ganzheitliche Modelle überführt werden.

3 Formoptimierung von Schalen(teil-)strukturen und Prototyp (RUB)

3.1 Genauigkeitsbewertung und Verformungsrestriktionen

Die Bündelung der umgelenkten solaren Direktstrahlung auf das Absorberrohr ist abhängig von zeit- und lastbedingten Schalenverformungen und den daraus resultierenden Steigungsfehlern der Schalenoberfläche. Solche Welligkeiten der verspiegelten Oberfläche bewirken Winkelfehler der reflektierten Solarstrahlung. Das in [6] hergeleitete Wirksamkeitskriterium dient der optischen Wirksamkeits- und der strukturellen Systemsteifigkeitsbewertung von Parabolschalendesigns. Es ist von der eigentlichen Strukturoptimierung entkoppelt, um das Pareto-Problem einer gegenläufigen Zielstellung – maximale Steifigkeit bei minimalem Gewicht – zu vermeiden. Deshalb wird die angestrebte maximale Steifigkeit in eine Verformungsrestriktion für den Strukturoptimierungsprozess überführt.

Die Steigungsfehler der verformten Schalenoberfläche der Parabolschale setzen sich aus Mikrorauigkeiten als lokale Welligkeiten und Makrorauigkeiten als Querverformungen der Schale zusammen. Mikrorauigkeiten, z. B. infolge von

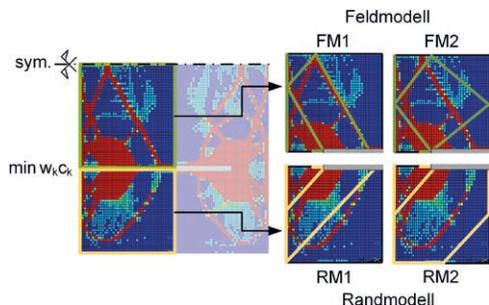


Bild 6: Ersatzmodelle als Quadranten für Rand- und Feldbereich | Quelle: Patrick Forman

Fehlstellen der Schalung oder lokale Schwindgradienten, werden über den Ansatz von instationären, stochastischen Zufallsfeldern [11] als Initialverformungen bewertet. Makrorauigkeiten hingegen werden als konservative Verformungsrestriktion aus dem nach [12] abgeleiteten Akzeptanzhalbwinkel θ_1 der Solarstrahlaufweitung am vereinfachten System eines Kragarms hergeleitet. θ_1 ist der maximal erlaubte Winkelfehler eines am Parabolrinnenrand reflektierten Solarstrahls, damit dieser noch das Absorberrohr trifft (Bild 7).

Für den äquivalenten Kragarm – mit halber Aperturweite als Systemlänge – kann abhängig von der Verformung die maximale Krümmung – repräsentativ für den Steigungsfehler der Parabeloberfläche – am Kragarmende bestimmt werden, für die der Akzeptanzhalbwinkel θ_1 eingehalten wird. Basierend auf verschiedenen Biegefiguren lässt sich die maximale Verformung u_{max} für den Parabelrand am Ersatzsystem herleiten, Bild 7, unten. Wegen des vereinfachten Ansatzes eines äquivalenten Kragarms in Querrichtung wird die Verformung im Formoptimierungsprozess auf $u_{max} = 4,3$ mm begrenzt, da in diesem Fall die maximale Krümmung am Kragarm- bzw. Parabelrand erreicht wäre.

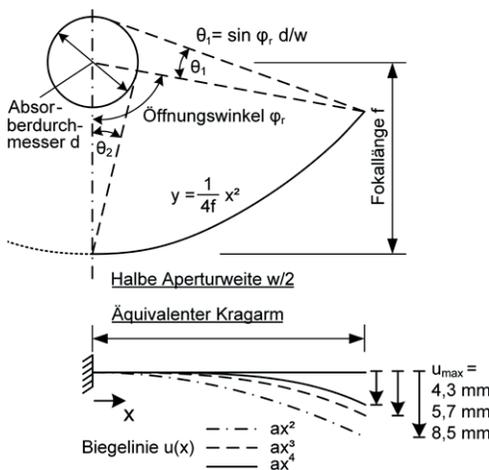


Bild 7: Zusammenhang zwischen Akzeptanzhalbwinkel θ_1 und Verformungsfiguren eines äquivalenten Kragarms | Quelle: Patrick Forman

3.2 Formoptimierung und Umsetzung zum Prototyp

Die identifizierte, rautenartige Anordnung der Verstärkungsrippen wurde nun für eine konsekutive Formoptimierung der Parabolschale unter Ansatz genauer Lastenansätze als parametrisiertes FE-Modell umgesetzt, Bild 8. Dazu wurde das Modell aus Bild 3 um die äußeren Verstärkungen erweitert. Schale, Verstärkungsrippen und Abrollsiceln wurden mit 2D Schalenelementen mit sechs Knotenfreiheitgraden modelliert. Der Lastabtrag sollte primär über die Verstärkungsrippen erfolgen und die eigentliche Schale als dünnwandiges, formtreues Substrat für die Reflektorelemente umgesetzt werden.

In einer Vorstudie wurde ein Testsegment mit einer Q188-Mattenbewehrung mit 1 cm Betondeckung (Sekundärrippen) und einer minimalen Dicke von 0,5 cm hergestellt. Die Sekundärrippen dienten als Orientierung für die aus der Topologieoptimierung resultierenden Verstärkungsrippen. So reduzierte sich die Apertur der rippenverstärkte Parabolschale auf eine Größe von 5,42 m x 11,88 m.

Die Formoptimierung erfolgt für den Betriebszustand mit Einwirkungen aus Eigenlast, Wind und Temperatur, nach [6] mit dem in ANSYS integrierten SIMP-Algorithmus. Als Material wird der NANODUR®-Beton aus Phase 1, [3], [13] mit $E_c = 47.600$ MPa angesetzt. Restriktiv sind $u_{max} = 4,3$ mm und die Hauptnormalspannungsbegrenzung σ_1 auf die zentrische Zugfestigkeit $f_{ct,0,05\%} = 5,4$ N/mm² zur Sicherstellung des ungerissenen Zustands I. Die Formtreue wird durch das zusätzliche Verformungskriterium garantiert. Somit ist die Minimierung des Volumens (bzw. der Masse) die alleinige Zielfunktion. Variabel ist die Geometrie der als konstant über ihre Länge angesetzten, rechteckigen Verstärkungsrippen. Die Formoptimierungsergebnisse sind in Bild 8, unten dargestellt. Es resultieren 16 cm hohe und 5 cm breite Verstärkungsrippen. Zudem ist die Verformungsrestriktion u_{max} dominierend. Das resultierende Volumen der gesamten Parabolschale beträgt für den Optimalentwurf 1,53 m³, was einer mittleren Dicke

eines äquivalenten Vollwandquerschnitts von nur 2,3 cm entspricht. Die so topologie-, form- und herstellungsoptimierte Struktur bildet die Basis für den Großdemonstrator.

3.3 Sensitivitätsbasierte Optimierung konkurrierender Schalen(teil)strukturen

Die in Abschnitt 2.3 hergeleiteten Schalenteilstrukturen als Quadranten wurden konkurrierend zum herstellungsoptimierten Prototyp mithilfe einer sensitivitätsbasierten Optimierungsstrategie, basierend auf den Entwicklungen in [6], in einem mehrstufigem Prozess sukzessiv von einer Schalenteilstruktur mit wenigen geometrischen Freiwerten zu ganzheitlich optimierten, linienartig verstärkten Kollektorschalen weiterentwickelt. Die Vorgehensweise selbst wird in diesem Bericht nicht ausführlich dargelegt.

Die Untersuchungen erfolgten für die Lagerungsbedingungen eines Randmodells (zweiseitige Symmetrielagerung) und eines Feldmodells (dreiseitige Symmetrielagerung) für alle vier hergeleiteten Schalenteilstrukturen mit Verstärkungsrippen, jeweils unter Eigenlast und

einer als konstant idealisierten Windlast für eine nach oben hin geöffnete Rinne. Sowohl für Feld- als auch Randmodell zeigten die Modelle 1 und 4 (Bild 9, links) hohe Steifigkeit und/oder geringste Masse auf, was sowohl Rechnungen am Teilmodell als auch an ganzheitlichen Parabolschalenmodellen ergaben. An den ganzheitlichen Modellen erfolgte eine Optimierung unter expliziten Eigen-, Wind-, Torsions- und Temperaturbeanspruchung. Für beide Modelle wurden sowohl Verformungs- als auch Spannungsrestriktionen voll ausgenutzt. Modell 1 besitzt ein Volumen von 1,73 m³ und Modell 4 von 1,58 m³, was einer äquivalenten Dicke von 2,25 cm bzw. 2,05 cm entspricht. Die Winkelfehler liegen jeweils unter dem Akzeptanzhalbwinkel θ_1 , der für die Geometrie des *EuroTrough* ca. 12 mrad entspricht. Für Modell 4 ist jedoch eine erhöhte Streuung des Winkelfehlers festzustellen, was bei Überlagerung mit anderen Wirksamkeitsverlusten wie Trackingfehlern bei Sonnennachführung zu Wirksamkeitsverlusten führen kann.

Zusammenfassend steuern Rippenanordnungen vom Auflager zu den Eckbereichen bzw. Bereichen mit erwartungsgemäß maximalen

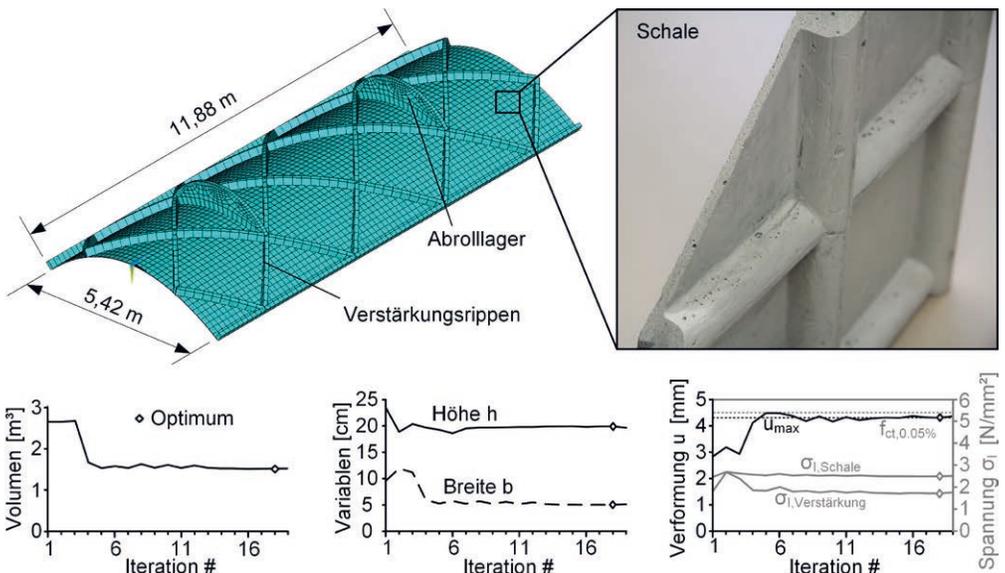


Bild 8: FE-Modell mit Verstärkungsrippen und Detail der Schale (Q188 mit minimaler Betondeckung sowie (unten) Ergebnisse der Formoptimierung | Quelle: Patrick Forman und Tobias Stallmann

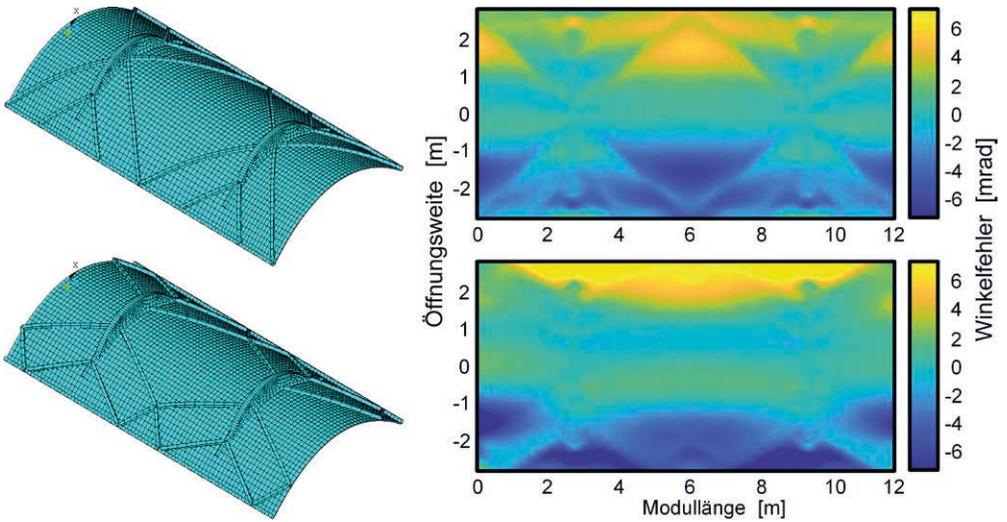


Bild 9: Numerische Modelle für die ganzheitlichen Parabolschalen und Winkelfehler der formoptimierten Strukturen für den maßgebenden Lastfall (oben: Modell 1, unten: Modell 4) | Quelle: Patrick Forman

Durchbiegungen zu einem kraftflussaffinen Lastabtrag bei, wodurch infolge der Formoptimierung leichte Parabolschalen erzeugt werden. Modell 4 ist etwas weicher (vgl. die erhöhte Streuung des Winkelfehlers), erfüllt aber dennoch alle Anforderungen an materiellen Restriktionen und Verformungsarmut.

4 Entwicklung und Herstellung von Schalungsmatrizen aus Nanodur® (TU KL)

Basierend auf der Strukturoptimierung musste eine geeignete, praxistaugliche Schalentechnik entwickelt und erprobt werden. Hier war die intensive Kooperation mit der Fa. INNOGRATION GmbH von großer Bedeutung.

Das entwickelte Parabolschalenkonzept aus sehr dünn auszuführender Schale mit Versteifungsrippen unter Verwendung einer konventionellen Bewehrungsmatte war eine große Herausforderung. Gleichzeitig sollte das Schalungssystem intelligent, nachhaltig und kostengünstig sein. Die Partner INNOGRATION und Solarlite evaluierten die Kosten. Die Fa. Dyckerhoff Zement, mit der beide beteiligten Universitäten schon lange ko-

operieren, brachte ihr Know-how zu Verarbeitung und Nachbehandlung von Nanodur®-Beton bei der Realisierung sehr filigraner tragender Strukturen – hier: extrem dünne Betonspiegeldicke von nur 5 mm – mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand ein.

4.1 Konzept für die Schalungstechnik

Der Schalungskörper musste höchsten Genauigkeitsanforderungen entsprechen. Eine Stahlschalung weist zwar eine hohe Steifigkeit, Genauigkeit und Dauerhaftigkeit auf, allerdings wäre die Realisierung der geplanten, doppelt gekrümmten Geometrie höchst aufwendig und kostenintensiv. Eine Alternative kann der Einsatz von Hochleistungsbeton, bspw. auf Grundlage der Bindemittelvormischung Nanodur®-Compound 5941 der Firma Dyckerhoff, sein, was bereits verschiedentlich – auch bei Parabolschalen – gezeigt werden konnte, z. B. [13]–[15]. Nachfolgend werden Entwicklung und Herstellung einer Schalungsmatrix aus Nanodur® beschrieben. Dabei galt es, in einem iterativen Verfahren in fortlaufender Diskussion mit den Projektpartnern Materialminimierung, Taktzeiten, Kosten, Herstellsicherheit und Nachhaltigkeit zu berücksichtigen.

Das Vorgehen sollte zuerst an einem Teilstück der Parabolrinne im Originalmaßstab (Größe $52,2 \times 68,3$ cm) erprobt werden. Für die Herstellung der Matrize wurden verschiedene Techniken analysiert. Eine Möglichkeit wäre Formsand, wie er heute insbesondere in der Stahl- und Gussindustrie Stand der Technik [16] ist, insbesondere beim Feingießen. Auch die im SPP-Projekt Dröder/Kloft näher untersuchte Technik der Non-Waste-Wachsschalungen [17] wurde diskutiert. Durch die Wiederverwendbarkeit der Wachse bietet dieser Prozess sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile gegenüber konventionellen Einwegschalungen. Zur Herstellung von Parabolrinnen aus Nanodur®-Beton in industrieller Serienfertigung sind die aufgezeigten Herstellprozesse aber aufgrund des hohen Bearbeitungsaufwandes nicht geeignet. Diese Verfahren ermöglichen zwar einen hohen Grad an Detaillierung sowie eine freie Formgebung, allerdings werden sowohl die Schalung mit Formsand als auch die Wachsschalung durch den Ausschalprozess zerstört und müssen für jedes Element neu hergestellt werden. Durch die Wiederverwendbarkeit der Materialien bieten diese Systeme dennoch ein hohes Potenzial im Bereich von individuell herzustellenden Betonfertigteilen.

Ungeachtet dessen dienen die oben genannten Verfahren als Grundlage zur Entwicklung der eigenen Herangehensweise. Das Probesegment sollte aus einem Block aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum, hier Styrodur® 5000 CS,

herausgefräst und dann mit Nanodur®-Beton abgegossen werden. Nach dem Entfernen des Positivs aus dem Betonkörper kann dieser wiederum beliebig oft als Schalung für weitere Probesegmente verwendet werden.

4.2 Entwicklung der Schalungsform des Probesegments

Trotz der komplexen Form mit Haupt- und Nebenrippen mussten eine Betonage ohne Fehlstellen und auch ein materialschonendes Ausschalen des Probekörpers sichergestellt werden. Zudem sollte die Schalungsmatrize durch eine Person handhabbar sein.

Das Probeelement im Originalmaßstab entspricht einem Ausschnitt im Bereich des Scheitelpunktes in Feldmitte der Parabelform eines Moduls analog zu Bild 8. Schwierig bei der Schalungskonstruktion sind die einachsig parabelförmig gekrümmte Fläche der Modulinnenseite sowie die Geometrie der 19 cm hohen, sich nach oben hin verjüngenden Hauptrippen, die parallel zu dieser Krümmung verlaufen. Am Ansatz der Spiegelfläche beträgt die mittlere Breite 5,5 cm, auf der Oberseite dann nur noch 4,5 cm, um ein einfaches Ausschalen der Konstruktion zu gewährleisten. Zur Reduktion von Spannungsspitzen und somit Rissen während der Hydratation wurden alle Ecken und Kanten mit einem möglichst großen Radius abgerundet.

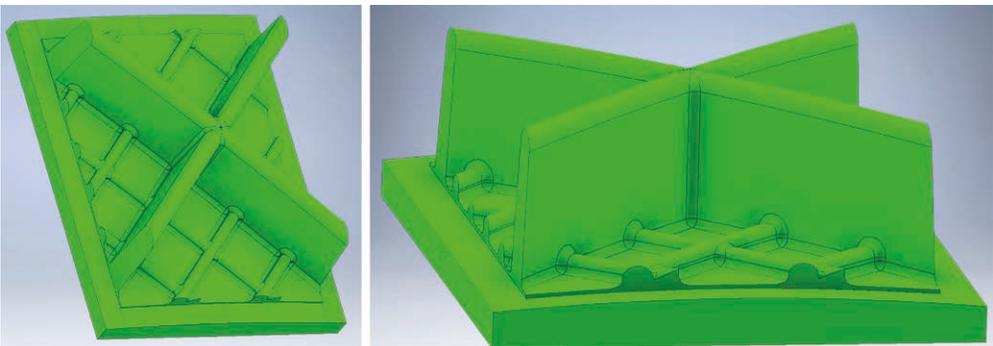


Bild 10: Digitales Modell des Probesegments mit umlaufendem Rand | Quelle: Tobias Stallmann

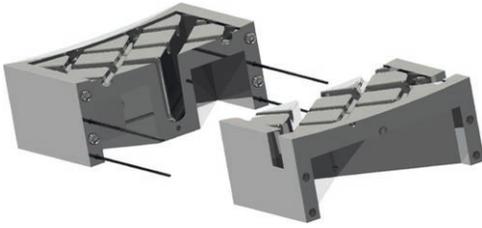


Bild 11: Digitales Modell der Schalungsmatrize mit Aussparungen zur Gewichtsreduktion und Verbindungsmitteln | Quelle: Tobias Stallmann

Basis für die Schalung war das digitale Modell des Positivs. Der umlaufend angeordnete Rand dient bei der fertigen Schalungsmatrize als Gegenlager für die gewölbte Deckelschalung (Bild 10). Das Gesamtmodell der Schalungsmatrize wurde dann mittels Boolescher Operation erzeugt. Für ein besseres Handling wurde der Schalungsblock in zwei Segmente aufgeteilt und mit Aussparungen zur Gewichtsreduktion und Öffnungen für die Betonage versehen. Weitere Elemente wie Verbindungsmittel und Anschlüsse stellten die formschlüssige Verbindung sicher (Bild 11).

4.3 Bewehrungstechnik

Wie bereits aufgezeigt, soll das Grundelement der Schale aus einer Bewehrungsmatte Q188A mit einer einheitlichen Betondeckung von 1,0 cm und einer Betonschalendicke in den Feldern zwischen den Bewehrungsstäben von 0,5 cm bestehen. Diese dünnwandige Struktur dient primär als tragende Ebene für die Verspiegelung. In einer Vorstudie zur Machbarkeit wurden mehrere Modelle mit und ohne Bewehrungseinlage (vgl. Bild 9) und auch mit Bewehrungsmatte hergestellt. Zur Lagesicherung der Bewehrung wurden kreisförmige Abstandhalter verwendet. Bild 12 zeigt einen Sägeschnitt durch eines der Modelle. Man erkennt die nahezu gleichmäßige Betondeckung radial um den Bewehrungsstab und die Homogenität des Betons im nur 5 mm dicken Bereich.

Durch die Bemessung der Hauptrippen für den Zustand I ist die Bewehrung theoretisch nicht erforderlich, eine Mindestbewehrung zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilverhaltens

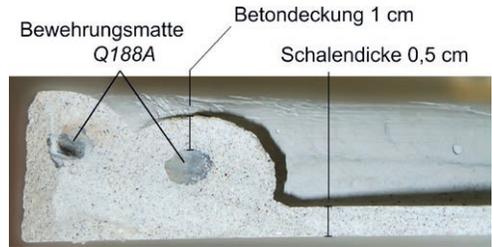


Bild 12: Vorstudie zur Machbarkeit - Schrägschnitt | Quelle: Tobias Stallmann

hingegen schon. Neben der Bewehrungsmatte wird in den Hauptrippen zusätzlich Betonstahl B500 angeordnet, um im Havariefall die Risschnittgröße aufnehmen zu können. Unter Ansatz der Zugfestigkeit des Nanodurs® $f_{ct,0,05\%} = 5,4 \text{ N/mm}^2$, der Rippenquerschnittsfläche $A_c = 0,05 \text{ cm} \times 0,19 \text{ cm}$ und einer maximalen Stahlspannung $\sigma_s = 200 \text{ N/mm}^2$ ergeben sich $2,57 \text{ cm}^2$ als erforderliche Bewehrungsmenge, realisierbar mit $2 \text{ } \varnothing 14 \text{ mm B500}$.

4.4 Herstellung von Schalung und Probe-segment

Für die Herstellung der Schalung wurden mehrere Platten Styrodur® 5000 CS flächig zu einem Block verklebt, aus dem dann mittels CNC-gesteuerter Spezialfräse das vorher modellierte Positiv herausgearbeitet wurde (Bild 13). Dessen Oberfläche konnte durch den speziellen Fräskopf sehr glatt hergestellt werden. Dennoch war eine Beschichtung mit zweikomponentigem Guss-Silikon erforderlich, da die gefräste Styrodur®-Oberfläche sehr saugfähig und somit als Kontaktfläche für den feinkörnigen Nanodur®-Beton ungeeignet war. Das fertige Modell wurde zur Qualitätssicherung mittels ATOS 3D-Scan [18] vermessen. Dies dient einer fortlaufenden Qualitätskontrolle und liefert nach Fertigstellung der Schalungsmatrize und der hieraus hergestellten Probekörper eine Aussage darüber, welche Abweichungen bei dem gesamten Herstellungsprozess gegenüber dem CAD-Modell auftreten. Diese Daten können dann invers z. B. als initiale Überhöhung im digitalen Modell berücksichtigt werden, um letztendlich Bauteile in Soll-Geometrie zu erhalten.

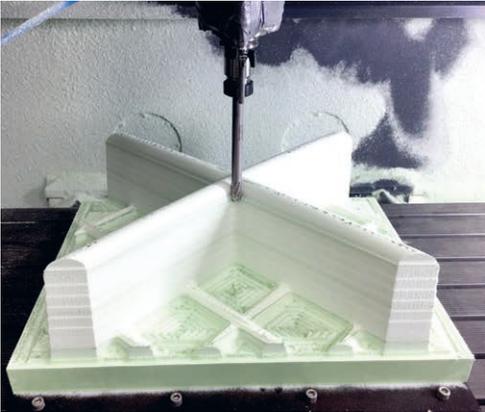


Bild 13: Herstellung des Positivs mittels CNC-Fräse (links) und Beschichtung der Oberfläche mit zweikomponentigem Guss-Silikon (rechts) | Quelle: Tobias Stallmann

Im letzten Schritt wurden die Schalung zusammengesetzt und das Positiv eingepasst. Zur Vermeidung von Betonabplatzungen wurde eine einlagige Mikrobewehrung aus normalfestem Stahldraht (DUCON®, Ø 1,0 mm, 12,7 mm Maschenweite) eingesetzt. Um den Verbund zwischen Schalung und Betonkörper während des Ausschalens einfacher lösen zu können, wurden Aluminium-Röhrchen eingesetzt, wodurch Druckluft oder auch Flüssigkeiten in die Kontaktfläche zwischen Beton und Schalung eingebracht werden konnten. Ein mittiges Blech diente der Trennung der Schalung des Probestegments in zwei Komponenten, was Vorteile beim Ausschalen und der Handhabung der Schalungssegmente bringt. Bild 14 zeigt die fertige Schalungsmatrize. Durch die selbstverdichtende Eigenschaft des Betons wurden kleinste Unebenheiten der Silikonoberfläche auf die Betonoberfläche übertragen, was zur Verzahnung zwischen Positiv und Schalungsmatrize führte, sodass das Positiv zerstört werden musste, um es aus dem Betonkörper zu entfernen.

Folglich war eine erweiterte Oberflächenbearbeitung der Schalungsmatrize erforderlich. Basierend auf einer Recherche und mehreren Kleinversuchen wurde ein Paraffin mit einer Schmelztemperatur von 55–60 °C für die Beschichtung der Matrizenoberfläche ausgewählt. Dieses ist während der Betonage widerstandsfähig aber dennoch ausreichend formbar, um

den geringen Schwindverformungen des Betons nachzugeben. Ein Beheizen der Schalung kombiniert eine Wärmenachbehandlung mit dem Verflüssigen des Paraffins, welches abfließen – und so eine vollständige Trennung von Bauteil und Schalung ermöglicht – und anschließend wiederverwendet werden kann. Allerdings ist eine Nachbearbeitung zwingend erforderlich, da die Oberfläche nach dem Aufsprühen des flüssigen Paraffins unregelmäßig wirkt (Bild 15 a), oben), da das Paraffin durch die Druckluft und die feine Zerstäubung stark abgekühlt und nicht mehr vollständig flüssig auf der Oberfläche auftrifft, was zur klar erkennbaren Flockenbildung führt.



Bild 14: Schalungsmatrize aus Nanodur® | Quelle: Tobias Stallmann

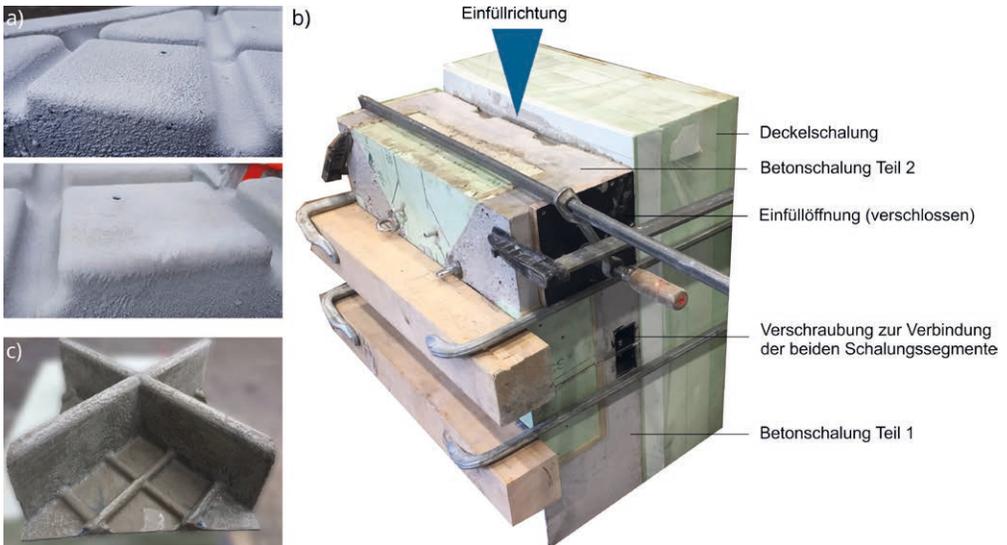


Bild 15: Herstellung des Probesegments: a) Paraffinschicht auf der Schalung; oben unbehandelt und unten nach Behandlung mit Heißluftfön, b) Herstellprinzip, c) Betonelement | Quelle: Tobias Stallmann

Mit einem Heißluftfön wurden die Flocken auf der Oberfläche nochmals kurz verflüssigt, was eine deutlich ebenere Wachsoberfläche ergab, Bild 15 a), unten.

In Bild 15 b) sind die einzelnen Komponenten der Gesamtschalung dargestellt. Die Deckelschalung wurde aufgrund ihrer parabelförmigen Oberfläche ebenfalls aus einem Styrodur®-Block herausgefräst. Während der Betonage wurde zuerst der untere Teil der Schalungsmatrize mit Beton gefüllt, danach der zweite Teil installiert und ebenfalls betoniert. Das Testsegment war unbewehrt. Nach etwa 72 Stunden wurde die Deckelschalung entfernt und die gesamte Schalungsmatrize inklusive des noch darin enthaltenen Probesegments für 24 Stunden auf 65 °C erwärmt. Anschließend konnte das Probesegment einfach aus der Schalungsmatrize gelöst werden. Die Qualität des Probesegments ist insgesamt als gut zu bewerten, s. Bild 15 c).

Insgesamt wurde gezeigt, dass die Herstellung eines Probesegments mit einer Betonschalung möglich ist. Weitergehend sollte der Fokus insbesondere auf die Beschichtung der Schalung

mit Paraffin oder ähnlichen Stoffen gerichtet werden. Denkbar wäre ein automatisierter Beschichtungsprozess mit einer hinsichtlich Heißbeschichtung optimierten technischen Anlage.

4.5 Digitaler 3D-Scan als Qualitätskontrolle für filigrane Strukturen

Eine abschließende Bewertung des hergestellten Probesegments erfolgte durch den Vergleich der tatsächlichen Geometrie mit dem digitalen 3D-Modell. Zur Erstellung eines digitalen Modells der Ist-Geometrie wurde das Testobjekt aus unterschiedlichen Entfernungen und Aufnahmewinkeln gescannt. Aus den generierten Bildern wurde eine 3D-Netzstruktur generiert, die sowohl in der systeminhärenten Software als auch in herkömmlichen CAD-Anwendungen weiter verarbeitet werden kann.

Zur Geometrieaufnahme wurde ein digitaler 3D-Scanner ATOS COMPACT SCAN 5M der Firma GOM GmbH eingesetzt [18]. Abhängig von der Kalibrierung des Sensors können hiermit Messvolumina von bis zu 1200 × 900 × 900 mm pro Aufnahme abgedeckt werden. Die Messpunktabstände variieren zwischen 124 und 481 µm.

Zur Überprüfung der Toleranzen während der Herstellung der Betonschalung und des Probesegments wurde zum einen das mit Silikon beschichtete Positiv aus Styrodur® und zum anderen das Probesegment selbst gescannt. Nach Abschluss wurden die digitalen Modelle in der Software überarbeitet, z. B. wurden fehlerhafte Stellen in der Netzstruktur ausgebessert. Im Ergebnis liegt dann die tatsächliche Geometrie des Objekts in CAD-tauglicher Form vor. Bild 16, links, zeigt den Vergleich zwischen dem aus einem Styrodurblock gefrästen Positiv und den CAD-Daten. Alle Abweichungen bewegen sich im Bereich von ± 2 mm. Die ebenen Flächen und die Nebenrippen entsprechen fast dem Soll, für die vertikalen Flächen der Hauptrippen sind größere Differenzen erkennbar. Eine mögliche Ursache wird in der Verwendung des Rundkopffräsers gesehen. In diesen Bereichen kommt nur eine reduzierte Schnittfläche (äußere Klingensreihen des Fräskopfes) zum Einsatz. Durch die so reduzierte Zerspanungsleistung wird bei gleichbleibender Vorschubgeschwindigkeit der Druck durch den Fräskopf auf den elastischen Polystyrolschaum erhöht, was zu einer Verschiebung der Hauptrippen während des Prozesses führt.

Bild 16, rechts, zeigt den Vergleich zwischen dem betonierten Probesegment und der initial erstellten CAD-Datei. Die Toleranzen zwischen $-7,5$ mm und $+5,0$ mm sind hier deutlich grö-

ßer. Die Fuge durch die zweiteilige Schalung ist deutlich erkennbar, da sie während der Herstellung nicht exakt oberflächenbündig abgedichtet werden konnte. Die resultierende Abweichung um bis zu 5 mm erscheint akzeptabel, da sie weder die Tragfähigkeit noch die fokussierende Parabelgeometrie negativ beeinflusst. Kritischer ist die Abweichung bei den Hauptrippen, da dies sich auf die Gesamtsteifigkeit der Parabelschale und somit direkt auf deren optische Leistungsfähigkeit auswirkt. Grund für die relativ große negative Abweichung ist die ungleichmäßige Paraffinbeschichtung der Schalung. Für eine praxistaugliche Verwendung eines solchen Schalungssystems bleibt eine maschinelle Beschichtung der Schalungsoberfläche somit unabdingbar.

5 Prototyp

Nachdem die Machbarkeit einer Schalung aus Feinkornbeton erfolgreich demonstriert wurde, wären zur Herstellung eines Demonstrators im Originalmaßstab mehrere Schalungsmatrizen aus Beton erforderlich gewesen. Die einzeln hergestellten Segmente könnten dann zu einer Parabolrinne im Originalmaßstab zusammengesetzt werden. Bild 17 zeigt eine entsprechende Visualisierung. Wegen des langwierigen Prozesses der Entwicklung einer für die anspruchsvolle Geometrie geeigneten und

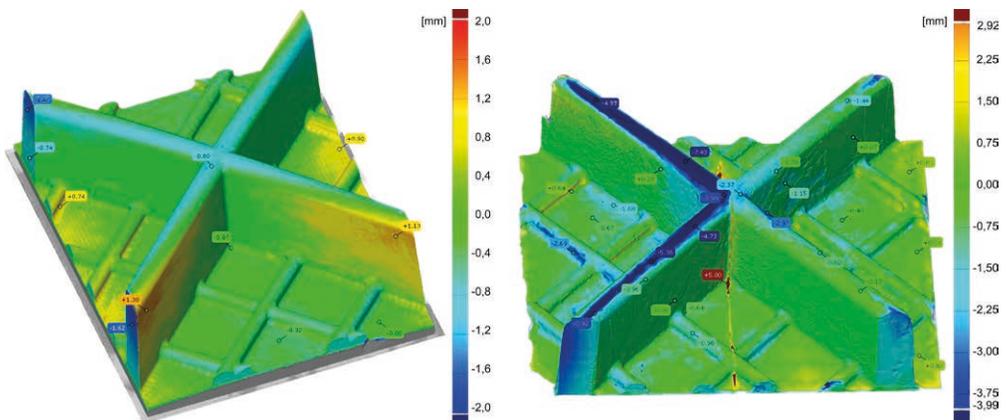


Bild 16: Soll-Ist-Vergleich beim gefrästen Positiv (links) und beim Nanodur®-Probesegment (rechts) | Quelle: Tobias Stallmann

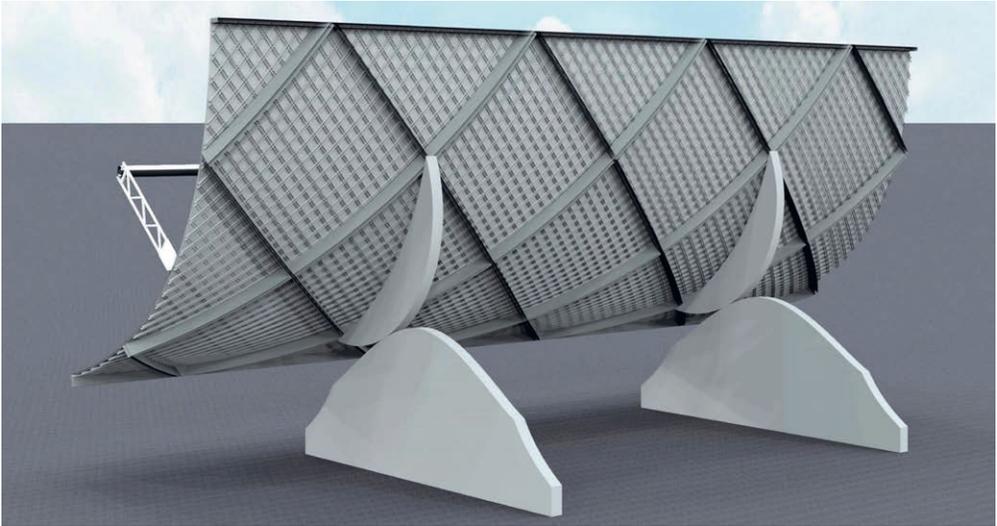


Bild 17: Digitales Modell eines Demonstrators im Originalmaßstab | Quelle: Patrick Forman

wirtschaftlich vertretbaren Schalungsmethode konnte der ursprünglich geplante Demonstrator innerhalb der Projektlaufzeit aber nicht realisiert werden.

6 Schlussfolgerungen

Ziel des Erkenntnistransferprojekts war die Entwicklung einer ganzheitlich strukturoptimierten Parabolschale mit linienartigen Verstärkungsrippen als Parabolrinnenkollektor für solarthermische Kraftwerke im Originalmaßstab des *EuroTrough*-Kollektors. Neben dem numerischen Entwurfs- und Optimierungsprozess lagen wesentliche Arbeiten in der Umsetzung einer möglichst präzisen Schalung, welche einerseits eine formgenaue Schaleninnenseite (Reflektorfläche) besitzt und zudem für die hohe Komplexität der äußeren Rippenstruktur aus Primär- und Sekundärrippen geeignet ist.

Im numerischen Optimierungsprozess wurden mithilfe der Topologieoptimierung Muster der Rippenverstärkungen identifiziert. Maßgebliche Strukturen wurden mithilfe von Summennachgiebigkeitsansätzen hergeleitet. Ergebnisse waren ein rautenartiges Verstärkungsmuster am ganzen Modell, welches Basis für die Schalungs-

matrizen eines Prototyps waren. Konkurrierend zur anschließenden direkten Formoptimierung des Prototyps mit rautenartigen Verstärkungsrippen – Grenzen waren die zentrische Zugfestigkeit und ein Verformungskriterium zur Sicherstellung der solaren Wirksamkeit – wurden weiterführende sensitivitätsbasierte Untersuchungen an den topologisch abgeleiteten Alternativstrukturen durchgeführt. Es zeigte sich, dass hier die geometrischen Freiwerte der Verstärkungsrippen von besonderer Bedeutung sind, materielle Variationen aber keinen maßgeblichen Einfluss haben. Die beiden dominanten Strukturen wurden in ganzheitliche Modelle überführt und analytisch und numerisch in ihrer Geometrie optimiert. Es konnten äquivalente Schalendicken von nur 2,30 cm bis 2,05 cm bei voller optischer Wirksamkeit erreicht werden.

Für der Schalung wurde ein symmetriereduziertes Schalungssegment aus Beton als Baustein einer Gesamtschalung der Parabolschale entwickelt. Es wurde demonstriert, dass mit einer Schalung aus Nanodur®-Beton frei geformte, komplexe Geometrien aus Beton hergestellt werden können. Die Erstellung einer Schalungsmatrize aus Beton ist allerdings zeit- und kostenintensiv, was dieses Verfahren erst bei

einer großen Anzahl an herzustellenden Betonkörpern wirtschaftlich werden lässt. Die mittels 3D-Scanner durchgeführten Genauigkeitsuntersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere die Paraffinbeschichtung auf einen industriellen Standard mit hohen Fertigungsgenauigkeiten angehoben werden muss, damit das Verfahren insgesamt wettbewerbsfähig werden kann.

Eine abschließende Kostenkalkulation wurde gemeinsam mit den Anwendungspartnern aufgestellt. Bei einer äquivalenten Schalendicke von 2,3 cm ergeben sich für die Schale Materialkosten von 18,25 Euro je m² Schalenfläche. Bei geschätzten Kosten für Antrieb, Verspiegelung, Einbauteile sowie Receiverrohre mit allen erforderlichen Komponenten von 85 Euro je m² und geschätzten Kosten von 33 Euro je m² für die Unterbauten ergeben sich je m² Schalenfläche Gesamtkosten von 135,50 EUR. Wegen des noch nicht vollständig ausgereiften Schalverfahrens ließen sich die Kosten für die Schalung und Errichtung einer Produktionsanlage für die Anwendung in einer Großanlage mit 25,00 EUR je m² nur abschätzen. Damit wird der von dem Anwendungspartner Solarlite bezifferte Weltmarktpreis von 145,00 EUR pro m² Kollektorfläche zwar nicht vollständig erreicht. Unter Berücksichtigung der hohen Dauerhaf-

tigkeit, politisch gewollter, hoher Wertschöpfung vor Ort und erheblicher Vorteile bei der Montage der Ausrüstung ist die Herstellung von Solarrinnen in Betonbauweise aber durchaus aussichtsreich und wird von den Anwendungspartnern weiterverfolgt werden.

Danksagung

Das Vorhaben wurde in seiner Ausrichtung und Umsetzung wesentlich von den beteiligten Anwendungspartnern getragen. Die beteiligten Universitäten und ihre Mitarbeiter bedanken sich für vielfältige Unterstützung in Form von intensiver Begleitung, Vermittlung von Spezialwissen sowie für die Bereitstellung von Materialien.

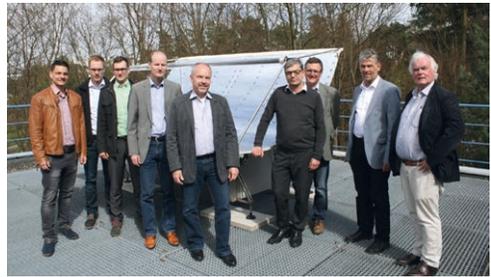


Bild 18: Vertreter der Universitäten und der Anwendungspartner bei einem Treffen an der TU Kaiserslautern | Quelle: TU KL

Literatur

- [1] Geyer, M.; Lüpfer, E.; Osuna, R.; Esteban, A.; Schiel, W.; Schweitzer, A.; Zarza, E.; Nava, P.; Langenkamp, J.; Mandelberg, E.: EuroTrough – Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation. In: Steinfeld, A.; Lior, N. (Hrsg.): Proc. of the 11th SolarPACES Int. Symp. on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, 04.-06.09.2002 in Zürich (Schweiz), 2002, 7 S.
- [2] Forman, P.; Mark, P.: Numerische Simulation und Optimierungsstrategien für Betonschalen von Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 242–253 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171546>
- [3] Müller, S.; Schnell, J.: Parabolrinnen für solarthermische Kraftwerke. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 242–253 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171407>
- [4] Forman, P.; Müller, S.; Ahrens, A.; Schnell, J.; Mark, P.; Höffer, R.; Hennecke, K.; Krüger, J.: Light concrete shells for parabolic trough collectors – Conceptual design, prototype and proof of accuracy. Solar Energy 111 (2015), S. 364–377
- [5] Weissbach, R.: Die abrollende Parabolspiegelrinne. Schutzrecht DE102011011805 A1. Industrial property right (23.08.2012)
- [6] Forman, P.: Optimierungsstrategien für Parabolrinnen zur Solarstrahlenkonzentration aus Hochleistungsbeton. Diss., Ruhr-Universität Bochum, 2016
- [7] Kämper, Ch.; Forman, P.; Stallmann, T.; Ahrens, M. A.; Mark, P.; Schnell, J.: Optimised High-Per-

formance Concrete Shells for Parabolic Trough Collectors. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (J. IASS) 58 (2017) 1, 191, S. 105–119

[8] Forman, P.; Kämper, C.; Stallmann, T.; Schnell, J.; Mark, P.: Parabolischen aus Hochleistungsbeton als Solarkollektoren. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 851–861 – DOI: 10.1002/best.201600051

[9] Bendsoe, M. P.; Sigmund, O.: Topology Optimization – Theory, Methods and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004

[10] Rozvany, G. I. N.: Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics. Structural and Multidisciplinary Optimization 21 (2001), S. 90–108

[11] van Marcke, E. H.: Random Fields – Analysis and Synthesis. Diss., Cambridge: MIT press, 1983

[12] Bendt, P.; Rabl, A.; Gaul, H. W.; Reed, K. A.: Optical analysis and optimization of line focus solar collectors. SERI/TR-34-092, Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado, 1979

[13] Sagmeister, B.: Maschinenteile aus zementgebundenem Beton. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag, 2017

[14] Deuse, T.; Sagmeister, B.: Anwendungen von UHPC auf Basis eines Spezialbindemittels in Bautechnik und Maschinenbau. BetonWerk International (2012) 1, S. 34–38

[15] Müller, S.; Forman, P.; Schnell, J.; Mark, P.: Leichte Schalen aus hochfestem Beton als Parabolrinnen solarthermischer Kraftwerke. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 752–762

[16] Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.; Decker, M.; Gottwald, B.: Einführung in die Fertigungstechnik. Stuttgart: Teubner, 2004

[17] Mainka, J.; Kloft, H.; Baron, S.; Hoffmeister, H.-W.; Dröder, K.: Non-Waste-Wachsschalungen. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 784–793

[18] GOM GmbH: ATOS COMPACT SCAN 5M, 2M mit Kameraträger 300 mm, 500 mm und SO. Braunschweig, 2015

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Auslegung von Parabolrinnen Typ EuroTrough für Solarkraftwerke im Originalmaßstab | Designing of parabolic troughs type EuroTrough in full-scale as a concrete construction for solar power plants

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell
Adresse Address:	TU Kaiserslautern, FG Massivbau und Baukonstruktion, Paul-Ehrlich-Straße, Gebäude 14, 67663 Kaiserslautern
Kontakt Contact:	+49 631 205-2157 juergen.schnell@bauing.uni-kl.de http://www.bauing.uni-kl.de/massivbau/home/
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark
Adresse Address:	Ruhr-Universität Bochum (RUB), Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Lehrstuhl für Massivbau, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum
Kontakt Contact:	+49 234 32-22700 peter.mark@rub.de http://www.massivbau.rub.de/
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project
Förderzeitraum Funding period:	01.03.2015–30.09.2017 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 30.06.2018
Team Team:	Tobias Stallmann (TU KL) Patrick Forman (RUB)
Partner Partners:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR, Institut für Solarforschung, Linienfokussierende Systeme, Köln Solarlite CSP Technology GmbH, Duckwitz INNOGRATION GmbH, Bernkastel-Kues Dyckerhoff Zement, Wiesbaden

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Forman, P.; Kämper, C.; Stallmann, T.; Schnell, J.; Mark, P.: Parabolschalen aus Hochleistungsbeton als Solarkollektoren. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 851–861 – DOI: 10.1002/best.201600051
- Kämper, Ch.; Forman, P.; Stallmann, T.; Ahrens, M. A.; Mark, P.; Schnell, J.: Optimised High-Performance Concrete Shells for Parabolic Trough Collectors. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) 58 (2017) 1, 191, S. 105–119
- Forman, P.; Stallmann, T.; Mark, P.; Schnell, J.: Multi-level Optimisation of Parabolic Shells with Stiffeners Made from High-Performance Concrete. In: Hordijk, D. A.; Luković, M. (Hrsg.): High Tech Concrete: Where Technology and Engineering meet – Proc. of Int. fib Symp., 12.–14.06.2017 in Maastricht (Niederlande), Springer Int. Publ., 2018, S. 2503 –2511 – DOI 10.1007/978-3-319-59471-2_285
- Stallmann, T.; Forman, P.; Kämper, C.; Schnell, J.; Mark, P.: Development and Construction of Light-Weight Parabolic Troughs made of High-Performance-Concrete. In: Abramski, M.; Korzeniowski, P. (Hrsg.): Current Scientific Challenges in Concrete and Steel Structures – Proc. of 5th German – Polish PhD Symp., 18.–21.06.2017 in Gdansk (Polen), 2017, S. 123–133
- Forman, P.: Optimierungsstrategien für Parabolschalen zur Solarstrahlenkonzentration aus Hochleistungsbeton. Diss., Lehrstuhl für Massivbau, Ruhr-Universität Bochum, 2016

Weiteres | Additional

Studentische Arbeiten | Student's works

- Schewe, L.: Prototypische Entwicklung und Umsetzung von Parabolschalen für solarthermische Parabolrinnenkraftwerke aus hochfestem Feinkornbeton. Bachelor's Thesis, RUB, 2017
- Huynh, T.-P.: Gestufte, sensitivitätsbasierte Strukturoptimierung linienerstärkter Parabolschalen für solarthermische Kraftwerke aus hochfestem Beton. Master's Thesis, RUB, 2018
- Schellen, M.: Durchführung einer Machbarkeitsstudie zur Herstellung und Verwendung einer innovativen Betonschalung für Parabolrinnen aus Nanodur-Beton. Studienarbeit, TU KL, 2018

Folgeprojekt | Follow-up project

- Adaptive Präzisionsstrukturen von Heliostaten aus Hochleistungsbeton für punktfokussierende Solarkraftwerke | Pinpoint accurate adaptive structures for heliostats made from high performance concrete for central tower power plants

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project
Laufzeit Period:	01/2018–06/2020

Sonstiges | Other

- 2017: Workshop „Windlasten auf Parabolrinnen“ mit Prof. Höffer, RUB | Workshop „Wind Loads on Parabolic Troughs“ with Prof. Höffer, RUB

ANSCHLUSSPROJEKTE

Punktfokussierende Heliostaten aus Hochleistungsbeton | Point-focusing heliostats made from high-performance concretes

► Patrick Forman¹, Sebastian Penkert², Peter Mark¹, Jürgen Schnell²

► ¹ Lehrstuhl für Massivbau, Ruhr-Universität Bochum

► ² Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion, TU Kaiserslautern

Die im Teilprojekt Mark/Schnell des SPP 1542 erbrachten Entwicklungen an Parabolrinnen (siehe S. 536 ff. des vorliegenden Buches) haben gezeigt, wie aussichtsreich die Verwendung von Feinkornbetonen für die Herstellung hochpräziser, formstabiler Bauteile ist [1], [2]. Die gewonnenen Erkenntnisse und die Nachfrage aus der Solartechnik ermutigen zur Übertragung auf verwandte Anwendungsgebiete, nämlich auf Heliostate [3] unter der Leitidee einer weitgehend industrialisierten Präzisionsfertigung. Wegen der extrem hohen Wiederholungszahl gleicher oder sehr ähnlicher Fertigteile sind Heliostate für den Betonfertigteilbau auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten in nahezu idealer Weise geeignet. Wesentliche Herausforderungen sind:

- die geometrische Genauigkeit, da durch die Lage des Fokuspunkts im Solarturm – bis zu hunderte Meter vom Heliostaten entfernt – die Anforderungen an die Präzision der Oberflächen gegenüber Parabolrinnen (Fokallängen von wenigen Metern) erhöht sind,
- die Adaptivität der Tragstruktur und somit auch der Herstellung (Schalungstechnik), da sich mit zunehmendem Abstand der konzentrischen Reihen um den Solarturm die Paraboloiden der Spiegelflächen öffnen, so dass im Wesentlichen gleiche, teiladaptive Fertigteile mit einzelnen geometrischen Anpassungsparametern (Parabelöffnung, Rotationspunkt des Antriebs = Bauteilschwerpunkt) zu erstellen sind und
- die Minimierung der Bewehrung (Verkürzung von Fertigungszeiten), was durch eine infolge Ringvorspannung überdrückte Strebenstruktur

Recent developments on parabolic troughs (see p. 536 seq. of this book) in Mark/Schnell's project of the SPP 1542 have shown that the use of fine-grained concrete is a promising alternative for the manufacture of highly precise components with low deformations [1], [2]. Their findings and requests in solar technology have encouraged a transfer to related fields of application, namely to heliostats [3]. The guiding principle is broadly industrialized precision manufacturing. Due to an extremely high number of identical or utmost similar precast elements, heliostats seem to be ideally suited for precast concrete construction from an economic point of view. Key challenges are:

- Geometric accuracy: since the distance to the focal point of a solar tower which is hundreds of meters away from the heliostats, the accuracy demands on the surface even increases compared to parabolic troughs with focal lengths of few meters.
- Adaptivity of the supporting structure and the production concerning formwork technology: since the paraboloid of the mirror surfaces widens with increasing distance of the concentric rows to the solar tower. Thus, almost identical and partially adaptive precast elements with individual control parameters (aperture, point of rotation of the drive = component's centre of gravity) have to be built.
- Minimisation of reinforcement (shortening of production times): This shall be achieved by struts that are pre-compressed by ring tensioning and ensure better utilized high-performance concrete.

tur und somit besseren Ausnutzung des Hochleistungsbetons erfolgen soll.

Angestrebt werden dazu kreisförmige, in Streben aufgelöste Schalenstrukturen, welche sich aus gleichen Teilsegmenten zusammensetzen. Anhand eines Demonstrators des Spiegelträgers im Originalmaßstab mit Ringvorspannung, möglicher Nachbearbeitung der Oberflächen und nachträglicher Verspiegelung, welche in ihrer Oberflächengenauigkeit vermessen wird, sollen die entwickelten Methodiken validiert werden.

In einem ersten Ansatz wurde die kreisförmige Schale – vereinfacht ohne Krümmung – als rotationssymmetrischer Kragarm mit hyperbolisch verjüngender Dicke mithilfe der Markus-Tafeln [4] modelliert. An diesem Ersatzsystem wurde eine Voroptimierung der Dicke auf analytischer Ebene durchgeführt. Diese beruht auf einer Begrenzung der Verformungen infolge Eigen- und Flächenlasten (Spiegel, Windlasten) basierend auf Genauigkeitsanforderungen der Oberflächenwelligkeit aktueller Systeme [5]. Die so ermittelte vollwandige Schale wurde dann über einen Ansatz äquivalenter Steifigkeiten in eine Strebenstruktur, welche sich aus acht gleichen Teilsegmenten zusammensetzt, überführt (Bild 1). Dieser erste Entwurf weist eine Stärke von effektiv ca. 3 cm im Mittel über die Fläche auf und bildet die Basis für Entwicklungen der Schalungstechnik einzelner Segmente. Zur Verbesserung der Oberflächengüte durch Schleifen wurden bereits Untersuchungen zum Einfluss mechanischer Abrasion auf die Festigkeit von Hochleistungsbetonproben durchgeführt. Es konnte durch den geringen Wärmeeintrag keine merkliche Reduktion der Festigkeit in 3-Punkt-Biegezugprüfungen festgestellt werden.

Weitere Entwicklungen betreffen Strukturoptimierungen auf Struktur-, Streben- und Detailebene, die Entwicklung einer geeigneten Vorspanntechnik, die Integration geometrischer Adaptivität in Entwurf und Herstellung und die Beachtung von materiellen und geometrischen Unschärfen zum robusten Strukturentwurf.

The aim is to achieve circular shell structures dissolved into struts, which are made up of the same partial segments. The developed methods are to be validated on the basis of a demonstrator of the mirror carrier in original scale with ring tensioning, possible post-processing of the concrete surface (e.g. by grinding) and subsequent mirroring, which is measured in its accuracy.

In an initial approach, the circular shell – simplified without curvature – was designed as a rotationally symmetric cantilever with hyperbolically tapered thickness using the Markus-Sheets [4]. Thereby, a first optimisation of the thickness was carried out on analytical level. To meet accuracy requirements concerning the surface waviness of current systems [5], the optimisation was restricted by limited deformations induced by self-weight and surface loads (mirrors and wind). Next, the solid shell structure was converted into a carrier structure from eight identical partial segments maintaining the stiffness (Fig. 1). This yields a first design with an effective thickness of approx. 3 cm on average (over the total surface area) which forms the starting point for the development of formwork technology of the single segments. To improve the surface quality by grinding, first investigations were already carried out. Especially the influence of mechanical abrasion on the strength of high-performance concrete samples was evaluated. Due to a quite low heat input, no significant reduction of the strength could be observed in 3-point flexural tensile tests.

Future developments include further structural optimization on structural, element and detail levels, the development of suitable tensioning techniques, an integration of geometric adaptivity in design and manufacture, and the consideration of material and geometrical uncertainties for a robust structural design.

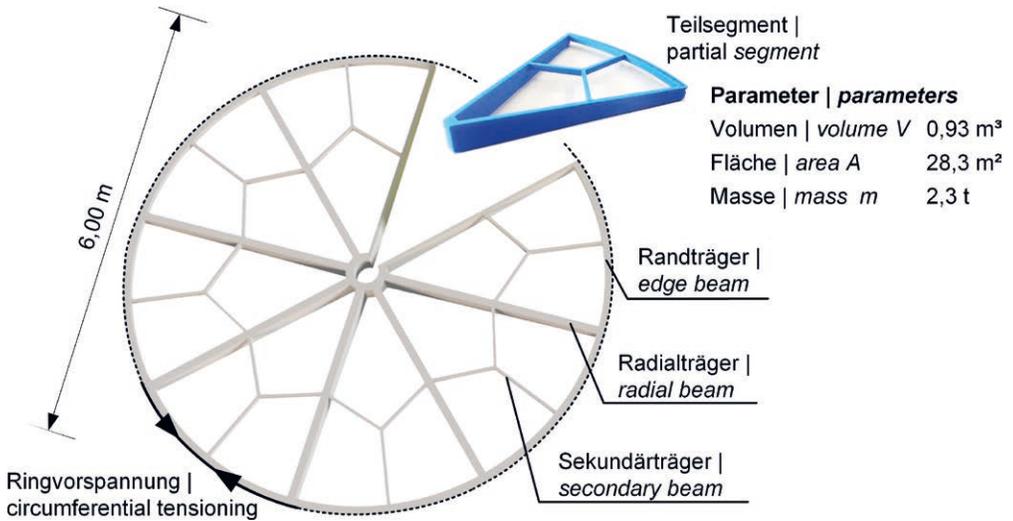


Bild 1: Vorentwurf einer rotationssymmetrischen Strebenstruktur aus acht Teilsegmenten („Tortenstücke“) mit 3D-gedrucktem Prototyp | **Fig. 1:** Conceptual design of a rotationally symmetrical beam structure consisting of eight segments („pie slices“) with prototype in 3D-printing | Graphic: Sebastian Penkert, Patrick Forman

Das Vorhaben wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und drei Hersteller bzw. Ausrüsterfirmen aktiv unterstützt.

The German Aerospace Center (DLR) and three manufacturers and suppliers are our research and industrial partners in the project.

Literatur | References

- [1] Forman, P.; Kämper, C.; Stallmann, T.; Schnell, J.; Mark, P.: Parabolschalen aus Hochleistungsbeton als Solarkollektoren. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 12, S. 851–861 – DOI: 10.1002/best.201600051
- [2] Kämper, Ch.; Forman, P.; Stallmann, T.; Ahrens, M. A.; Mark, P.; Schnell, J.: Optimised High-Performance Concrete Shells for Parabolic Trough Collectors. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures (J. IASS)* 58 (2017) 1, 191, S. 105–119
- [3] Pfahl, A.: Survey of Heliostat Concepts for Cost Reduction. *Journal of Solar Energy Engineering* 136 (2014) Febr., S. 14501-1–14501-9 – DOI: 10.1115/1.4024243
- [4] Markus, G.; Otto, J.: *Theorie und Berechnung rotationssymmetrischer Bauwerke*. 3. Aufl., Düsseldorf: Werner, 1978
- [5] Balz, M.; Göcke, V.; Keck, T.; von Reecken, F.; Weinrebe, G.; Wöhrbach, M.: Stellio – development, construction and testing of a smart heliostat. *AIP Conf. Proc.* 1734 (2016) 1, S. 020002-1–020002-8 [Proc. of 21st SolarPACES Conf. 2015, 13.–16.10.2015 in Kapstadt (Südafrika) – DOI: 10.1063/1.4949026]

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Adaptive Präzisionsstrukturen von Heliostaten aus Hochleistungsbeton für punktfokussierende Solarkraftwerke

Pinpoint accurate adaptive structures for heliostats made from high performance concrete for central tower power plants

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark
Adresse Address:	Ruhr-Universität Bochum (RUB), Lehrstuhl für Massivbau, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum
Kontakt Contact:	+49 234 32 22700 peter.mark@rub.de http://www.massivbau.rub.de/
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell
Adresse Address:	TU Kaiserslautern (TU KL), Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion, Paul-Ehrlich-Straße, Gebäude 14, 67663 Kaiserslautern
Kontakt Contact:	+49 631 205 2157 juergen.schnell@bauing.uni-kl.de http://www.bauing.uni-kl.de/massivbau/home/
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Projektnummer Project number: 389020360)
Förderzeitraum Funding period:	01.01.2018–30.06.2020
Team Team:	Patrick Forman (RUB) Sebastian Penkert (TU KL) Marius Schellen (TU KL)
Partner Partners:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Solarforschung, Punktfokussierende Systeme, Stuttgart Durcrete GmbH, Limbur Innogrations GmbH, Bernkastel-Kues Almecco GmbH, Bernburg

ANSCHLUSSPROJEKTE

Sandschalung zur Herstellung von dünnwandigen Sandwiches aus Carbonbeton | Sand formwork for the production of thin-walled sandwiches made from carbon concrete

- ▶ Oliver Gericke, Walter Haase, Werner Sobek
- ▶ Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart

Die im Teilprojekt Sobek (siehe S. 626 ff.) entwickelte gefrorene Sandschalung zur abfallfreien Herstellung von Betonbauteilen wurde im Rahmen des BMBF-geförderten Konsortiums *Carbon Concrete Composite – C³* für die Herstellung dünnwandiger und gekrümmter Sandwichelemente weiterentwickelt. Der vorliegende Kurzbericht fasst die Forschungsergebnisse des Projekts *C³Sandwich* zusammen. Eine ausführliche Beschreibung der Arbeiten wurde in [1] veröffentlicht.

Die untersuchten Sandwiches bestanden aus einem dämmenden Kern sowie aus zwei äußeren Deckschichten, die durch eine Carbon-Formbewehrung schubfest miteinander verbunden waren. Für den Herstellungsprozess mittels gefrorener Sandschalung ergaben sich folgende technische Herausforderungen:

- Einbeziehung von Schubverbundmitteln aus Carbon in den Herstellungsprozess,
- Einbeziehung von plattenförmiger Dämmung in den Herstellungsprozess von einfach gekrümmten Sandwiches,
- Erzeugung von Kavitäten im Kern doppelt gekrümmter Sandwiches.

Durch Weiterentwicklungen der Methode der gefrorenen Sandschalung wurde die Herstellung zweier Sandwichtypologien möglich: ein einfach gekrümmtes Sandwich mit innenliegender Dämmung und stabförmigen Schubverbundmitteln (Bild 1, links) sowie ein doppelt gekrümmtes Sandwich mit halbkugelförmigen Schubverbundmitteln mit leerer Kernschicht (Bild 1, rechts).

Within the framework of the BMBF-funded consortium *Carbon Concrete Composite – C³*, the research on sand formwork for the waste-free production of concrete components (TP Sobek, p. 626 seq.) was further advanced towards the production of thin-walled and curved sandwich elements. This report summarizes the research results of the project *C³Sandwich*. A detailed description of the work was published in [1].

The investigated sandwiches consisted of an insulating core and two outer cover layers. A shear bond between the two layers was ensured by means of carbon reinforcement. The following technical challenges arose for the production process using frozen sand formwork:

- Incorporation of shear-reinforcement made from carbon into the manufacturing process,
- Inclusion of insulation plates in the production process of single-curved sandwiches,
- Creation of cavities in the core of double-curved sandwiches.

Further development of the frozen sand formwork method made it possible to produce two types of sandwich: a single-curved sandwich with internal insulation and rod-shaped shear reinforcement (Fig. 1, left) and a double-curved sandwich with hemispherical shear reinforcement with an empty core layer (Fig. 1, right).

For the single-curved sandwich, an internal insulation (four sheets of Evonik CALOSTAT®, each 20 mm thick, [2]) together with a carbon shear reinforcement (solidian GRID as C-profile, [3]) was first brought into the single-curved form

Für das einfach gekrümmte Sandwich wurde zunächst eine innenliegende Dämmung (vier Platten Evonik CALOSTAT®, jeweils 20 mm stark, [2]) zusammen mit einer Carbon-Schubbewehrung (solidian GRID in C-Profilierung, [3]) in eine einfach gekrümmte Form gebracht und mittig zwischen zwei hergestellten Sandschalungen fixiert. Die beiden Deckschichten mit einer Dicke von jeweils 10 mm wurden dann gleichzeitig betoniert.

Das doppelt gekrümmte Sandwich wurde in zwei Schritten hergestellt (Bild 2): Zunächst wurde die Schalung für die erste Deckschicht hergestellt, in der die halbkugelförmigen Schubverbundmittel eingesetzt und fixiert wurden. Dann wurde die erste Deckschicht mit einer Dicke von 20 mm betoniert. Im zweiten Schritt wurde eine Schicht nasser Sand an der Deckschicht aufgebracht und eingefroren. Zusätzlich zu dieser innenliegenden Schalung wurde die äußere Schalung der zweiten Deckschicht mittels Fräsen hergestellt. Abschließend wurde die zweite Deckschicht mit einer Dicke von 20 mm betoniert.

Die Ergebnisse zeigten, dass die im SPP 1542 entwickelte Sandschalung zur präzisen Herstellung dünnwandiger Strukturen mit eingebetteter Bewehrung und Dämmung sowie mit inneren Kavitäten eingesetzt werden kann. Mit den Weiterentwicklungen der Methode konnten sämtliche Bauteile weiterhin abfallfrei hergestellt werden.

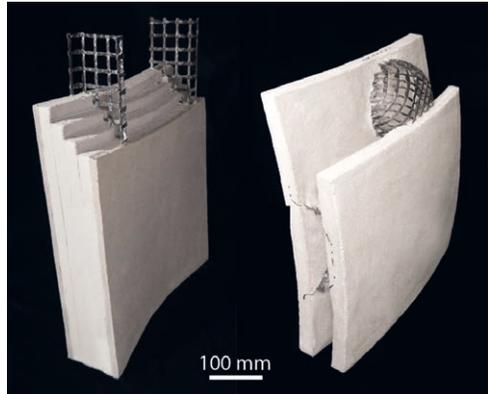


Bild 1: Einfach gekrümmtes Sandwich mit innenliegender Dämmung und stabförmiger Schubbewehrung mit C-Profil (links) und doppelt gekrümmtes Sandwich mit halbkugelförmiger Schubbewehrung (rechts) | **Fig. 1:** Single-curved sandwich with internal insulation and bar-shaped shear reinforcement in C-profile (on the left) and doubly-curved sandwich with hemispherical shear reinforcement (right side) | Source: Gabriela Metzger, Oliver Gericke, [1]

and fixed in the middle between two sand formworks. The two cover layers, each 10 mm thick, were then cast simultaneously.

The doubly-curved sandwich was produced in two steps (Fig. 2): First the formwork for the first cover-layer was produced, in which the hemispherical shear connectors were inserted and fixed. Then the first cover-layer was cast with a 20 mm thickness. In the second step, a layer of wet sand was applied to the top layer and frozen. In addition to this inner formwork, the outer formwork of the second surface course was produced by means of milling. Finally, the second cover-layer with a thickness of 20 mm was cast.

The results showed that the sand formwork developed in SPP 1542 can be used for the precise production of thin-walled structures with embedded reinforcement and insulation as well as with internal cavities. With the further development of the method, all components could still be produced without waste.

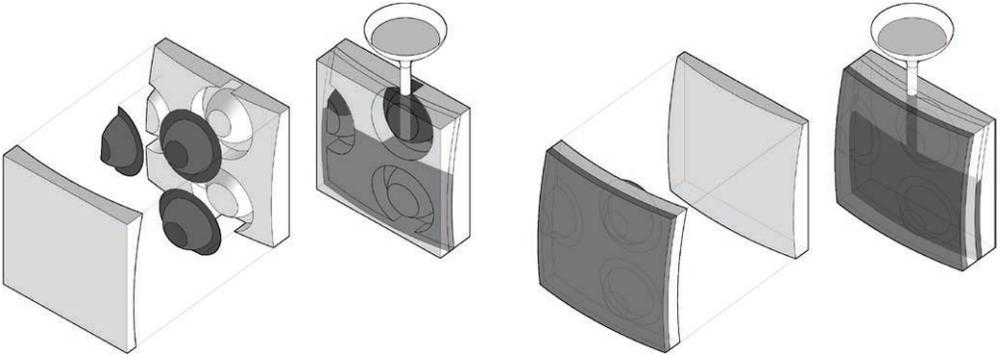


Bild 2: Erweitertes Verfahren zur Herstellung doppelt gekrümmter Sandwiches mit Halbkugel-Schubbewehrung; v. l. n. r.: Herstellung der Schalung und Einbettung der Schubbewehrung; Betonieren der ersten Schicht; Herstellung der Schalung für die zweite Schicht; Betonieren der zweiten Schicht | **Fig. 2:** Extended process for the production of doubly-curved sandwiches with hemispherical shear reinforcement; from left to right: production of the formwork and embedding of the shear reinforcement; casting of the first layer; production of the formwork for the second layer; casting of the second layer | Graphic: Oliver Gericke, [1]

Literatur | References

- [1] Gericke, O.; Haase, W.; Sobek, W.: Production of Curved Concrete Sandwich Panels Using a Frozen Sand Formwork. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9660, Book of Abstracts: S. 180, Langfassung auf USB-Stick, 9 S.
- [2] Evonik Industries AG: CALOSTAT(R) – Technische Informationen 1404. (abgerufen 11/2016)
- [3] solidian GmbH: Data Sheet: Carbon Bewehrung GRID Q142/142-CCE-25. (abgerufen 11/2016) – https://www.solidian.com/fileadmin/user_upload/pdf/TDS/solidian_GRID_Q142.142-CCE-38.pdf

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

C³-Basisvorhaben B4, Teilprojekt C³Sandwich: Hochgedämmte Sandwichfassade, Entwicklung dünn-schaliger hochgedämmter Fassadenelemente – Schalungstechnologie und Befestigungstechnik

C³ Basic research project B4, subproject C³Sandwich: highly insulated sandwich facade, development of thin-walled highly insulated facade elements – formwork technology and joining technology

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Pfaffenwaldring 7+14, 70569 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685 6 6226/6 3599 werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de http://www.uni-stuttgart.de/ilek/
Förderer Funding:	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF; FKZ 03ZZ0305Q)
Förderzeitraum Funding period:	01.07.2015–31.12.2016
Team Team:	Oliver Gericke Walter Haase
Partner Partners:	Dr. Mirtsch Wölbstrukturierung GmbH, Berlin Architektur-Institut, HTWK Leipzig Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen University solidian GmbH, Albstadt

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Hülsmeier, F. (Hrsg.): C³-Basisvorhaben B4 – Multifunktionale Bauteile aus Carbonbeton. Ergebnisbroschüre, Leipzig: Architektur-Institut Leipzig, 2016, S. 12–15 – online: https://woelbstruktur.de/info/c3b4_ergebnisbroschuere_web.pdf
- Gericke, O.; Haase, W.; Sobek, W.: Production of Curved Concrete Sandwich Panels Using a Frozen Sand Formwork. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 9660, Book of Abstracts: S. 180, Langfassung auf USB-Stick, 9 S.

ANSCHLUSSPROJEKTE

Herstellung von biomimetischen und biologisch inspirierten (modularen) Strukturen | Fabrication of biomimetic and biologically inspired (modular) structures

- ▶ Daria Kovaleva, Oliver Gericke, Werner Sobek
- ▶ Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart

Die Potentiale der gefrorenen Sandschalung für den Entwurf und die Herstellung funktional gradierter Betonbauteile (siehe Projekte Sobek et al. und Garrecht et al. des SPP 1542, S. 642 ff. und S. 250 ff.) wurden im Rahmen des Teilprojekts B04: *Herstellung biomimetischer und biologisch inspirierter (modularer) Strukturen für die Bauindustrie* des Sonderforschungsbereichs/Transregio 141 *Biologischer Entwurf und integrative Strukturen – Analyse, Simulation und Umsetzung in der Architektur* weiter untersucht.

Die Hauptaufgabe in diesem Projekt bestand darin, die Prinzipien der strukturellen Organisation von biologischen, tragenden Strukturen zu untersuchen und auf die Eigenschaften von funktional gradierten Betonstrukturen zu übertragen. Gewöhnlich weisen solche porösen oder faserigen Gewebe charakteristische Strukturen variabler Dichte auf, die entlang der Belastungstrajektorien häufig vorherrschender Lastszenarien orientiert sind. Diese Prinzipien wurden abstrahiert und mit Hilfe der Sandschalung in Form poröser Betonbauteile nachgebildet. Hierfür wurde zunächst die Betonstruktur als räumliches Strebenmodell mit variabler Strebendicke modelliert, um den erforderlichen Volumenanteil pro Flächeneinheit zu erreichen. Die Schalungsstruktur stellte somit ein topologisch identisches, aber inverses Modell dar, bei dem die Strebendicken der Sandstruktur umgekehrt proportional zu der Dicke der Betonstreben sind (Bild 1).

Für die Herstellung der Schalungen wurde das *Hydroplotting*-Verfahren verwendet, bei dem Wasser in trockenen Sand entlang definierter

Potentials of frozen sand formwork technology were further investigated in design and production of functionally graded concrete components (see also the projects Sobek et al. and Garrecht et al. of SPP 1542, pages 642 resp. 250 et seq.) in the subproject B04: *Fabrication of biomimetic and biologically inspired (modular) structures for use in the construction industry* in the framework of the Collaborative Research Centre/Transregio 141 *Biological Design and Integrative Structures – Analysis, Simulation and Implementation in Architecture*.

The main task in this project was to study the principles of structural organization of biological load-bearing tissues and their transfer to the properties of concrete structures adapted to loading profile, i.e. functionally graded. Usually such porous or fibrous tissues exhibit characteristic structures of variable density oriented along the stress trajectories under the given load. Such principles were abstracted and reproduced in spatial porous concrete components, produced with sand formwork methods. For this, at first, a concrete structure was modelled as a spatial strut model with variable struts thickness to achieve the needed volume fraction per unit area. The formwork structure thus represented topologically identical but inverse model with the strut thicknesses inversely proportional to the concrete one (Fig. 1).

The *hydroplotting* production method was used to produce such formworks, by injecting the water into the volume of dry sand along the trajectories representing the centreline of the strut with subsequent curing of formwork. The variation of strut diameter was achieved by adjusting

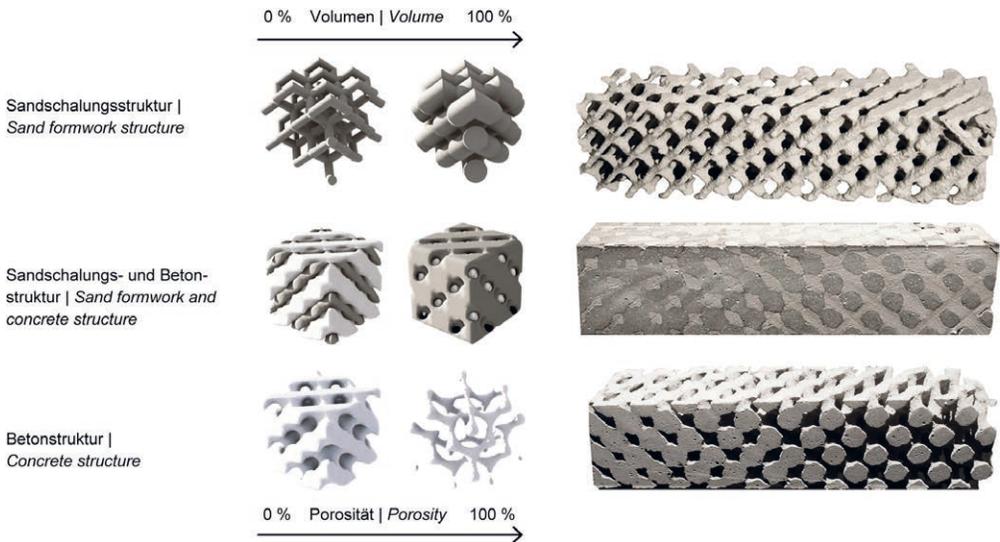


Bild 1: Modellierung von räumlichen Rahmenkonstruktionen aus Sand (Schalung) und Beton und produzierte Proben aus Sand (Schalung) und Beton | **Fig. 1:** Modelling of sand (formwork) and concrete spatial frame structures and produced sand (formwork) and concrete graded specimens | Source: Daria Kovaleva

Trajektorien injiziert wird. Die feuchten Bereiche härten aus und bilden die Streben. Die Variation des Strebendurchmessers wurde durch die Anpassung der Produktionsparameter, wie z. B. die Geschwindigkeit der Nadelbewegung und des Wasserflusses, erreicht.

Um die Anwendbarkeit der Methode für tragende Betonbauteile zu untersuchen, wurde sie an der Herstellung eines Einfeldträgers aus Beton getestet. Der Prozess der Modellierung und Herstellung eines solchen Balkens ist in Bild 2 dargestellt.

Zunächst wurden eine Strukturanalyse des Bauteils unter gegebenen Stütz- und Lastbedingungen durchgeführt und daran die Größen und die Richtungen der vorherrschenden Hauptspannungen bestimmt. Diese Informationen wurden extrahiert und zur Modellierung des räumlichen Strebenmodells verwendet, wobei die Strebe entlang der Richtung der Spannungen ausgerichtet und ihre Dicken proportional zur Größe der Spannungen eingestellt wurden. Dann wurde eine inverse Schalungsstruktur modelliert und hergestellt. Dem folgte, wie oben beschrieben, das Betonieren und schluss-

production parameters, such as speed of needle movement and the water flow.

To explore the applicability of the method for concrete load-bearing components, it was tested on the production of a single-span concrete beam. The process of modelling and fabrication of such a beam is presented in Fig. 2.

First, the structural analysis of the component under given support and loading conditions was performed to determine the magnitudes and directions of principal stresses. These information were extracted and used to model a spatial strut model, where the struts were oriented along the direction of the stresses and their thicknesses were setup proportional to the magnitude of stresses. Then, an inverse formwork structure was created, modelled and produced, as described above, by concreting and regaining the sand for further production cycles.

The research results have shown that water-soluble sand formwork technique have great potential for creating spatial structures of high complexity when other systems can no longer be applied. At the same time, production character-

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

B04: Herstellung biomimetischer und biologisch inspirierter (modularer) Strukturen für die Bauindustrie

B04: Fabrication of biomimetic and biologically inspired (modular) structures for use in the construction industry

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Pfaffenwaldring 7+14, 70569 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685-6 6226/-6 3599 werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de http://www.uni-stuttgart.de/ilek/
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 141
Förderzeitraum Funding period:	01.10.2014–31.06.2018
Team Team:	Daria Kovaleva Oliver Gericke Walter Haase
Partner Partners:	Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF), Universität Stuttgart

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Coupek, D.; Kovaleva, D.; Christof, H.; Wurst, K.-H.; Verl, A.; Sobek, W.; Haase, W.; Gresser, G. T.; Lechler, A.: Fabrication of Biomimetic and Biologically Inspired (Modular) Structures for Use in the Construction Industry. In: Knippers, J.; Nickel, K. G.; Speck, T. (Hrsg.): Biomimetic Research for Architecture and Building Construction, Cham: Springer Int. Publ., 2016, S. 319–339 – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-46374-2_16
- Kovaleva, D.; Gericke, O.; Wulle, F.; Mindermann, P.; Sobek, W.; Verl, A.; Gresser, G. T.: Rosenstein Pavilion: a lightweight concrete shell based on principles of biological structures. In: Knippers, J.; Schmid, U.; Speck, T. (Hrsg.): Biomimetics for Architecture, Berlin, Boston: De Gruyter, 2019, S. 92–101 – DOI: <https://doi.org/10.1515/9783035617917-012>
- Wulle, F.; Kovaleva, D.; Mindermann, P.; Christof, H.; Wurst, K.-H.; Lechler, A.; Verl, A.; Sobek, W.; Haase, W.; Gresser, G. T.: Nature As Source Of Ideas For Modern Manufacturing Methods. In: Knippers, J.; Schmid, U.; Speck, T. (Hrsg.): Biomimetics for Architecture, Berlin, Boston: De Gruyter, 2019, S. 84–91 – DOI: <https://doi.org/10.1515/9783035617917-011>

ANSCHLUSSPROJEKTE

Integrale Planung und Herstellung von ressourceneffizienten Betonbauteilen aus mineralischer Faserverbundbewehrung und gradiertem Beton | Design and production of resource-efficient concrete components made of mineral fibre composite reinforcement and graded concrete

- ▶ David Nigl¹, Daniel Schmeer¹, Walter Haase¹, Benjamin Schönemann², Katrin Lenz³, Steffen Steier³, Oliver Sawodny², Philip Leistner³, Lucio Blandini¹, Werner Sobek¹
- ▶ ¹ Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart
- ▶ ² Institut für Systemdynamik (ISYS), Universität Stuttgart
- ▶ ³ Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart

Das Ziel des vorliegenden Projektes war es, eine sortenreine und gewichtsoptimierte Betonbauweise unter Einsatz mineralischer und lastpfadgerechter Faserverbundbewehrungen zur vorwettbewerblichen Anwendung weiterzuentwickeln, um damit neue Geschäftsfelder für KMU im Bereich des Bauwesens zu eröffnen sowie längerfristig den Technologiestandort Baden-Württemberg zu stärken. Dabei knüpft das Projekt nahtlos an die Arbeiten aus dem SPP 1542 – *Leicht bauen mit Beton* – an. Der vorliegende Kurzbericht fasst die Forschungsergebnisse zusammen. Für eine ausführlichere Beschreibung der Arbeiten sowie die Darstellung der Ausgangslage wird auf [1] sowie auf die Homepage [2] verwiesen.

Der Erreichung des Projektziels widmete sich ein interdisziplinäres Forschungskonsortium, bestehend aus dem Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), dem Institut für Systemdynamik (ISYS), beide von der Universität Stuttgart, sowie dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP). In diesem Rahmen befasste sich das ILEK mit der Weiterentwicklung bestehender Entwurfs- und Berechnungsmethoden von Bauteilen aus Gradientenbeton. In enger Zusammenarbeit von ISYS und ILEK wur-

The objective of the current project is to further develop a weight-optimised concrete construction method using mineral and load-path compatible fibre-composite reinforcements for pre-commercial applications. The outcome of the project could open new business opportunities for small- and mid-size enterprises in the construction sector and, in the longer term, strengthen Baden-Württemberg as a technology hub. The project seamlessly ties in with the previous work from SPP 1542, the results of which are summarised in this short report. For a more detailed description of the work readers are referred to [1] as well as to the homepage [2].

The project involves an interdisciplinary research consortium consisting of the Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK) and the Institute for System Dynamics (ISYS), both at the University of Stuttgart, as well as the Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP). Within this framework, ILEK dealt with the further development of existing design and calculation methods of graded concrete components. Through close cooperation between ISYS and ILEK, an automated production method of mesograded components was developed and implemented. IBP contributed to the ecological

de ein Konzept für die automatisierte Herstellung von mesogradierten Bauteilen entwickelt und umgesetzt. Das IBP übernahm die Aufgabe der prozessbegleitenden Kosten- sowie ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung der im Projekt entwickelten Prozesse und Materialien.

Bei der Herstellung von mesogradierten Betonbauteilen erfolgt zunächst das Verlegen der unteren Bewehrungslage in die Schalung. Anschließend werden Hohlkugeln aus Beton nach dem Vorbild einer kubisch primitiven Packung in der Schalung platziert und die obere Bewehrungslage eingebracht. Nach dem Einbau von Bewehrung und Hohlkörpern beginnt ein am ILEK entwickelter, schichtweiser Gießprozess. Für den schichtweisen Gießprozess wird ein sehr fließfähiger und selbstverdichtender Beton mit einem geringen Größtkorn erforderlich, um die Zwischenräume der Hohlkugeln vollständig auszufüllen. Das Einbringen des Betons setzt einen zeitlich geregelten Prozess voraus, damit die Lage- und Auftriebssicherheit der Hohlkörper gewährleistet sind und ein vollständiger Schichtverbund sichergestellt wird. Von entscheidender Bedeutung ist der Haftverbund zwischen Hohlkugel und Betonschicht, wobei die Haftkraft größer sein muss als die Auftriebskraft der Kugel [3].

Die Bewehrung wird, mit wenigen Ausnahmen bei der Herstellung von Betonfertigteilen, sowohl in der Baupraxis als auch beim Herstellungsverfahren gradierteter Betonbauteile immer noch händisch im Bauteil verlegt. Um diesen Prozess weitestgehend zu automatisieren, wur-

and economic assessments of the processes and materials developed in the project.

During the production of mesograded concrete components, the process starts with the placement of the lower reinforcement layer in the formwork. Then, hollow concrete spheres are placed in the formwork based on a cubic packing, followed by the placement of the upper reinforcement layer. Afterwards, a layer-by-layer casting process starts, which was developed at ILEK. For the layered casting process, a highly-flowable and self-compacting concrete (SCC) with a small grain size is required to fill the spaces between the hollow spheres. The pouring of the concrete is time-controlled to prevent the buoyancy of the hollow spheres from changing their positions, as well as to ensure sufficient layer bonding. The bond between the hollow sphere and the concrete layer is of high importance, whereby the adhesive force must be greater than the buoyancy force of the sphere [3].

With few exceptions, the reinforcement is typically laid manually both in conventional construction and in the production process of graded concrete components. In order to automate this process as far as possible, an experimental gripping system was designed and implemented by ISYS. Employing this system, tasks such as gripping and placing of hollow spheres and reinforcement bars were successfully performed (Fig. 1).

The automation of the layered casting process in the production of mesograded components

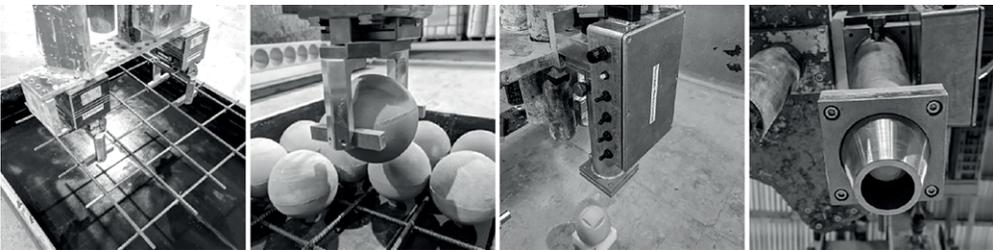


Bild 1: Validierung der Handhabungsaufgaben; von links nach rechts: Greifen eines Bewehrungssystems aus Stahlstäben, Ablage eines Hohlkörpers, Prototyp der Extrusionseinheit in zwei Ansichten | **Fig. 1:** Validation of the handling tasks; from left to right: gripping of steel reinforcement bars, placing of a hollow body, prototype of the extrusion unit shown in two views | Source: ISYS

de vom ISYS ein prototypisches Greifersystem konzipiert und am Versuchsstand integriert. Die Handhabungsaufgaben wie das Greifen und Platzieren von Hohlkörpern oder von Bewehrungskomponenten wurden erfolgreich im Betrieb validiert (Bild 1).

Die Umsetzung des schichtweisen Gießverfahrens in der Fertigung von mesogradierten Bauteilen sollte ebenfalls weitestgehend automatisiert erfolgen. Dies bedurfte einer Weiterentwicklung der vorhandenen Anlagentechnik. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die positionsgenaue Materialdosierung. Zu diesem Zweck wurde gemeinsam von ILEK und ISYS eine Extrusionseinheit für den zielgerichteten Materialaustrag in die Zwischenräume der Hohlkörper konzipiert und als Prototyp umgesetzt (Bild 1).

Im Rahmen des Projektes wurden am ILEK skalierte Musterbauteile entworfen, hergestellt und geprüft. Die Bewehrung wurde dabei auf der Materialebene und auf der Ebene des Entwurfs der Bewehrungsführung optimiert. Hinsichtlich der Materialität fokussierten sich die Untersuchungen auf den Einsatz einer Stahl- als auch Basaltfaserverbundbewehrung. Zum jetzigen Stand der Forschung kann festgehalten werden, dass die gleiche Basaltmasse wie Stahlmasse zur Bewehrung des Bauteils erforderlich wird.

Seitens des ILEK erfolgte eine weitere Studie zur Reduktion der Bewehrungsmenge, durch eine beanspruchungsgerechte Bewehrungsverteilung im Bauteil. Abweichend von der konventionellen Bewehrungsführung nach Fachwerka-

is also being pursued, which requires further development of the existing technology to allow accurate dosing of the concrete. For this purpose, ILEK and ISYS jointly designed an extrusion unit to discharge material into the spaces between the hollow spheres. The prototype of the extrusion unit is shown in Fig. 1.

Small-scale concrete components were designed, fabricated and tested at ILEK to validate design and calculation methods. The reinforcement material and layout have been optimised for these components. In terms of materiality, investigations were focused on the use of steel and basalt-mineral fibre composite reinforcements. Results so far have shown that a 1 : 1 ratio of basalt and steel mass is required for the reinforcement of the components.

ILEK developed new reinforcement designs which are not based on conventional truss analogy. One design method is based on topology-optimisation (Fig. 2) and allows up to 10% mass savings with respect to conventional methods.

In order to quantify the material savings, full-scale concrete components were designed. A single-span floor slab with a length of 7.20 m and a width of 2.40 m served as an example. The reference flat slab (M) has a thickness of 28 cm and thus a concrete volume of 4.84 m³, with reinforcement steel requirements of 22 kg/m². On the other hand, a mesograded slab (G) with equivalent performance has a thickness of 26 cm, a concrete volume of 2.88 m³ and steel require-

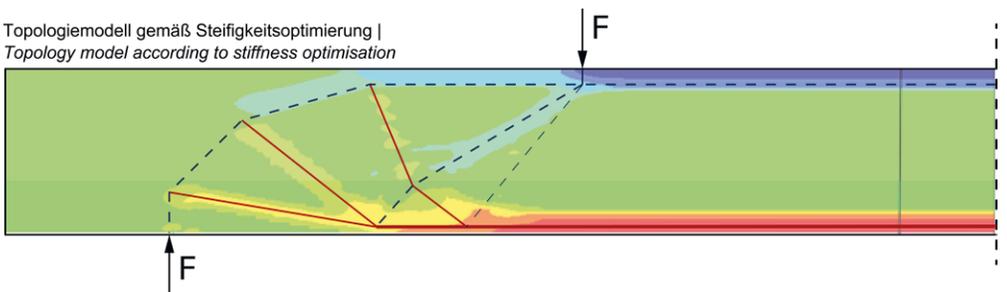


Bild 2: Bewehrungsführung in Analogie zu einem Topologiemodell | Fig. 2: Reinforcement layout in analogy to a topology model | Source: ILEK

analogie können durch die Berücksichtigung von z. B. Topolgiemodellen (Bild 2) bis zu 10 % Masse eingespart werden.

Nach der experimentellen Bestätigung der Berechnungsmethoden erfolgte die Auslegung von Bauteilen im Realmaßstab, um deren Einsparpotentiale zu beziffern. Als Beispiel diene eine einachsig spannende Geschossdecke von 7,20 m Länge und 2,40 m Breite. Das massive Referenzbauteil (M) hat eine Höhe von 28 cm und folglich ein Betonvolumen von 4,84 m³, bei einer erforderlichen Bewehrungsmenge von 22 kg/m². Die gradierte Variante (G) weist bei gleicher Leistungsfähigkeit dagegen eine Deckenhöhe von 26 cm, bei einem Betonverbrauch von 2,88 m³ und einen Stahlverbrauch von 15,5 kg/m² auf. Die Einsparung an Bewehrungsstahl beträgt damit 30 % und der Betonverbrauch kann um 40 % reduziert werden.

Seitens des IBP erfolgte eine ökologische und ökonomische Analyse der o. g. Bauteile. Die ökologische Bewertung der Materialinputs ist in Bild 3 veranschaulicht und verdeutlicht das ökologische Potential der Masseneinsparung durch die Mesogradierung. Zum finalen Projektstand können bei der materiellen Zusammensetzung der Bauteile bis zu 43 % der Treibhausgase durch den Einsatz mineralischer Hohlkugeln vermieden werden. Die ökonomische Bewertung zeigt, dass durch die Massenreduktion ebenfalls eine Reduktion der Material- und Energiekosten von über 25 % zu erreichen ist.

ments of 15.5 kg/m². Thus, up to 30% and 40% savings of reinforcement and concrete are achieved, respectively.

IBP conducted an ecological and economic analysis of the aforementioned concrete components. The ecological evaluation of the material requirements is illustrated in Fig. 3. Up to 43% of the greenhouse gases reductions can be achieved by embedding concrete hollow spheres in the components. Furthermore, the economic evaluation indicates that more than 25% of material and energy cost reductions can be achieved from mass savings.

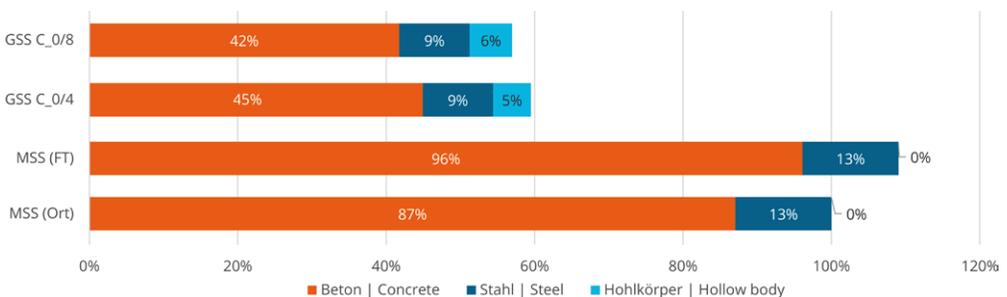


Bild 3: Treibhauspotential der Materialinputs für die mesogradierten Musterbauteile in Abhängigkeit der Betonrezeptur (GSS C_0/8 und GSS C_0/4) gegenüber dem Referenzbauteil aus Ort- bzw. Fertigteilbeton (MSS (Ort) und MSS (FT)) | **Fig. 3:** Global warming potential of the material inputs for the mesograded components depending on the concrete mixture (GSS C_0/8 and GSS C_0/4) compared to the reference components made of in-situ or precast concrete (MSS (Ort) and MSS (FT)) | Source: IBP

Literatur | References

- [1] Schmeer, D.; Schönemann, B.; Lenz, K.; Steier, S.; Haase, W.; Blandini, L.; Sobek, W.; Sawodny, O.; Leistner, P.: *Integrale Planung und Herstellung von ressourceneffizienten Betonbauteilen aus mineralischer Faserverbundbewehrung und gradiertem Beton. Kurzbericht zum Abschlussbericht, Stuttgart, 2021*
- [2] Homepage des Projekts: <https://ressourceneffizienz-und-klimaneutralitaet.de/wissenspool/ressourceneffizienz-durch-funktionale-gradierung-von-betonbauteilen/> (geprüft am | accessed on 10.01.2022)
- [3] Schmeer, D.: *Mesogradierung von Betonbauteilen – Herstellung und Tragverhalten von Betonbauteilen mit integrierten mineralischen Hohlkugeln. Diss., Universität Stuttgart, 2021*

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Integrale Planung und Herstellung von ressourceneffizienten Betonbauteilen aus mineralischer Faserverbundbewehrung und gradiertem Beton | Design and production of resource-efficient concrete components made of mineral fibre composite reinforcement and graded concrete

Antragsteller 1 Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Pfaffenwaldring 7+14, 70569 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685 61760 werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de http://www.uni-stuttgart.de/ilek/
Antragsteller 2 Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny
Adresse Address:	Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik, Waldburgstraße 17+19, 70563 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 685 66302 oliver.sawodny@isys.uni-stuttgart.de https://www.isys.uni-stuttgart.de/
Antragsteller 3 Applicant 3:	Prof. Dr. Philip Leistner
Adresse Address:	Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Kontakt Contact:	+49 711 970 3346 philip.leistner@ibp.fraunhofer.de https://www.ibp.fraunhofer.de/
Förderer Funding:	Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (3-4332.62-ILEK/1)
Förderzeitraum Period:	06.12.2018–31.03.2021
Team Team:	Daniel Schmeer (ILEK) Benjamin Schönemann (ISYS) Katrin Lenz (IBP) Steffen Steier (IBP) Walter Haase (ILEK)
Partner Partners:	HeidelbergCement AG, Leimen Liebherr Mischtechnik GmbH, Bad Schussenried C-Con GmbH, Sindelfingen Fachverband Beton- und Fertigteilwerke Baden-Württemberg e. V. , Ostfildern Werner Sobek AG, Stuttgart MEVA Schalungs-Systeme GmbH, Haiterbach Sika Deutschland GmbH, Leimen Peter Gross Bau Holding GmbH, St. Ingbert AFBW – Allianz Faserbasierter Werkstoffe Baden-Württemberg, Stuttgart
Homepage Website:	https://ressourceneffizienz-und-klimaneutralitaet.de/

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Yabg, Y.; Belangé, L.; Gericke, O.; Schmeer, D.; Zhang, L.; Sobek, W. und Schwieger, V.: Monitoring of the production Process of Graded Concrete Component using Terrestrial Laser Scanning. Remote Sensing 13 (2021) 9, 1622 – <https://doi.org/10.3390/rs13091622>
- Schuler, B.; Sawodny, O.: Spray Pattern Analysis Using Wet-Mix Concrete for Model Based Process Control towards Automated Construction. In: Proc. of 2019 IEEE 15th Int. Conf. on Automation Science and Engineering (CASE), 22.–26.08.2019 in Vancouver (Kanada), IEEE, 2019, S. 661–666 – DOI: 10.1109/COASE.2019.8842853

Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Schmeer, D.: Mesogradierung von Betonbauteilen – Herstellung und Tragverhalten von Betonbauteilen mit integrierten mineralischen Hohlkugeln. Diss., Universität Stuttgart, 2021

Teil 3 | Part 3



Koordination | Coordination

Koordination des SPP 1542 | Coordination of SPP 1542

- ▶ Silke Scheerer, Manfred Curbach
- ▶ Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden

Auszüge dieses Berichts wurden bereits in [1] veröffentlicht. | Parts of this report have already been published in [1].

1 Intention und Beginn

Leicht Bauen mit Beton – was zuerst wie ein Paradoxon erscheint, ist der Titel des DFG-Schwerpunktprogramms (SPP) 1542 [2]. Das SPP wurde über zwei Förderperioden finanziert. Aufgrund zahlreicher Projektverlängerungen – der letzte mit Mitteln des SPP finanzierte Demonstrator wurde im Sommer 2021 fertiggestellt – erfolgte der Projektabschluss nun erst im März 2022.

Den Anstoß zu dem Schwerpunktprogramm gab Manfred Curbach im Frühjahr 2009. In einer ersten E-Mail an eine kleine Gruppe von Wissenschaftler:innen aus den Fachgebieten Massivbau, Entwerfen, Geometrie und Bionik, die für die Mitwirkung am Initiativantrag gewonnen werden konnten (Bild 1), heißt es: „Ein Samenkorn sollte es sein, das ich mit einer ersten Version des SPP-Antrages einpflanzen sollte. Hiermit vertraue ich Euch dieses an und bitte Euch, es reichlich zu gießen und zu pflegen.“ Der Antrag wurde im November 2009 bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingereicht. Nachdem überaus positive Gutachten eingegangen waren, beschloss die DFG im Frühjahr 2010 die Einrichtung des Schwerpunktprogramms 1542 „Leicht Bauen mit Beton – Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien“. Die Ausschreibung erfolgte im Sommer des gleichen Jahres; offizieller Beginn des SPP 1542 war der 01.07.2011.

1 Intention and beginning

Lightweight construction with concrete (in short: Concrete light) – what at first seems like a paradox is the title of the DFG Priority Programme (SPP) 1542 [2]. The SPP was funded over two grant periods. Due to numerous project extensions – the last SPP demonstrator was completed in summer 2021 – the project will now end in March 2022.

The impulse for the priority programme was given by Manfred Curbach in spring 2009. In a first e-mail to a small group of scientists from the fields of solid construction, design, geometry and bionics, who could be convinced to participate in the initiative proposal (Fig. 1), he wrote: “It should be a seed that I shall plant with a first version of the SPP proposal. I hereby entrust this to you and ask you to water and nurture it abundantly.” The proposal was submitted to the Deutsche Forschungsgemeinschaft (German Research Foundation, DFG) in November 2009. After receiving extremely positive reviews, the DFG decided in spring 2010 to launch the Priority Programme 1542 “Concrete light – foundations for building the future with bionic and mathematical design principles”. The call for proposals was issued in the summer of the same year; the official start of SPP 1542 was 01.07.2011.

Auszug aus dem Einrichtungsantrag zum Anliegen des SPP 1542:

Ein Kernpunkt des SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton – Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien“ wird die bauteilspezifische Grundlagenforschung sein. Dabei soll die Gesamtheit der möglichen baubaren Strukturen in Schalentragwerke, ebene bzw. schwach gekrümmte Platten und Scheiben, stabförmige Tragelemente und fraktale Strukturen eingeteilt werden. Das Entwerfen von Kraftfeldern bzw. Kräftesystemen bildet die Grundlage idealerweise gewichtsminimaler Betonbauten. Anhaltspunkte für effiziente Tragstrukturen finden wir mit Hilfe der Bionik in der Natur.

Die Frage der Herstellung muss bei jedem Bauteil bedacht werden. Die Entwicklung von Schalungssystemen und Bautechnologien für frei geformte Betonbauteile ist deshalb ein weiterer Forschungsschwerpunkt. Im Hinblick auf Rückbau und Wiederverwendbarkeit (von Teilen) von Betonkonstruktionen sind außerdem entsprechende Fügeverfahren für Betonbauteile von Interesse. Die angestrebten, deutlich dünneren Strukturen mit stark veränderlichem Querschnitt sind zunehmend stabilitätsgefährdet und schwingungsempfindlich. Deshalb sollen geeignete Berechnungsverfahren für dynamisch kritische und stabilitätsgefährdete Strukturen entwickelt werden, die die einzelnen Bauteile, das gesamte Bauwerk und die Aussteifungsmechanismen betreffen.

Die Modellierung technisch-naturwissenschaftlicher Aufgaben ist ein Grundanliegen des SPP und damit das Hauptziel anwendungsorientierter mathematischer Forschung. Die Formensprache für den Betonleichtbau muss entwickelt und beschreibbar gemacht, Kräfteverläufe müssen analysiert und mathematisch definiert werden. Auch bei der Konzipierung flexibler Schalungsmodule ist die Differentialgeometrie ein hochaktuelles und wichtiges Forschungsgebiet.

Excerpt from the initiative proposal about the concern of SPP 1542:

A core focus of SPP 1542 “Concrete light – foundations for building the future with bionic and mathematical design principles” will be basic research specific to building components. The entire range of possible buildable structures shall be divided into shell structures, plane or weakly curved plates and panels, rod-shaped load-bearing elements and fractal structures. The design of force fields or force systems forms the basis of ideally weight-minimised concrete structures. We find inspiration for efficient load-bearing structures in nature with the help of bionics.

The question of production must be considered for each component. The development of formwork systems and construction technologies for freely formed concrete components is therefore another research focus. With regard to deconstruction and reusability (of parts) of concrete structures, appropriate joining technologies for concrete components are also of interest. The targeted, significantly thinner structures with highly variable cross-sections are increasingly susceptible to stability and vibrations. Therefore, suitable calculation methods for dynamically critical structures and structures at risk of stability are to be developed, which concern the individual components, the entire structure and the stiffening mechanisms.

The modelling of technical-scientific tasks is a basic concern of the SPP and thus the main goal of application-oriented mathematical research. The design language for lightweight concrete construction must be developed and made describable, force paths must be analysed and mathematically defined. Differential geometry is also a highly topical and important field of research in the design of flexible formwork modules.

Zwei wesentliche Ziele sind:

1. Angestrebt ist ein ästhetischer Paradigmenwechsel, denn die Erweiterung des durch die Schalungstechnik definierten Formenspektrums im Betonbau vergrößert den gesamten Gestaltungsspielraum beim Bauen mit Beton. Unsere Bauwerke sollen das Prinzip der Zweckmäßigkeit erfüllen, gleichzeitig aber auch variablen Nutzungsanforderungen genügen.
2. Der Leichtbau nach dem Prinzip „form follows force“ führt zu einer Reduktion des Eigengewichts der Bauteile und damit zu einer Einsparung von natürlichen Ressourcen und von Energie bei der Bereitstellung von Stahl, Zement und Zuschlagstoffen, aber auch zu einer Reduktion der Verminderung des CO₂-Ausstoßes.

Two essential objectives are:

1. The aim is an aesthetic paradigm shift, because the enlargement of the form spectrum defined by formwork technology in concrete construction increases the overall design scope in building with concrete. Our buildings should fulfil the principle of functionality, but at the same time also satisfy variable usage requirements.
2. Lightweight construction according to the principle „form follows force“ leads to a reduction in the dead weight of the components and thus to a saving of natural resources and energy in the provision of steel, cement and aggregates, but also to a reduction in CO₂ emissions.

2 Struktur und Organisation

2.1 Beteiligte Fachgebiete, Personen und Projekte

Am SPP waren Forschende der Fachrichtungen Bauingenieurwesen, Architektur, Geometrie/Mathematik und Maschinenbau/Verfahrenstechnik beteiligt. Aus der Biologie/Bionik war leider kein Antrag bewilligt worden; baubionische Forschung fand deshalb entgegen der Intention des SPP nur am Rande statt. Dies war besonders insofern bedauerlich, dass damit die Chance vergeben wurde, Input aus einer Fachrichtung zu bekommen, von der vor allem die zumeist technisch spezialisierten Ingenieur:innen sicher in hohem Maße hätten profitieren können.

In Summe waren über die gesamte Laufzeit am SPP beteiligt:

- 3 Antragstellerinnen und 27 Antragsteller,
- 76 Nachwuchswissenschaftler:innen und weitere Projektbearbeiter:innen (davon 14 Frauen) sowie
- 8 Kolleg:innen im Koordinierungsteam.

Hinzu kommen technische Mitarbeiter:innen in den Laboren sowie zahlreiche Studierende,

2 Structure and organisation

2.1 Participating disciplines, persons and projects

Researchers from the fields of civil engineering, architecture, geometry/mathematics and mechanical/process engineering were involved in the SPP. Unfortunately, no application was approved from the field of biology/bionics; contrary to the SPP's intention, research in construction bionics therefore only took place on the margins. This was particularly regrettable because it meant that the opportunity was lost to obtain input from a discipline from which the mostly technically specialised engineers could certainly have profited to a great extent.

In total, in the SPP were involved:

- 3 women and 27 men as applicants,
- 76 junior researchers and other researchers (14 of whom were women) and
- 8 colleagues in the coordination team.

In addition, there are technical staff in the laboratories and numerous students who were directly involved in the SPP as part of their student work or as research assistants.

die im Rahmen studentischer Arbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte direkt im SPP involviert waren.

Im SPP wurden insgesamt 25 wissenschaftliche Projekte wie folgt gefördert (s. auch Bild 2, links):

- 8 Projekte über beide Förderphasen,
- 10 Projekte nur in Förderphase I und
- 7 Projekte nur in Förderphase II.



Bild 1: SPP-Initiativgruppe; v. l. n. r., vorn: Ulrich Häußler-Combe (TU Dresden), Werner Sobek (Universität Stuttgart), Gunter Weiß und Manfred Curbach (beide TU Dresden), Mike Schlaich (TU Berlin) und Christian Hamm (AWI Bremerhaven); hinten: Frank Jesse, Katrin Schwiteilo und Silke Scheerer (alle TU Dresden); nicht auf dem Bild: Walter Haase (Universität Stuttgart) und Martina Schnellenbach-Held (Universität Duisburg-Essen) | **Fig. 1:** SPP initiators' group; from left to right, front: Ulrich Häußler-Combe (TU Dresden), Werner Sobek (University of Stuttgart), Gunter Weiß and Manfred Curbach (both TU Dresden), Mike Schlaich (TU Berlin) and Christian Hamm (AWI Bremerhaven); back: Frank Jesse, Katrin Schwiteilo and Silke Scheerer (all TU Dresden); not in the picture: Walter Haase (University of Stuttgart) and Martina Schnellenbach-Held (University of Duisburg-Essen)

Einige der Forschungsthemen, die in Förderphase II hinzukamen, waren direkte Folgeprojekte von in Phase I beendeten Vorhaben. Drei Vorhaben aus Phase I wurden nicht für eine weitere Förderung empfohlen und erhielten eine Auslauffinanzierung.

Das Kick-off-Meeting fand im Juni 2011 an der TU Dresden statt. Neben dem gegenseitigen Kennenlernen standen ein erster Erfahrungsaustausch sowie die Festlegung einer geeigneten Struktur für das Schwerpunktprogramm im Fokus. Im Ergebnis wurden fünf Arbeitsgruppen (AG) festgelegt (Bild 3), in denen ein intensiverer Austausch vereinbart wurde:

Within the framework of the SPP, a total of 25 scientific projects were funded as follows (see also Fig. 2, left):

- Bauteile 1D (Bauteile mit vorwiegend eindimensionaler, also stabförmiger Lastabtragung),

- 8 projects over both funding phases,
- 10 projects only in funding phase I and
- 7 projects only in funding phase II.



links | on the left:

- x ... Anzahl Projekte in Phase I oder II | Number of projects in phase I or II
- x ... Anzahl Projekte über beide Förderperioden | Number of projects with funding in both periods

rechts | on the right:

- x ... Arbeitsgruppentreffen | Working group meeting
- x ... Jahrestreffen | Annual meeting
- x ... SPP-Sommerschule | SPP Summer School



Bild 2: Deutschlandweite Verteilung der SPP-Projekte (links) und SPP-Treffen (rechts) | **Fig. 2:** German-wide allocation of SPP projects (left) and SPP meetings (right)

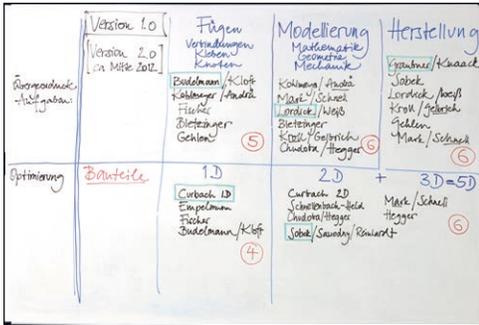


Bild 3: Arbeitsgruppenfestlegung beim Kick-off-Meeting im Juni 2011 in Dresden | **Fig. 3:** Determination of working groups at the kick-off meeting in Dresden in June 2011

- Bauteile 2D und 3D (flächlich und räumlich),
- Fügen,
- Herstellung und
- Modellierung.

Einige SPP-Projekte wurden mehreren Arbeitsgruppen (AG) zugeordnet. Die gemeinsam gewählten Arbeitsgruppenleiter bildeten die Koordinatorengruppe, die beratend und unterstützend bei der fachlichen Ausrichtung des SPP und der Verwendung der gepoolten Mittel aus dem Koordinatorenfonds tätig wurde. Die Koordination des gesamten Programms wurde Prof. Curbach übertragen, der bereits Hauptinitiator des Einrichtungsantrags gewesen ist. In Förderphase II wurden drei thematische Arbeitsgruppen gebildet: Bauteile, Herstellen und Modellieren.

2.2 Schwerpunkttreffen

Kernpunkt koordinierter Programme der DFG ist der regelmäßige Erfahrungsaustausch aller Beteiligten. Im SPP 1542 wurden jährliche Arbeitstreffen für alle am SPP Beteiligten organisiert. Zu diesen stellten die Doktorand:innen ihre Projektstände vor und zur Diskussion. Zudem gab es spezielle Angebote für die Nachwuchswissenschaftler:innen und inspirierende Vorträge und Workshops auch über Themen des SPP hinaus. Kulturelle Highlights und genügend Zeit und Raum für bilaterale oder Gruppengespräche, um sich beispielsweise über neue Projekte oder gemeinsame

Some of the research topics that were launched in funding phase II were direct follow-ups to projects that had been completed in phase I. Three projects from Phase I were not recommended for further funding and received phase-out funding.

The kick-off meeting took place in June 2011 at TU Dresden. Besides familiarising themselves with each other, the focus was on an initial exchange of experiences and the determination of a suitable structure for the priority programme. As a result, five working groups (WG) were established (Fig. 3), in which a more intensive exchange was agreed:

- Components 1D (components with predominantly one-dimensional, i.e. bar-like load transfer),
- Components 2D and 3D (planar and spatial),
- Joining,
- Production and
- Modelling.

Some SPP projects were assigned to several working groups (WG). The jointly elected working group leaders formed the coordinator group, which acted in an advisory and supportive manner with regard to the scientific orientation of the SPP and the use of the pooled budget from the coordinator fund. The coordination of the entire programme was assigned to Prof. Curbach, who had already been the main initiator of the proposal for establishment. In funding phase II, three thematic working groups were formed: Components, Manufacturing and Modelling

2.2 SPP meetings

The core of coordinated programmes of the DFG is the regular exchange of experience between all participants. In SPP 1542, annual working meetings were organised for all those involved in the SPP. At these meetings, the doctoral researchers presented their project progress and put it up for discussion. In addition, there were special offers for young researchers as well as inspiring lectures and workshops, also on



Bild 4: Beim Arbeitsgruppentreffen 2014 in Stuttgart demonstrieren Prof. Sawodny und sein Team die Smart Shell | **Fig. 4:** At the 2014 working group meeting in Stuttgart, Prof. Sawodny and his team demonstrated the Smart Shell

Veröffentlichungen auszutauschen, rundeten die Treffen ab. Die jährlichen Arbeitsgruppen fanden in ganz Deutschland statt (Bild 2, rechts). Eine Ausnahme war das Jahr 2017. Da mehrere Projekte eine Laufzeitverlängerung beantragt hatten, wurde zur SPP-Sommerschule 2017 beschlossen, das Abschlusstreffen in das Folgejahr 2018 zu verlegen.

Um etwa ein halbes Jahr versetzt wurden zudem Arbeitsgruppentreffen im kleineren Kreis abgehalten (Bild 2, rechts, und Bild 4). Anfangs traf sich nahezu jede Arbeitsgruppe separat. Wegen des teilweise hohen Reiseaufwandes wurden ab dem zweiten Förderjahr die Treffen mehr konzentriert.

An dieser Stellen danken wir allen Organisationsteams herzlich für ihre Unterstützung!

3 Öffentlichkeitsarbeit, Außenwirkung und universitäre (Weiter-) Bildung

3.1 Webauftritt

Ein Schwerpunkt der Öffentlichkeitsarbeit lag auf Erstellung, Pflege und stetigem Ausbau der Homepage des SPP 1542 [2]. Im Blog auf der Startseite wurden aktuelle Nachrichten publiziert und über Schwerpunktaktivitäten

topics beyond the SPP. Cultural highlights and enough time and space for bilateral or group discussions, for example about new projects or joint publications, rounded off the meetings. The annual working meetings took place all over Germany (Fig. 2, right). One exception was the year 2017. Since several projects had applied for a runtime extension, it was decided at the SPP Summer School 2017 to shift the final meeting to the following year 2018.

Shifted by about half a year, working group meetings were also held in smaller circles (Fig. 2, right, and Fig. 4). In the beginning, almost every working group met separately. Because of the sometimes high travel expenses, the meetings were more concentrated from the second funding year onwards.

We would like to take this opportunity to thank all the organising teams for their support!

3 Public relations, external visibility and university (further) education

3.1 Website

One focus of the public relations work was the creation, maintenance and constant upgrading of the SPP 1542 homepage [2]. In the blog on the start page, current news were published and focal activities were reported on. In addition to general programme information, all projects were presented at a glance and information about SPP events was provided. An internal area served to exchange data, further information and SPP publications. The presentations given at the SPP meetings were also shared.

In the wake of the publication of this final report, the page will be condensed, as the main information can now be accessed collected in this report.

3.2 Publications, conferences, prizes and demonstrators

Publications are essential for the visibility of research among experts and the interested pub-

berichtet. Neben allgemeinen Programminformationen wurden alle Projekte übersichtlich dargestellt und über SPP-Veranstaltungen informiert. Ein interner Bereich diente dem Austausch von Daten, weiterführenden Informationen und SPP-Publikationen. Auch die zu den SPP-Treffen präsentierten Vorträge wurden geteilt.

Im Nachgang zum Erscheinen dieses Schlussberichts wird die Seite komprimiert werden, da die Hauptinformationen nun im vorliegenden Bericht gesammelt abrufbar sind.

3.2 Veröffentlichungen, Konferenzen, Preise und Demonstratoren

Publikationen sind essentiell für die Sichtbarkeit der Forschung in der Fachwelt und der interessierten Öffentlichkeit. Im Koordinatorenprojekt wurden einerseits eigene Publikationen verfasst und Vorträge gehalten, um das SPP allgemein in der Öffentlichkeit zu vertreten und bekannt zu machen. Eine Zusammenstellung findet sich am Ende dieses Berichts. Andererseits wurde bei allen Schwerpunkttreffen die Thematik Veröffentlichungen diskutiert, um den enormen Stellenwert nachdrücklich zu vertiefen. Neben dem hier vorliegenden Buch sei auf drei weitere Publikationen verwiesen, in denen konzentriert über Ergebnisse des SPP berichtet wurde (Bild 5):

- In beiden Förderperioden wurde je eine Ausgabe der Fachzeitschrift Beton- und Stahlbe-

lic. In the coordinator project, on the one hand, own publications were written and lectures held in order to generally represent the SPP in the public and make it known. A compilation can be found at the end of this report. On the other hand, the topic of publications was discussed at all SPP meetings in order to emphatically deepen their enormous importance. In addition to the book presented here, we would like to refer to three other publications in which results of the SPP were reported in a concentrated manner (Fig. 5):

- In both funding periods, one issue each of the journal Beton- und Stahlbetonbau was filled entirely with papers from Priority Programme 1542 [3], [4].
- At the end of the first funding period, the results from all SPP projects were summarised in an anthology. The book was published as a print version and is also available in open access [5].

Doctoral researchers in particular were actively encouraged to present their research at national and international conferences. At some conferences, participation was therefore partially financially supported from the SPP 1542's coordinator fund. Special sessions on SPP topics were also organised. The following are worth mentioning:

- 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering in Karlsruhe, July 2012. Here, 19 doctoral students presented twelve different research topics from SPP 1542.
- 54th Doctoral Symposium of the Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (German Committee for Steel-reinforced Concrete, DAfStb; in conjunction with the DAfStb Annual Conference) in November 2013 in Bochum. Lightweight construction with concrete was a thematic focus. A total of nine SPP researchers served on the scientific advisory board for the conference. Nine lectures were given by doctoral researchers on topics from SPP 1542.
- International IASS Symposium 2015 in Amsterdam. SPP 1542 was represented with a total of 16 contributions. The two sessions on "Light-



Bild 5: Gemeinsame SPP-Publikationen | Fig. 5: Joint SPP publications

tonbau vollständig mit Fachbeiträgen aus dem Schwerpunktprogramm 1542 gefüllt [3], [4].

- Am Ende der ersten Förderperiode wurden in einem Sammelband die Ergebnisse aus den SPP-Projekten zusammengefasst. Das Buch erschien als Printversion und steht zudem Open Access zur Verfügung [5].

Aktiv wurden gerade Doktoranden ermutigt, auf nationalen und internationalen Tagungen ihre Forschungsarbeiten vorzustellen. Bei einigen Konferenzen wurde deshalb die Teilnahme aus dem Koordinatorenfonds des SPP 1542 anteilig finanziell unterstützt. Auch wurden Special Sessions zu Themen des SPP organisiert. Genannt seien:

- 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering in Karlsruhe im Juli 2012. Hier stellten 19 Doktorand:innen zwölf verschiedene Forschungsthemen aus dem SPP 1542 vor.
- 54. Doktorandensymposium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton DAfStb (in Verbindung mit der DAfStb-Jahrestagung) im Novem-

ber 2012. Die Special Sessions „Concrete weight construction with concrete“ were led by Jan Dirk van der Woerd (Chudoba/Hegger project) and Silke Scheerer.

- International IASS Symposium 2017 in Hamburg. The 15 presentations from SPP 1542 were almost all given in the previously applied for sessions on “Concrete light: innovative concrete constructions”, which were moderated by Jeldrik Mainka (Dröder/Kloft project) and Silke Scheerer together with co-moderators.

Fig. 7 provides an overview of the publication activities and conference visits in SPP 1542. The numerous conference visits contributed greatly to the visibility of the SPP. In addition, they enabled the doctoral researchers in particular to network and further their education both nationally and internationally. In terms of journal publications, not all projects were able to exploit their potential. The item “other publications” includes, for example, contributions to celebratory publications or editorials. From this group, we would like to highlight the article by Daniel Schmeer and Werner Sobek on „Gradient



Bild 6: Impressionen von der IASS 2015 in Amsterdam | Fig. 6: Impressions from the IASS 2015 in Amsterdam

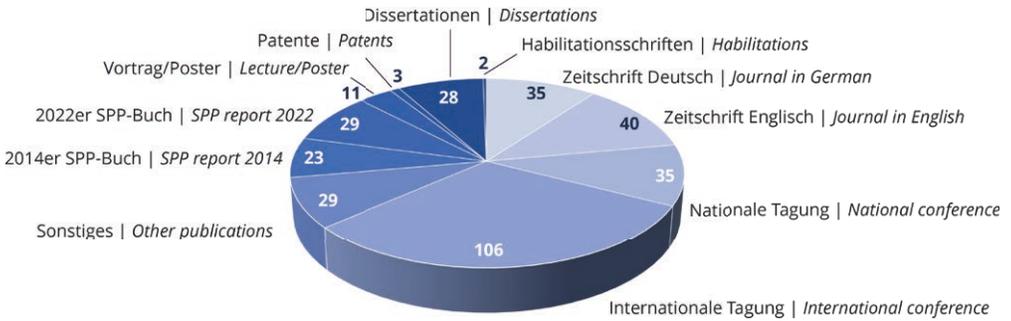


Bild 7: Überblick über SPP-Publikationen | Fig. 7: Overview of SPP publications

ber 2013 in Bochum. Leicht Bauen mit Beton war ein thematischer Schwerpunkt. Insgesamt neun SPP-Forscher:innen waren im wissenschaftlichen Beirat der Tagung tätig. Es wurden neun Vorträge von Doktorand:innen zu Themen aus dem SPP 1542 gehalten.

- Internationales IASS-Symposium 2015 in Amsterdam. Das SPP 1542 war mit insgesamt 16 Beiträgen vertreten. Die zwei Session zum Thema „Leicht Bauen mit Beton“ wurden von Jan Dirk van der Woerd (Projekt Chudoba/Hegger) und Silke Scheerer geleitet.
- Internationales IASS-Symposium 2017 in Hamburg. Die 15 Vorträge aus dem SPP 1542 wurden fast alle in den zuvor beantragten Sessions zum Thema „Concrete light: innovative concrete constructions“ gehalten, die von Jeldrik Mainka (Projekt Dröder/Kloft) und Silke Scheerer zusammen mit Co-Moderator:innen geleitet wurden.

Einen Überblick über die Publikationstätigkeit und Konferenzbesuche im SPP 1542 gewährt Bild 7. Die zahlreichen Konferenzbesuche trugen in hohem Maße zur Bekanntheit des SPP bei. Zudem ermöglichten sie vor allem den Doktorand:innen, sich national und international zu vernetzen und weiterzubilden. Bei den Zeitschriftenveröffentlichungen konnten nicht alle Projekte ihr Potential ausschöpfen. Unter dem Punkt „sonstige Publikationen“ sind bspw. Beiträge zu Festschriften oder Editorials zusammengefasst. Aus dieser Gruppe hervorheben möchten wir den Artikel von Daniel Schmeer und Werner Sobek zum Gradientenbeton im Beton-Kalender 2019 (s. Projekt Garrecht et al.).

concrete“ in the Beton-Kalender 2019 (see Garrecht et al. project).

The individual SPP projects themselves also contributed to the public visibility of the entire SPP. In addition to the publications, the participation in trade fairs and exhibitions and the prizes that were won and communicated via the blog on the SPP homepage are also mentioned. Further information can be found in the sub-project descriptions.

- 2013 – 14th German Concrete Canoe Regatta in Nuremberg: The concrete boat “The Foldious”, realised by students of RWTH Aachen University using the Oricrete technique (Chudoba/Hegger project), took 3rd place in the construction ranking and 6th place in the “design” ranking out of 81 boats.
- 2013 – 5th Anwendertagung Textilbeton (User Conference Textile Reinforced Concrete) in Dresden: Christiane Bongardt and Michael Kolodzie (RWTH Aachen University) received the TUDALIT Architecture Award 2013 for their folding dome “Oridome – The Principle of Diversity” (Chudoba/Hegger project, Fig. 8).
- 2014 – Architecture exhibition „Anything goes !?! – The new desire for material in architecture“, M:AI Museum für Architektur und Ingenieurkunst NRW, Gelsenkirchen: On display was the UHPC node element developed in the Budelmann/Kloft project, which was manufactured using new types of wax formwork (Dröder/Kloft project).
- 2015 – Weather and Architecture – Building for the Future. Arte documentation on the conse-

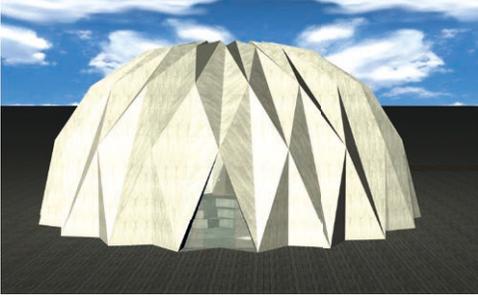


Bild 8: Visualisierung der Oridome-Kuppel | **Fig. 8:** Visualisation of the Oridome



Bild 9: Demonstratoren auf der BAU 2017, hergestellt mit dem Verfahren des selektiven Zementleimeintrags | **Fig. 9:** Demonstrators at BAU 2017, produced with the selective cement paste application method

Zur öffentlichen Sichtbarkeit des gesamten SPP trugen aber auch die einzelnen Projekte selbst bei. Neben den Publikationen seinen Preise genannt, die errungen werden konnten und die über den Blog auf der SPP-Homepage kommuniziert wurden; aber auch die Beteiligung an Messen und Ausstellungen. Weitere Informationen können den Teilprojektbeschreibungen entnommen werden.

- 2013 – 14. Deutsche Betonkanu-Regatta in Nürnberg: Das von Student:innen der RWTH Aachen in Oricrete-Technik (Projekt Chudoba/Hegger) realisierte Betonboot „The Foldious“ belegte unter 81 Booten den dritten Platz in der Konstruktionswertung und den sechsten Platz in der Wertung „Gestaltung“.
- 2013 – 5. Anwendertagung Textilbeton in Dresden: Christiane Bongardt und Michael Kolodzie (RWTH Aachen University) erhielten den TUDALIT-Architekturpreis 2013 für ihre Falterkuppel „Oridome – Das Prinzip der Vielfaltigkeit“ (Projekt Chudoba/Hegger, Bild 8).
- 2014 – Architekturausstellung „Anything goes !?! – Die neue Lust am Material in der Architektur“, M:AI Museum für Architektur und Ingenieurkunst NRW, Gelsenkirchen: Ausgestellt wurde das im Projekt Budelmann/Kloft entwickelte UHPC-Knotenelement, das mit Hilfe neuartiger Wachsschalungen (Projekt Dröder/Kloft) gefertigt wurde.
- 2015 – Wetter und Architektur – Bauen für die Zukunft. Arte-Dokumentation zu Folgen des Klimawandels mit drei visionären Architekten auf deren Suche nach angemessenen, zukunftsfähigen Lösungen. Werner Sobek stellt

quences of climate change with three visionary architects in their search for appropriate, sustainable solutions. Werner Sobek presents, among other things, the development of gradient concrete (Sobek et al. and Garrecht et al. projects).

- 2017 – BAU 2017: Multi-shaped demonstrators produced using the selective binding method were exhibited at the stand of the Informationszentrums Beton, see also [6] (Gehlen/Winter project, Fig. 9).
- 2017 – Ulmer Betontage 2017. The Innovation Award 2017 of the supplier industry for pre-cast concrete components was awarded to the team of Klaus Dröder and Harald Kloft from the TU Braunschweig for the idea “Wax shapes concrete”.
- 2017 – fib-Symposium 2017 in Maastricht: 3rd place in the International Student Competition “Sustainable Concrete Construction Design” for the contribution “fold it green” (Chudoba/Hegger project).
- 2018 – Konferenz MonGeometrija 2018 in Novi Sad: Best-Paper Award for „Geometrical Optimization of Interconnected Voids in Concrete Ceilings“ in the category „Application of Geometry and Graphics“. In this paper, Prof. Lordick’s team deals with geometric optimisation for finding the shape and smoothing elements for cross-channel technology (Jäger project).
- 2018 – Competition „Auf IT gebaut – Bauberufe mit Zukunft“ („Built on IT – Construction Professions with a Future“). Juan Pablo Osman-

u. a. die Entwicklung des Gradientenbetons vor (Projekte Sobek et al. und Garrecht et al.).

- 2017 – BAU 2017: Es wurden vielgestaltige, mit der Methode des selektiven Bindens hergestellte Demonstratoren am Stand des Informationszentrums Beton ausgestellt, s. auch [6] (Projekt Gehlen/Winter, Bild 9).
- 2017 – Ulmer Betontage 2017. Der Innovationspreis 2017 der Zulieferindustrie Betonbauteile wurde für die Idee „Wachs formt Beton“ an das Team um Klaus Dröder und Harald Kloft von der TU Braunschweig verliehen.
- 2017 – fib-Symposium 2017 in Maastricht: 3. Platz bei der International Student Competition „Sustainable Concrete Construction Design“ für den Beitrag „fold it green“ (Projekt Chudoba/Hegger).
- 2018 – Konferenz MonGeometrija 2018 in Novi Sad: Best-Paper Award für „Geometrical Optimization of Interconnected Voids in Concrete Ceilings“ in der Kategorie „Application of Geometry and Graphics“. Das Team um Prof. Lordick setzt sich hierin mit der geometrischen Optimierung zur Formfindung und Glättung von Elementen für die Kreuzkanaltechnologie (Projekt Jäger) auseinander.
- 2018 – Wettbewerb „Auf IT gebaut – Baubefehle mit Zukunft“. Juan Pablo Osman-Letelier (Projekt Lordick/Schlaich) und Konrad Freymann (ebenfalls TU Berlin) erhielten den zweiten Preis im Bereich Bauingenieurwesen für ein Software-Modul für Form- und Materialoptimierung vorgespannter Flächentragwerke aus Carbonbeton.

Ein besonderer Stellenwert kommt Demonstratoren zu, mit denen neue Konstruktions- und Bauformen besonders eindrücklich visualisiert werden können. Im SPP war die Schaffung von Demonstratoren zum Teil von vornherein in den Projekten beantragt worden. Zudem wurden in der zweiten Förderphase vom Koordinationsprojekt Mittel für Demonstrationsobjekte bereitgestellt. Die SPPLer konnten sich hierfür in einem internen Wettbewerb bewerben, der zum Jahrestreffen 2015 in Bochum eröffnet wurde; die Entscheidung über die Mittelvergabe wurde dann gemeinsam getroffen. Im Folgenden wird eine Übersicht über die großformati-

Letelier (Lordick/Schlaich project) and Konrad Freymann (also TU Berlin) received 2nd prize in the field of civil engineering for a software module for form and material optimisation of prestressed plane load-bearing structures made of carbon reinforced concrete.

Particular importance is attached to demonstrators, which can be used to visualise new design and construction forms in a particularly impressive way. In the SPP, the creation of demonstrators was partly proposed in the projects from the outset. In addition, funds for demonstration objects were provided by the coordination project in the second funding phase. The SPP members were able to apply for this in an internal competition, which was opened at the 2015 annual meeting in Bochum; and the decision on the allocation of funds was then made jointly. In the following, an overview of the large-scale SPP demonstrators is given, which are presented in the corresponding SPP projects or separately in the 2nd part of this book.

- TU Kaiserslautern (2014/15): Parabolic trough demonstrator (Mark/Schnell project). In 2015, the controllable parabolic trough made of HPC was presented to the public, see [7], p. 576 seq. and Fig. 10. Parabolic trough power plants have a high potential to contribute significantly to electricity generation, e.g. in Southern Europe and North Africa. In the ConSol project (funded by BMWi), two additional, remarkable 12 m long and 6 m wide HPC parabolic troughs were realised in 2018, [8].
- TU Braunschweig (2016/17): uni-con² – universal concrete construction (projects Budelmann/Kloft, Dröder/Kloft; Empelmann), see short report on p. 676 et seq. The feasibility of the production, assembly and dry joining of filigree concrete elements was demonstrated.
- TU Berlin & TU Dresden (2017): Carbon reinforced concrete bridge (project Lordick/Schlaich, p. 488 et seq.). The 3 m long bridge with ruled surface geometry (Fig. 11) was optimised using a line geometric model. It impressively demonstrates what material-saving construction of the future can look like. The bridge was presented at the Footbridge 2017 Conference in Berlin.

gen SPP-Demonstratoren gegeben, die in den zugehörigen SPP-Projekten oder separat im 2. Teil des vorliegenden Buches vorgestellt sind.

- TU Kaiserslautern (2014/15): Parabolrinnen-Demonstrator (Projekt Mark/Schnell). 2015 wurde die steuerbare Parabolrinne aus Hochleistungsbeton hergestellt und der Öffentlichkeit präsentiert, s. S. 576 ff., [7] und Bild 10. Parabolrinnenkraftwerke haben ein hohes Potential, bspw. in Südeuropa und Nordafrika nennenswert zur Stromerzeugung beizutragen. 2018 wurden im Projekt ConSol, gefördert vom BMWi, zwei weitere, beachtliche 12 m lange und 6 m breite Parabolrinnen aus Dyckerhoff NANODUR hergestellt [8].
- TU Braunschweig (2016/17): uni-con² – universal concrete construction (Projekte Budelmann/Kloft, Dröder/Kloft, Empelmann). Demonstriert wurde die Machbarkeit von Herstellung, Montage und trockener Fügung filigraner Betonelemente (Kurzbericht s. S. 676 ff.).
- TU Berlin/TU Dresden (2017): Carbonbetonbrücke (Projekt Lordick/Schlaich auf S. 488 ff.). Die 3 m lange Brücke mit Regelflächengeometrie (Bild 11) wurde unter Verwendung eines liniengeometrischen Modells optimiert und belegt eindrucksvoll, wie materialsparendes Bauen der Zukunft aussehen kann. Die Brücke wurde auf der Footbridge 2017 Conference in Berlin präsentiert.
- TU Chemnitz (2019/20): Carbonbeton-Schalendemonstrator (Projekte Kroll/Gelbrich). Car-

- TU Chemnitz (2019/20): Carbon reinforced concrete shell demonstrator (Kroll/Gelbrich projects). Carbon reinforced concrete shell elements were produced with the flexible GRP formwork system developed in the SPP, see short report in this book at page 682 seq.
- TU Dresden (2018–2021): CarboLight Bridge (projects Curbach). The exhibition bridge for the Deutsches Museum in Munich demonstrates the potential of novel composites, internal grading and shaping according to the flow of forces, see short report at page 686 seq. in this book.

3.3 Qualification of young scientists and involvement of students

That a total of 28 doctoral theses were written in the SPP has already been shown in Fig. 7. This is considered a great success. Almost all theses are available via Open Access, which is highly appreciated and extremely helpful for the dissemination of research results. In addition, there are two habilitation theses written by project leaders, containing research results of the SPP:

- Sandra Gelbrich: Funktionsintegrative Leichtbaustrukturen für Tragwerke im Bauwesen (Function-integrative lightweight structures for load-bearing structures in civil engineering; 2016), and
- Rostislav Chudoba: Components of multi-scale modeling framework for characterization,



Bild 10: Großdemonstrator der TU Kaiserslautern | Fig. 10: Large-scale demonstrator of the TU Kaiserslautern



Bild 11: Carbonbeton-Schalendemonstrator mit Regelflächengeometrie, gezeigt auf der Footbridge 2017 Conference | Fig. 11: Carbon reinforced concrete shell bridge with ruled surface geometry, exhibited at the Footbridge 2017 Conference

bonbeton-Schalenelemente wurden mit dem im SPP entwickelten flexiblen GFK-Schalungssystem hergestellt, s. Kurzbericht in diesem Buch ab S. 682.

- TU Dresden (2018–2021): CarboLight Bridge (Projekte Curbach). Die Ausstellungsbrücke für das Deutsche Museum München demonstriert das Potential von neuartigen Kompositen, innerer Gradierung und Formgebung nach dem Kraftfluss (Kurzbericht S. 686 ff.).

3.3 Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses und Einbeziehung Studierender

Dass im SPP insgesamt 28 Promotionsschriften entstanden sind, wurde bereits im Bild 7 dargelegt. Dies wird als großer Erfolg gewertet. Fast alle Arbeiten sind Open Access verfügbar, was außerordentlich begrüßt wird und für die Verbreitung der Forschungsergebnisse äußerst förderlich ist. Hinzu kommen zwei Habilitationsschriften, die Projektleiter:innen während der Laufzeit des Gesamt-SPP verfasst haben und in die Forschungsergebnisse des SPP eingingen:

- Sandra Gelbrich: Funktionsintegrierte Leichtbaustrukturen für Tragwerke im Bauwesen (2016) und
- Rostislav Chudoba: Components of multi-scale modeling framework for characterization, analysis and design of brittle-matrix composite structures (2020).

Des Weiteren haben sechs als Doktorand oder Postdoc im SPP Mitwirkende den Titel Professorin/Professor erhalten:

- apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich, Leitung des Forschungsbereichs Leichtbau im Bauwesen an der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, TU Chemnitz,
- Prof. Dr.-Ing. Arndt Goldack, Lehrgebiet Tragwerkelehre und Baukonstruktion, Bergische Universität Wuppertal,
- Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke, Fachgebiet Baustoffe am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig,
- Prof. Dipl.-Ing. Matthias Michel, Schule für Architektur Saar, htw saar,

analysis and design of brittle-matrix composite structures (2020).

Furthermore, six doctoral student or postdocs participating in the SPP have been awarded the title of professor:

- apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich, head of research group Lightweight Constructions in Civil Engineering at the Department of Lightweight Structures and Polymer Technology, TU Chemnitz,
- Prof. Dr.-Ing. Arndt Goldack, Department of Structural Engineering and Building Construction, Bergische Universität Wuppertal,
- Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke, Division of Building Materials at Institute of Building Materials, Concrete Construction and Fire Safety, TU Braunschweig,
- Prof. Dipl.-Ing. Matthias Michel, School for Architecture Saar, htw saar,
- Prof. Dr.-Ing. habil. Sebastian Ortlepp, Department of Structural Engineering, University of Applied Sciences Berlin,
- apl. Prof. Dr.-Ing. Jaan Willem Simon, Institute of Applied Mechanics, RTWH Aachen University.

For the promotion of young scientists, various training courses were organised and offered during the runtime of the SPP, preferably in the context of the SPP annual meetings and summer schools:

- Seminar for doctoral students on scientific work: Research and literature acquisition as well as citation, conducted by colleagues of the Braunschweig University Library (Braunschweig, 2012),
- Science communication in a different way – Science Slam: Martin Buchholz (TU Braunschweig): Entropy: A lecture on cooling towers and the irreversibility of things (Braunschweig, 2012),
- Ansys-/Multiplas seminars in Weimar (2013), mainly organised by Michael Henke (TU Munich, project Fischer),
- Lectures and seminars during Summer School 2013
 - Ilona Bürgel (Dresden): Desire for performance? With pleasure to success

- Prof. Dr.-Ing. habil. Sebastian Ortlepp, Fach-/Arbeitsgebiet Tragwerksplanung, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin,
- apl. Prof. Dr.-Ing. Jaan Willem Simon, Institut für Angewandte Mechanik, RWTH Aachen University.

Für die Förderung des akademischen Nachwuchses wurden im SPP verschiedene Weiterbildungen organisiert und angeboten, vorzugsweise im Rahmen der SPP-Jahrestreffen und Sommerschulen:

- Doktorandenseminar wissenschaftliches Arbeiten: Recherchen und Literaturbeschaffung sowie Zitieren, durchgeführt von Kolleg:innen der Unibibliothek Braunschweig (Braunschweig, 2012),
- Wissenschaftsvermittlung anders – Science Slam: Martin Buchholz (TU Braunschweig): Entropie: Ein Vortrag über Kühltürme und die Unumkehrbarkeit der Dinge (Braunschweig, 2012),
- Ansys-/Multiplas-Seminare in Weimar (2013), maßgeblich organisiert von Michael Henke (TU München, Projekt Fischer),
- Vorträge und Seminare zur Sommerschule 2013
 - Ilona Bürgel (Dresden): Lust auf Leistung? Mit Genuss zum Erfolg
 - Bessere Fotos (Ulrich van Stipriaan, TU Dresden)
 - Entwerfen (verschiedene)
 - Freihandzeichnen (Andreas Pickel, TU Dresden)
 - Messen bei Versuchen mit Vorträgen von Torsten Hampel, Robert Ritter, Gregor Schacht (alle TU Dresden)
- Vorträge und Seminare zur Sommerschule 2017
 - Joachim Zawischa (Hamburg): Bunker oder Pavillion – Warum Beton nicht die einzige Hemmschwelle ist
 - Joachim Zawischa (Hamburg): Workshop zu Humor, Wahrheit und Perspektivwechsel
 - Martina Dressel (Freital): Abschied vom Kommunikations-Tohuwabohu
 - Anne Müller (TU Dresden): Wie komme ich vom Plan in die Umsetzung?
 - Klaus Raps (Dresden): Von der Idee zur Unternehmensgründung – Start-Up!

- Better photographs (Ulrich van Stipriaan, TU Dresden)
- Design (different)
- Freehand drawing (Andreas Pickel, TU Dresden)
- Measuring at experiments with lectures by Torsten Hampel, Robert Ritter, Gregor Schacht (all TU Dresden)
- Lectures and seminars during Summer School 2017:
 - Joachim Zawischa (Hamburg): Bunker or pavillion – Why concrete is not the only barrier
 - Joachim Zawischa (Hamburg): Workshop on humour, truth and change of perspective
 - Martina Dressel (Freital): Farewell to the communication hullabaloo
 - Anne Müller (TU Dresden): How do I get from plan to implementation?
 - Klaus Raps (Dresden): From the idea to the foundation of a company – Start-Up!

The research in the SPP also found its way into university teaching. At the TU Dresden, for example, it was placed in the module BIW 4-11 “Design of Concrete Structures”. Furthermore, a large number of student theses were written; an overview is given in Fig. 12.

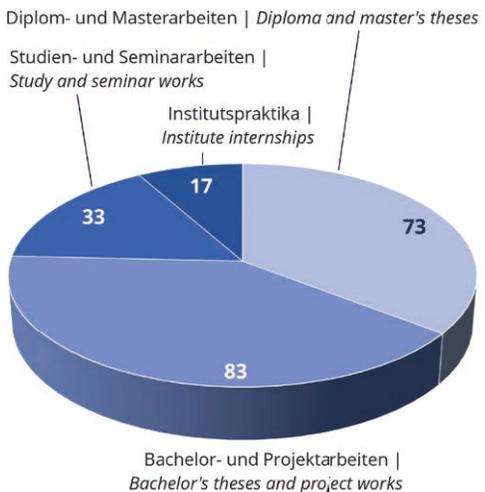


Bild 12: Studentische (Abschluss-)Arbeiten im SPP 1542 | Fig. 12: Student theses in SPP 1542



Bild 13: Betontische, entworfen von Studierenden der HS Ostwestfalen-Lippe | **Fig. 13:** Concrete tables designed by students of HS Ostwestfalen-Lippe

Die Forschung im SPP hielt zudem Einzug in die universitäre Lehre. An der TU Dresden wurde sie beispielsweise im Modul BIW 4-11 „Entwurf von Massivbauwerken“ platziert. Des Weiteren entstand eine Vielzahl studentischer Arbeiten (Bild 12).

Außerdem wurden an den verschiedenen Hochschulen studentische Projekte in Verbindung mit dem SPP 1542 durchgeführt, die teilweise zusätzliche finanzielle Unterstützung aus dem SPP-Programmfonds erhalten haben (in Klammern sind die Initiatoren genannt):

- Studentenprojekt Betonmöbel (Jeldrik Mainka, TU Braunschweig),
- Studentenprojekt Faltkanu (Jan Dirk van der Woerd, RWTH Aachen),
- Beton-Lab für Seminar CONCRETable (Sascha Hickert, HS Ostwestfalen-Lippe, Bild 13).

Kurzbeschreibungen der genannten Aktivitäten sind in [1] enthalten. Erwähnt werden soll, dass auch bei allen im SPP gefertigten Demonstratoren zahlreiche Studierende involviert waren und somit einen direkten Zugang zu den SPP-Ideen bekamen.

4 Besondere Aktivitäten

In diesem Kapitel sollen noch einige besondere SPP-Aktivitäten vorgestellt werden.

In addition, student projects were carried out at the various universities in connection with SPP 1542, some of which received additional financial support from the SPP programme fund (the initiators are listed in brackets):

- Student project concrete furniture (Jeldrik Mainka, TU Braunschweig),
- Student project folded canoe (Jan Dirk van der Woerd, RWTH Aachen),
- Concrete Lab for CONCRETable seminar (Sascha Hickert, HS Ostwestfalen-Lippe, Fig. 13).

Brief descriptions of the activities mentioned can be found in [1]. It should be mentioned that numerous students were also involved in all demonstrators manufactured in the SPP and thus had direct access to the SPP ideas.

4 Special activities

In this chapter, special SPP activities will be presented.

4.1 (Guest) Lectures and workshops

Interesting lectures were given especially at the SPP annual meetings, whereby thanks for inviting the speakers are due to the organisational teams of the meetings. The lectures and workshops at a glance:

4.1 (Gast-)Vorträge und Workshops

Interessante Vorträge gab es vor allem zu den SPP-Jahrestreffen, wobei der Dank für die Einladung der Referent:innen den Organisationsteams der Treffen gebührt. Die Vorträge und Workshops im Überblick:

1. Jahrestreffen, 14./15.11.2011 im Kurhaus Trifels (Organisation: TU Kaiserslautern)

- Philipp Block (ETH Zürich): Back to the future: new funicular form finding
- Christian Hamm (AWI Bremerhaven): Bionische Methoden für den Strukturleichtbau – Inspiration oder systematische Nutzung?
- Manfred Grohmann (Bollinger und Grohmann Ingenieure und Universität Kassel) über Tragwerke und Architektur
- Daniel Lordick (TU Dresden): Vortrag aus dem Fachgebiet Geometrie

2. Jahrestreffen, 12.–14.11.2012 in Braunschweig:

- Mike Schlaich (TU Berlin und sbp) über die Betonschalen Félix Candelas
- Christoph Hankers (Torkret AG) über Praxisprojekte
- Stefan Polónyi (em. TU Dortmund): Der armierte Beton

SPP-Sommerschule, 10.–14.06.2013 in Meisdorf:

- Holger Svensson (LAP und TU Dresden): Ein Leben für Schrägkabelbrücken
- Wieland Ramm (em. TU Kaiserslautern): Vom Zement zum Stahlbeton: Zur Entwicklung einer Jahrhundertbauweise
- Prof. Häußler-Combe (TU Dresden): Chancen und Risiken bei der Simulation im Stahlbetonbau

Tag der Optimierung, 06.09.2013 an der Ruhr-Universität Bochum (Workshop, organisiert von Peter Mark und Team):

- Kai-Uwe Bletzinger (TU München): Multikriterielle Optimierung, Formoptimierung (von Schalen) mit sehr vielen Variablen
- Christian Bucher (TU Wien): Zur Behandlung von Unschärfe, Sensitivität, Robustheit in der (Struktur-)Optimierung

1. Annual Meeting, 14./15.11.2011, Kurhaus Trifels (organised by TU Kaiserslautern)

- Philipp Block (ETH Zürich): Back to the future: new funicular form finding
- Christian Hamm (AWI Bremerhaven): Bionic methods for lightweight structural engineering – inspiration or systematic use?
- Manfred Grohmann (Bollinger & Grohmann Ingenieure and University of Kassel) on structures and architecture
- Daniel Lordick (TU Dresden): lecture from the field of geometry

2. Annual Meeting, 12.–14.11.2012 in Braunschweig:

- Mike Schlaich (TU Berlin and sbp) about concrete shells of Félix Candela
- Christoph Hankers (Torkret AG) about practical projects
- Stefan Polónyi (em. TU Dortmund): The reinforced concrete

SPP Summer School, 10.–14.06.2013 in Meisdorf:

- Holger Svensson (LAP and TU Dresden): A life for cable-stayed bridges
- Wieland Ramm (em. TU Kaiserslautern): From cement to steel-reinforced concrete: The development of a construction method of the century
- Prof. Häußler-Combe (TU Dresden): Opportunities and risks of simulation in reinforced concrete construction

Optimisation Day, 06.09.2013 at Ruhr-Universität Bochum (Workshop, organised by Peter Mark and team):

- Kai-Uwe Bletzinger (TU Munich): Multicriteria optimisation, shape optimisation (of shells) with a large number of variables
- Christian Bucher (TU Wien): On the treatment of fuzziness, sensitivity, robustness in (structural) optimisation
- Dietrich Hartmann (Ruhr University Bochum): Simulation-based optimisation taking into account modern computer science concepts

3. Annual Meeting, 13.–15.11.2013 in Darmstadt:

- Jürgen Schnell (TU Kaiserslautern): Possibilities of computed tomography in construction



Bild 14: Hängemodelle aus dem Workshop an der RUB | Fig. 14: Hanging models from the workshop at the RUB

- Dietrich Hartmann (Ruhr-Universität Bochum): Simulationsbasierte Optimierung unter Berücksichtigung moderner Informatikkonzepte
- 3. Jahrestreffen, 13.–15.11.2013 in Darmstadt:**
- Jürgen Schnell (TU Kaiserslautern): Möglichkeiten der Computertomografie im Bauwesen
 - Ulrich Knaack (TU Darmstadt): facades – a roadmap
 - Roman Kemmler (sbp): Geometrie folgt Kraft
 - Ulrich Knaack (TU Darmstadt): Kreativ-Workshop Beton
- Arbeitsgruppentreffen in Bochum, 2014:**
- Steffen Freitag (Ruhr-Universität Bochum): Numerische Strukturberechnung mit polymorphen Unschärfemodellen
- 4. Jahrestreffen, 29.09.–01.10.2014 in Dresden:**
- Jan Knippers (Universität Stuttgart) zum SFB/Transregio 141: Biological Design and Integrative Structures
- 5. Jahrestreffen, 07.–09.10.2015 in Bochum:**
- Sigrid M. Adriaenssens (Princeton University): Shell Structures: formfinding and optimization
 - Sigrid M. Adriaenssens (Princeton University): Workshop Practical form finding techniques (Bild 14)
- 6. Jahrestreffen, 04.–06.10.2016 in Aachen:**
- Alexander Scholzen (Kempen Krause Ingenieure GmbH): T3 Pavillon – Bemessung, Herstellung und Montage
 - Kristina Wißling (Lennestadt): Origami-Falttechnik
 - Kristina Wißling (Lennestadt): Origami-Workshop (Bild 15)
- Ulrich Knaack (TU Darmstadt): facades – a roadmap
 - Roman Kemmler (sbp): Geometry follows force
 - Ulrich Knaack (TU Darmstadt): Creative Workshop Concrete
- Working group meeting in Bochum, Spring 2014:**
- Steffen Freitag (Ruhr University Bochum): Numerical structure calculation with polymorphic uncertainty models
- 4. Annual Meeting, 29.09.–01.10.2014 in Dresden:**
- Jan Knippers (University of Stuttgart) about SFB/Transregio 141: Biological Design and Integrative Structures
- 5. Annual Meeting, 07.–09.10.2015 in Bochum:**
- Sigrid M. Adriaenssens (Princeton University): Shell Structures: formfinding and optimization
 - Sigrid M. Adriaenssens (Princeton University): Workshop Practical form finding techniques (Fig. 14)
- 6. Annual Meeting, 04.–06.10.2016 in Aachen:**
- Alexander Scholzen (Kempen Krause Ingenieure GmbH): T3 Pavilion – dimensioning, manufacture and assembly
 - Kristina Wißling (Lennestadt): Origami folding technique
 - Kristina Wißling (Lennestadt): Origami Workshop (Fig. 15)
- SPP Summer School in Meisdorf, 08.–12.05.2017:** As part of the lecture programme for the 2017 Summer School, postdocs and professors from the SPP gave an insight into their research activities beyond the Priority Programme:

SPP-Sommerschule in Meisdorf, 08.–12.05.2017: Im Rahmen des Vortragsprogramms zur Sommerschule 2017 gaben Postdocs und Professor:innen aus dem SPP einen Einblick über ihre Forschungstätigkeit jenseits des Schwerpunktprogramms:

- Kai-Uwe Bletzinger: Vertex Morphing
- Harald Budelmann: Der lange Weg hochradioaktiver Abfälle bis in ein Endlager: Aufgabe für Bauingenieure und für die Forschung?
- Manfred Curbach: Forschung im Bauwesen – Warum so viele neue Ideen gefragt sind
- Manfred Curbach: Impactbeanspruchungen auf Bauteile und Bauwerke
- Christoph Gehlen: Dauerhaftigkeit von bewehrtem Beton
- Sandra Gelbrich: Funktionsintegrative Verbundstoffe im Bauwesen
- Walter Haase: Adaptive Gebäudehüllen
- Klaudius Henke: Additive Fertigung im Bauwesen – historische Entwicklung und Stand der Technik
- Harald Kloft: Digitale Baufabrikation
- Lothar Kroll: Kombinationstechnologien auf Basis von Direktprozessen im Leichtbau
- Ludger Lohaus: Betonermüdung
- Daniel Lordick: Fraktale und additive Fertigung
- Peter Mark: Monitoring und Visualisierung im Infrastrukturbau
- Oliver Sawodny: SFB 1244 aus systemtheoretischer Sicht
- Mike Schlaich: Infraleichtbeton
- Jürgen Schnell: Praxistaugliche Hohlkörperdecken
- Werner Sobek: Bauen in der Zukunft
- Stefan Winter: Die Evolution der Eurocodes – wie Normen entstehen und wie man daran mitarbeiten kann

Abschlussstreifen, 17.–19.09.2018 in Dresden:

- Christian Hamm (AWI Bremerhaven): Bionik und Strukturoptimierung

Bei Jahrestreffen und Sommerschulen wurden auch Rahmenprogramme mit nicht-fachlichen Aktivitäten organisiert. Es fanden statt:

- 13.11.2012: Stadtrundgang Braunschweig „Nachtwächertour“,

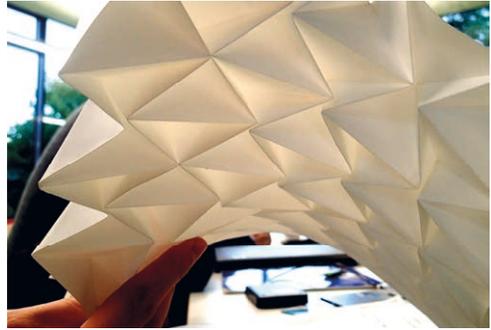


Bild 15: Origami-Faltpattern als Vorbild für Beton-Faltwerke | **Fig. 15:** Origami folding pattern as a model for concrete folded plate structures

- Kai-Uwe Bletzinger: Vertex Morphing
- Harald Budelmann: The long path of highly radioactive waste to a final repository: a task for civil engineers and for research?
- Manfred Curbach: Research in construction – Why so many new ideas are in demand
- Manfred Curbach: Impact loads on components and structures
- Christoph Gehlen: Durability of reinforced concrete
- Sandra Gelbrich: Functionally integrative composites in the building industry
- Walter Haase: Adaptive building envelopes
- Klaudius Henke: Additive manufacturing in construction – historical development and state of the Art
- Harald Kloft: Digital building fabrication
- Lothar Kroll: Combination technologies based on direct processes in lightweight construction
- Ludger Lohaus: Concrete fatigue
- Daniel Lordick: Fractal and additive manufacturing
- Peter Mark: Monitoring and visualisation in infrastructure construction
- Oliver Sawodny: CRC 1244 from a systems theory perspective
- Mike Schlaich: Infra-lightweight concrete
- Jürgen Schnell: Practice-oriented hollow core slabs
- Werner Sobek: Building in the future
- Stefan Winter: The evolution of the Eurocodes – how standards are created and how to contribute to them

- 11.06.2013: Michael George (Bayerischer Verfassungsschutz): Vortrag zu Wirtschafts- und Wissenschaftskriminalität,
- 13.06.2013: Wanderung zur Burg Falkenstein und Falknershow,
- 13.11.2013: Führung Mathildenhöhe und Künstlerkolonie,
- 28.09.2014: Wanderung Sächsische Schweiz,
- 30.09.2014: Stadtrundfahrt Dresden,
- 07.10.2015: Führung im Bergbaumuseum Bochum,
- 08.10.2015: Hanns Hatt (Ruhr-Universität Bochum): Nur die Nase zählt: Von Spürnasen und Feinschmeckern,
- 05.10.2016: Führung durch den Aachener Dom,
- 18.09.2018: Führung GLÄSERNE MANUFATUR.

4.2 Hornbach-Wettbewerb

Die Idee zu diesem SPP-internen Wettbewerb entstand beim Arbeitstreffen in Trifels am 14.11.2011. Zu Gast war der Vorsitzende des Vorstands der Hornbach Holding AG, Albrecht Hornbach. Mit ihm gemeinsam wurde ein Entwurfswettbewerb mit dem Thema „Baummarkttaugliche Objekte nach dem Prinzip form follows force“ ausgelobt. Die Produkte waren zu entwerfen und herzustellen. Dabei waren obere Schranken für Gewicht und Preis im Hinblick auf einen möglichen Vertrieb in einem Baumarkt zu beachten. Zum 2. Arbeitstreffen in Braunschweig im November 2012 wählte eine unabhängige Jury drei Sieger aus den eingereichten Beiträgen (Bild 16) aus.

4.3 SPP-Sommerschulen in Meisdorf 2013 und 2017

In beiden SPP-Förderperioden wurden Sommerschulen initiiert. Zu Gast waren wir beide Male im Parkhotel Schloss Meisdorf an der „Straße der Romantik“. Der etwa 800 Jahre alte, idyllische Ort liegt am Ostfuß des Harzes und ist ausreichend abgelegen, dass sich alle Beteiligten intensiv den Treffen widmen konnten. Zu den Treffen gab es hochkarätige Vorträge und inspirierende Workshops. Neben fachlichen In-

Final Meeting, 17.–19.09.2018 in Dresden:

- Christian Hamm (AWI Bremerhaven): Bionics and structural optimisation

At annual meetings and summer schools, a social programme with non-professional activities was usually also organised. The following took place:

- 13.11.2012: City walk Braunschweig “Night watchman tour”,
- 11.06.2013: Michael George (v,
- 13.06.2013: Hike to Falkenstein Castle and falconry show,
- 13.11.2013: Guided tour Mathildenhöhe and artists’ colony,
- 28.09.2014: Hike Saxon Switzerland,
- 30.09.2014: Dresden city tour,
- 07.10.2015: Guided tour of the Bochum Mining Museum,
- 08.10.2015: Hanns Hatt (Ruhr University Bochum): Only the nose counts: Of sleuths and gourmets,
- 05.10.2016: Guided tour Aachen Cathedral,
- 18.09.2018: Guided tour GLÄSERNE MANUFATUR.

4.2 Hornbach competition

The idea for this SPP-internal competition arose at the 1st Annual Meeting in Trifels on 14.11.2011. Albrecht Hornbach, Chairman of the Board of Hornbach Holding AG, was a guest. Together with him, a design competition was launched with the motto “Objects suitable for DIY stores according to the principle form follows force”. The products were to be designed and manufactured. In the process, upper limits for weight and price had to be observed with regard to possible distribution in a DIY store. At the 2nd Annual Meeting in Braunschweig in November 2012, an independent jury selected three winners from the entries submitted (Fig. 16).

4.3 SPP Summer Schools in Meisdorf 2013 and 2017

Summer schools were initiated in both SPP funding periods. Both times we were guests at

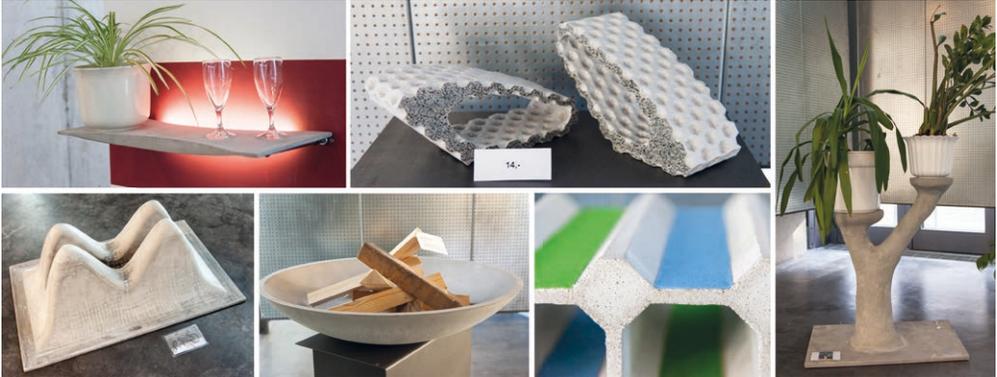


Bild 16: Gebrauchsgüter aus Beton nach dem Grundsatz „form follows force“, entstanden im SPP-internen Hornbach-Wettbewerb (Auswahl) | **Fig. 16:** Consumer goods made of concrete according to the principle „form follows force“, created in the SPP-internal Hornbach competition (selection)

halten wurden Soft Skills vermittelt. Es wurde ausreichend Zeit und Raum für Gruppen- und bilaterale Gespräche eingeplant, was vor allem von den Projektleiter:innen begrüßt wurde. 2013 wurde die Sommerschule zudem dazu genutzt, sich gemeinsam über die zum damaligen Zeitpunkt angestrebte 2. Förderperiode des SPP 1542 auszutauschen. Die Gegend lud zudem zu Spaziergängen und Wanderungen, wo sich in ungezwungener Atmosphäre Gelegenheit zu Gesprächen bot.

the Parkhotel Schloss Meisdorf on the “Road of Romanticism”. The idyllic place, which is about 800 years old, is located at the eastern foot of the Harz Mountains and is sufficiently remote that all participants were able to devote themselves intensively to the meetings. The meetings were characterised by high-calibre lectures and inspiring workshops. In addition to technical content, soft skills were taught. There was enough time and space for group and bilateral discussions, which was especially welcomed by the project leaders. In 2013, the summer school



Bild 17: Impressionen von der SPP-Sommerschule in Meisdorf 2013 | **Fig. 17:** Impressions from the SPP Summer School in Meisdorf 2013

4.4 Internationale Sommerschule 2018, organisiert von Daniel Lordick

Im Projekt Lordick/Schlaich war eine internationale Sommerschule beantragt worden, die vom 10.-28.09.2018 an der TU Dresden stattfand. Die Intention von „Line Geometry for Lightweight Structures“ (LGLS) [9] war der Entwurf von Leichtbaustrukturen unter Verwendung von Regelflächen. Regelflächen sind gerade im Betonbau prädestiniert, um räumlich gekrümmte Tragwerke zu erstellen, da sie mit Hilfe von Geraden erzeugt werden können. Damit wird z. B. der Schalungsbau deutlich vereinfacht. Auch Stahlgittertürme werden nach diesem Prinzip errichtet.

Die Sommerschule wurde international beworben. Insgesamt konnten 24 Teilnehmer:innen aus Deutschland, Bosnien-Herzegowina, Serbien, Kroatien, Japan und den Niederlanden begrüßt werden.

Zu Beginn stand das Kennenlernen mathematischer Formfindungswerkzeuge in Grasshopper sowie Möglichkeiten der Kombination mit Finite-Elemente-Programmen auf dem Programm. Anschließend wurden in Teams Konstruktionsprojekte entwickelt und im Modellmaßstab im Makerspace an der SLUB Dresden gefertigt. Hintergrundwissen wurde vermittelt zum Entwerfen mit Regelflächen sowie allgemein zu Leichtbaustrukturen und -design. Dazu war ein internationales Team an Gastredner:innen eingeladen. Ein Begleitprogramm führte die Teilnehmenden zu kulturellen und wissenschaftlichen Hotspots in und um Dresden.

Bild 18 vermittelt Eindrücke der Sommerschule. Am Ende waren sich alle Beteiligten einig, dass die LGLS-Sommerschule für alle inspirierend und eine herausragende, unvergessliche Gelegenheit gewesen ist, Neues hinzuzulernen und sich international zu vernetzen.

Die Sommerschule wurde mit Mitteln der DFG und aus der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder zur Förderung von Wissenschaft und Forschung an deutschen Hochschulen (Bun-

was also used to discuss the second funding period of SPP 1542, which was planned at that time. The surrounding area also invited people to go for walks and hikes, which provided an opportunity for discussions in an informal atmosphere.

4.4 International Summer School 2018, organised by Daniel Lordick

An international summer school had been applied for in the Lordick/Schlaich project, which took place at TU Dresden from 10-28 September 2018. The intention of “Line Geometry for Lightweight Structures“ (LGLS) [9] was the design of lightweight structures using ruled surfaces. Ruled surfaces are predestined for creating spatially curved structures, especially in concrete construction, because they can be created with the help of straight lines. This significantly simplifies formwork construction, for example. Steel lattice towers are also built using this principle.

The summer school was advertised internationally. A total of 24 participants from Germany, Bosnia-Herzegovina, Serbia, Croatia, Japan and the Netherlands were welcomed.

At the beginning, the programme included learning about mathematical form-finding tools in Grasshopper and the possibilities of combining them with finite element programmes. Afterwards, design projects were developed in teams and produced on a model scale in the Makerspace at the SLUB Dresden. Background knowledge was provided on designing with ruled surfaces and on lightweight structures and design in general. An international team of guest speakers was invited. An accompanying programme took the participants to cultural and scientific hotspots in and around Dresden.

Fig. 18 gives some impressions of the summer school. In the end, all participants agreed that the LGLS Summer School had been inspiring for everyone and an outstanding, unforgettable opportunity to learn new things and to network internationally.



Bild 18: Objekte mit Regelflächengeometrie, entstanden bei der LGLS-Sommerschule 2018 in Dresden | Fig. 18: Objects with ruled surface geometry, created at the LGLS Summer School 2018 in Dresden

desministeriums für Bildung und Forschung, BMBF) gefördert.

4.5 Transferinitiative

Beim Arbeitsgruppentreffen im Frühjahr 2016 in Berlin war Christiane Mohren (DFG) zu Gast und referierte zu Fördermöglichkeiten für DFG-Erkennnistransfer-Projekte. Im Anschluss fand eine intensive Diskussion zu Transferprojekten statt. Die Idee war, aus dem SPP heraus mehrere Erkenntnistransferprojekte bei der DFG einzureichen. Wir wollten zum einen den Stellenwert der Übertragung der Ideen der Grundlagenforschung in die Praxis hervorheben. Zum anderen bestand die Hoffnung, dass durch ein solches konzertiertes Vorgehen eventuell eine vom üblichen Verfahren abweichende Förderung möglich wäre. Aus dieser gemeinsamen Initiative heraus entstanden schlussendlich acht Transferanträge, die Anfang 2017 bei der DFG eingereicht wurden. Das Ergebnis der Begutachtung war außerordentlich positiv: insgesamt fünf der acht Anträge wurden bewilligt. Einige Projekte sind im Teil 2 des vorliegenden Buches vorgestellt.

4.6 Chancengleichheit

In einem überregional angelegten Verbundforschungsprojekt, wie es ein Schwerpunktpro-

The Summer School was funded by the DFG and by the Excellence Initiative of the German Federal and State Governments for the Promotion of Science and Research at German Universities (Federal Ministry of Education and Research BMBF).

4.5 Transfer initiative

At the working group meeting in spring 2016 in Berlin, Christiane Mohren (DFG) was a welcome guest and gave a presentation on funding opportunities for DFG knowledge transfer projects. This was followed by an intensive discussion on transfer projects. The idea was to submit several knowledge transfer projects to the DFG resulting from the SPP research. On the one hand, we wanted to emphasise the importance of transferring the ideas of basic research into practice. On the other hand, we hoped that such a coordinated action might make it possible to obtain funding that deviates from the usual procedure. This joint initiative ultimately resulted in eight transfer proposals, which were submitted to the DFG at the beginning of 2017. The result of the evaluation was very positive: a total of five of the eight proposals were approved. Some projects are presented in Part 2 of this book.

gramm ist, lassen sich Chancengleichheitsmaßnahmen schwieriger umsetzen als beispielsweise in einem an einem Ort konzentrierten SFB, da alle SPPLer die gleichberechtigte Möglichkeit haben sollten, von Chancengleichheitsmaßnahmen zu profitieren. Hauptaugenmerk lag im SPP 1542 v. a. auf der SPP-internen Kommunikation, um alle beteiligten Wissenschaftler:innen über Chancen und Möglichkeiten zu informieren und sie anzuregen, Eigeninitiative hinsichtlich der Verwendung der zweckgebunden beantragten und bewilligten Mittel zu entwickeln. Um die eigene Kompetenz zu erhöhen, arbeiteten wir beim Treffpunkt DFG-koordinierter Programme an der TU Dresden mit. Im Zentrum standen der regelmäßige Erfahrungsaustausch und die Entwicklung neuer Ideen.

Im SPP wurde v. a. Unterstützung bei der Schaffung einer familienfreundlichen Arbeitsumgebung gewährt. Außerdem beteiligten wir uns an einem Mentoringprogramm, um Schülerinnen für die MINT-Studienfächer zu begeistern.

5 Fazit und Dank

Die Koordination eines Schwerpunktprogramms ist Chance und Bürde zugleich. Einerseits war es unser Anspruch, entsprechend dem Grundanliegen eines DFG-Schwerpunktprogramms eine deutschlandweite, fächer- und ortsübergreifende Forschung zu einem neuartigen Thema zu unterstützen und zu befördern. Außerdem wollten wir zu den regelmäßigen Treffen, die unabdingbarer Bestandteil eines SPP und Grundbedingung für eine sich gegenseitig befruchtende Zusammenarbeit verschiedener Fachdisziplinen sind, Aktivitäten über das rein Fachliche hinaus anbieten. Dies ist eine Chance, die es im Rahmen eines DFG-SPP zu nutzen gilt und die bei Einzelprojekten in der Regel nicht besteht. Aus unserer Sicht ist uns dies gemeinsam mit allen SPPLern, aber auch mit unseren Ansprechpartner:innen bei der DFG gelungen.

Andererseits konnten wir im Koordinat ionsteam in den vergangenen Jahren einen tie-

4.6 Equal opportunities

In a German-wide research network, such as a priority programme, equal opportunity measures are more difficult to implement than, for example, in an CRC concentrated in one location, since all SPP researchers should have the same opportunity to benefit from equal opportunity measures. In SPP 1542, the main focus was on internal communication within the SPP in order to inform all participating scientists about opportunities and possibilities and to encourage them to develop their own initiative with regard to the use of the specifically requested and approved funds. In order to increase our own competence, we participated in the meeting point of DFG-coordinated programmes at the TU Dresden. The focus was on the regular exchange of experiences and the development of new ideas.

In the SPP, support was provided above all in creating a family-friendly working environment. We also participated in a mentoring programme to inspire schoolgirls to take up MINT subjects.

5 Conclusion and acknowledgement

Coordinating a priority programme is both an opportunity and a burden. On the one hand, it was our ambition to support and promote German-wide, cross-disciplinary and cross-locational research on a novel topic, in line with the basic purpose of a DFG Priority Programme. In addition to the regular meetings, which are an essential part of a SPP and a basic prerequisite for mutually beneficial cooperation between different disciplines, we wanted to offer activities beyond the purely professional. This is an opportunity to be taken advantage of within the framework of a DFG SPP, which does not usually exist in the frame of individual projects. From our point of view, we have succeeded in doing this together with all SPP members, but also with our contact persons at the DFG.

On the other hand, we in the coordination team have been able to gain a deep insight into the research on "Concrete light" over the past years

fen Einblick in die Forschung zum „Leicht Bauen mit Beton“ gewinnen wie sicher niemand sonst im SPP. Durch die ständige Kommunikation mit allen Partnern, die Erstellung und Pflege der Webseite und die SPP-Treffen war es möglich, den Fortschritt in den einzelnen Projekten von den manchmal vagen Ideen zu Beginn, über erste Erfolge bis zum erfolgreichen Abschluss der Forschungsthemen hautnah mitzuerleben und dabei selbst viel hinzuzulernen.

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle ausdrücklich bedanken (in chronologischer Reihenfolge):

- bei den Mitinitiator:innen des Schwerpunktprogramms 1542 „Leicht Bauen mit Beton – Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien“,
- bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Einrichtung des SPP (Projektnummer: 172438440), die Ausschreibung der Phasen I und II, die Organisation der Begutachtungen und die Bereitstellung der finanziellen Mittel,
- bei den Gutachter:innen des Initiativantrags und der Projektanträge in beiden Förderperioden,
- bei allen Beteiligten in den Projektteams, die zum Erfolg der Forschung und damit des gesamten Schwerpunktprogramms beigetragen haben und
- bei den Kolleg:innen und studentischen Hilfskräften am Institut für Massivbau der TU Dresden für ihre Unterstützung.

like certainly no one else in the SPP. Through constant communication with all partners, the maintenance of the website and the SPP meetings, it had been possible to experience the progress in the individual projects at first hand, from the sometimes vague ideas at the beginning, through the first successes to the final completion of the research projects, and to learn a lot for ourselves in the process.

The authors would like to take this opportunity to expressly thank (in chronological order):

- the co-initiators of Priority Programme 1542 „Concrete light – foundations for building the future with bionic and mathematical design principles“,
- the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) for the establishment of the SPP (project number: 172438440), the call for tenders for phases I and II, the organisation of the evaluation and the provision of financial resources,
- the reviewers of initial proposal and of the project applications in both funding periods,
- all those involved in the project teams who have contributed to the success of the research and thus of the entire priority programme and
- all colleagues and student assistants at the Institute of Concrete Structures of TU Dresden for their support.

Literatur | References

- [1] Scheerer, S.; Curbach, M.: Das Schwerpunktprogramm 1542 – die erste Förderperiode im Überblick. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Eigenverlag Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 6–25 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171345>
- [2] Homepage des SPP 1542: <http://spp1542.tu-dresden.de/>.
- [3] Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11
- [4] Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12
- [5] Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1. Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014 – <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171338>
- [6] Impressionen vom Messestand auf der BAU 2017: <https://www.youtube.com/watch?v=q6Z4R6xm9LI>.
- [7] Kurzfilm zum Parabolrinnendemonstrator: https://www.youtube.com/watch?v=-_Uhl2Kvlgg&t=4s.
- [8] Großdemonstrator: Parabolrinnen aus Dyckerhoff NANODUR. Bericht auf der Homepage von Dyckerhoff vom 22.08.2018 – <https://www.dyckerhoff.com/media/news/gro-demonstrator-parabolrinnen-aus-dyckerhoff-nanodur>
- [9] Homepage LGLS: <https://tu-dresden.de/mn/math/geometrie/lordick/schnittstelle/veranstaltungen/summer-schools/lgls-2018>.
- Alle Internetquellen wurden am 01.03.2022 geprüft. | All internet sources were checked on 01.03.2022.

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder | Pictures 1, 3, 16, 17: Ulrich van Stipriaan
- Bilder | Pictures 2, 4–7, 12, 15: Silke Scheerer
- Bild | Picture 6 – Gruppenbild | Group picture: N. N.
- Bild | Picture 8: Christiane Bongardt, Michael Kolodzie
- Bild | Picture 9: Daniel Weger
- Bild | Picture 10: Thomas Brenner
- Bild | Picture 11: Christoph Hilleringmann
- Bild | Picture 13: HS OWL
- Bild | Picture 14: RUB
- Bild | Picture 18: Stefan Gröschel

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Koordination, zentrale Aufgaben und Öffentlichkeitsarbeit des SPP 1542

Coordination, central tasks and public relations of SPP 1542

Sprecher Speaker:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach Institutsdirektor und Direktor des Otto-Mohr-Laboratoriums Institute's director and director of the Otto Mohr Laboratory
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	CU 37/19-1/2 (Projektnummer Project number: 198141179)
Adresse Address:	TU Dresden, Institut für Massivbau, 01062 Dresden
Kontakt Contact:	+49 351 463 37660 manfred.curbach@tu-dresden.de https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Phasen I und II Periods I and II: 01.07.2011–31.03.2022 (inkl. kostenneutrale Verlängerung incl. cost-neutral extension)
Team Team:	Silke Scheerer Stefan Gröschel Silvia Haubold Sabine Hofmann Sven Hofmann Egbert Müller Dajana Musiol Ulrich van Stipriaan

Projektbezogene Publikationen und Vorträge | Project related publications and lectures

- Curbach, M.; Scheerer, S.: Wie die Baustoffe von heute das Bauen von morgen beeinflussen. In: KIT (Hrsg.): Baustoffe und Betonbau • Lehren, Forschen, Prüfen, Anwenden. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Harald S. Müller, zusammengestellt von M. Haist und N. Herrmann, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2012, S. 25–36
- Scheerer, S.: Leicht Bauen mit Beton Von der Vision zur Realität. Vortrag auf der VDZ-Jahrestagung, Düsseldorf, 28.09.2012
- Curbach, M.; Scheerer, S.: Form follows force – Materialminimiertes Bauen mit Beton. BFT International 79 (2013) 02, S. 10/11 – Proc. der 57. Ulmer Betontage, 05.–07.02.2013 in Neu-Ulm
- Scheerer, S.: Beton und Kraftfluss. In: Verlag Bau & Technik GmbH (Hrsg.): Tagungsband zur 5. Betonfachtagung Nord – Fertigteile im Ingenieur-, Industrie-, Büro- und Wohnungsbau, 19./20.09.2013 in Braunschweig, S. 53–69
- Curbach, M.; Scheerer, S.: Leicht Bauen mit Beton. In: Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke der TU Dresden (Hrsg.): Tagungsband zum 17. Dresdner Baustatik-Seminar am 25.10.2013 in Dresden, S. 95–107
- Curbach, M.: Bauen für die Zukunft. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 11, S. 751 (Editorial)
- Curbach, M.: Concrete light – possibilities and visions. Structural Concrete 14 (2013) 2, S. 87/88 (Editorial) – DOI: 10.1002/suco.201390010
- Scheerer, S.: Investition in die Betonforschung. Gespräch in betonprisma 50 (2014) 98, S. 18/19
- Scheerer, S.; Curbach, M.: Leicht Bauen mit Beton – Forschung im DFG-Schwerpunktprogramm 1542. In: Tue, N. V.; Maydl, P.; Freytag, B.; Santner, G. (Hrsg.): Nachhaltig Bauen mit Beton: Werkstoff und Konstruktion, Tagungsband zum 2. Grazer Betonkolloquium am 25./26.09.2014 in Graz (Österreich), Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2014, S. 37–48
- Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1. Dresden: Eigenverlag Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, 262 S. – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171338>
- Curbach, M.: Anders Bauen ist notwendig und machbar. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 5 (Editorial)
- Scheerer, S.; Curbach, M.: Das Schwerpunktprogramm 1542 – die erste Förderperiode im Überblick. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Eigenverlag Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 6–25 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171345>
- Scheerer, S.; Curbach, M.: SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton | Concrete Light“ – A short introduction. Vortrag zur International Summer School „Line Geometry for Lightweight Structures (LGLS)“, TU Dresden, 11.09.2018
- Curbach, M.: Raus aus dem Elfenbeinturm. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 783 (Editorial) – DOI: 10.1002/best.201670123

Abschlussbericht | Final report

SPP 1542

Bewehrter Beton ist das heutzutage am meisten verwendete Baumaterial. Es ist universell und preiswert nahezu überall auf der Welt herstellbar. Damit einhergehen allerdings ein hoher CO₂-Ausstoß und ein beträchtlicher Verbrauch an natürlichen Ressourcen. Im DFG-Schwerpunktprogramm 1542 wurden deshalb verschiedenste Ansätze erforscht, wie das Material effizienter eingesetzt und damit der Betonbau zukunftsfähig gemacht werden kann. Im vorliegenden Abschlussbericht zum SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ (gefördert von 2011 bis 2022) werden die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt.

Reinforced concrete is the most widely used building material today. It can be produced universally and cheaply almost anywhere in the world. However, this is accompanied by high CO₂ emissions and considerable consumption of natural resources. In the DFG Priority Programme 1542, a wide variety of approaches were therefore investigated to find out how the material can be used more efficiently and thus how concrete construction can be made fit for the future. This final report on SPP 1542 “Concrete Light” (funded from 2011 to 2022) presents the most important results.