

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 fossil 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

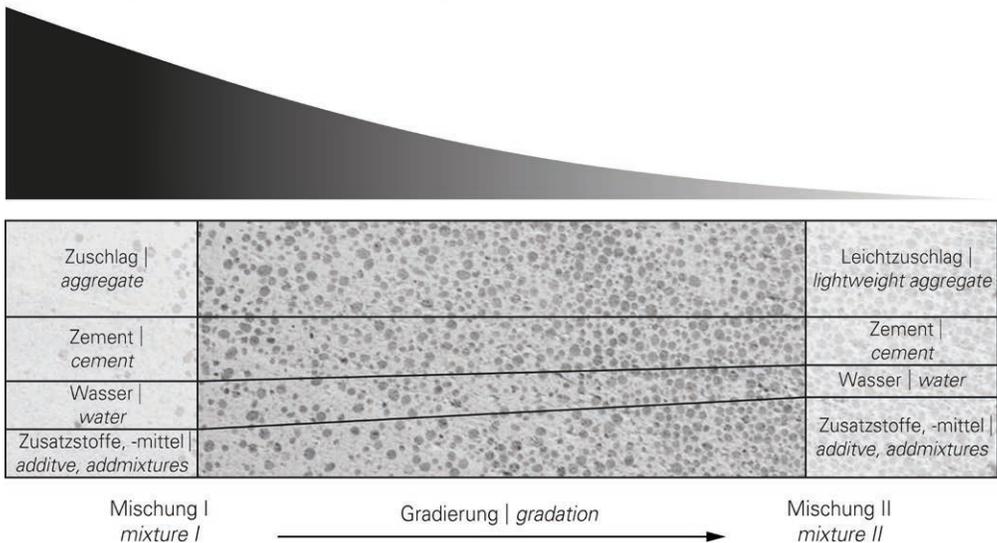


Bild 1: Konzept der Mikrogradierung: Eigenschaftsänderung der Betongemische durch Porositätsänderung mittels Leichtzuschlägen |
Fig. 1: Concept of the micro gradation: changing properties of the concrete mixtures through density variation by lightweight aggregates

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).

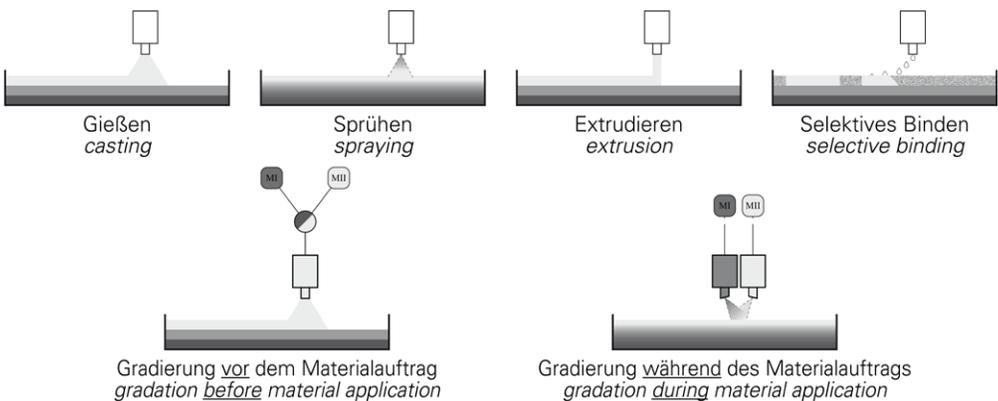


Bild 2: Verfahrenstechniken (oben) und Mischtechniken (unten) zur Gradientenbildung | Fig. 2: Application techniques (top) and mixing techniques (bottom) to produce gradients

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 mikrograduierter 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

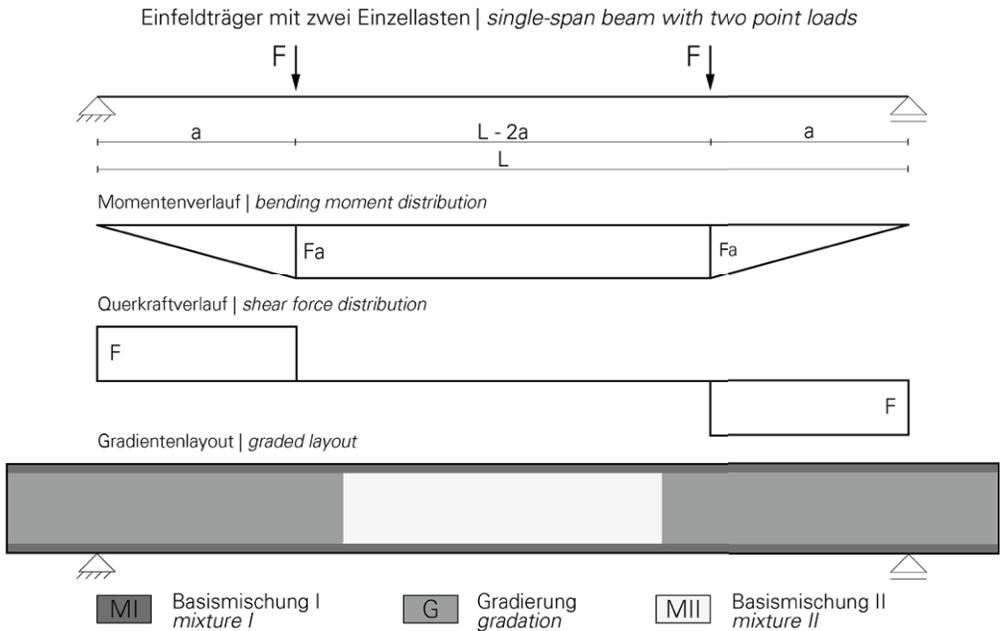


Bild 4: Gradiertes Kammerlayout nach dem Prinzip *design for strength* | **Fig. 4:** Graded segmented layout following the *design for strength* principle

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

5.1 Konzeption und Automatisierung (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.

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).

5 Production technology

5.1 Conception and automation (ISYS)

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.

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).

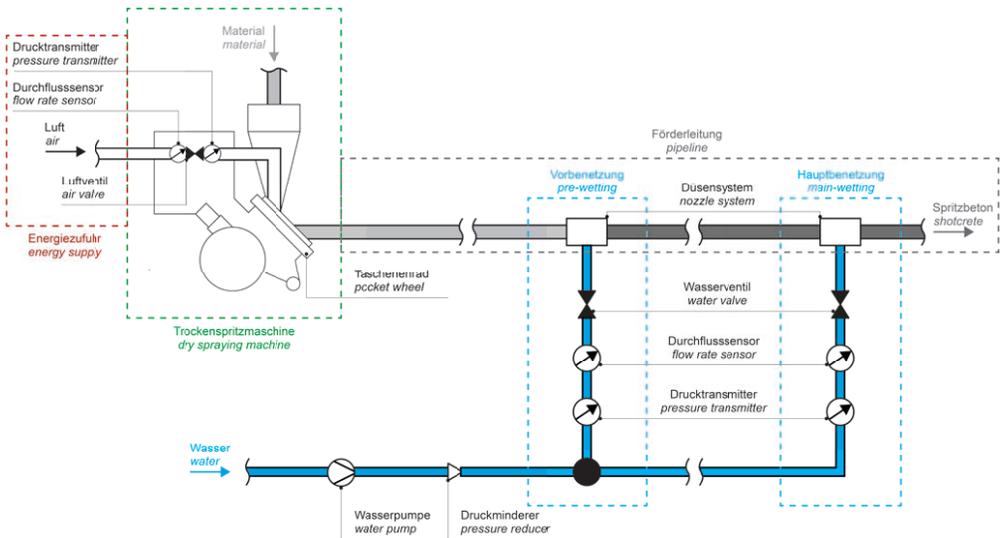


Bild 5: Schematischer Aufbau der Betonverfahrenstechnik mit den vier Einflussbereichen: Energiezufuhr (rot), Maschinentyp (grün), Förderleitung (grau) und Benetzung (blau) | **Fig. 5:** Schematic structure of the concrete technology with the four influencing factors: energy supply (red), machine type (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 Vorbeneetzung 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, Förderrate, 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

control 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

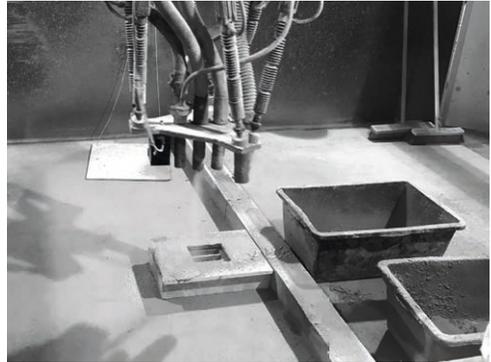
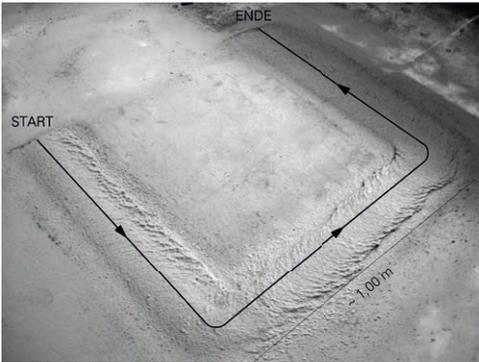


Bild 7: Versuchsablauf bestehend aus einem u-förmigen Spritzstreifen des Materialauftrags (links) und der Herstellung von Probekörpern zur Materialprüfung (rechts) | **Fig. 7:** Experimental setup with u-shaped trajectory (left) and the production of prisms (right)

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

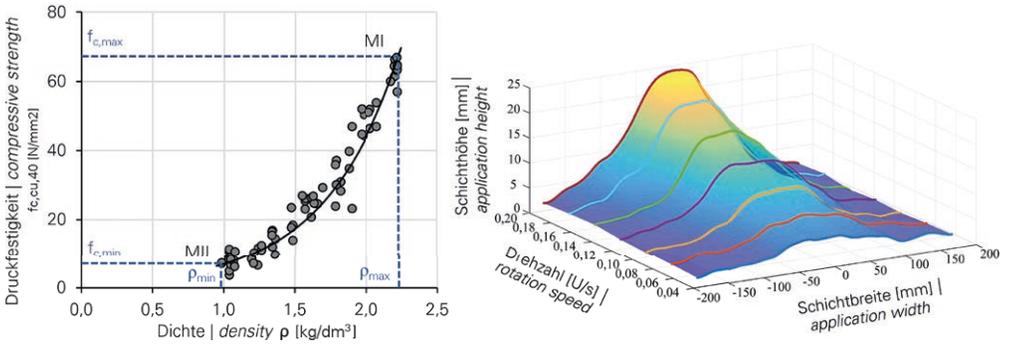


Bild 8: Ergebnisse der Prozessparameteranalyse: Eigenschaftsspektrum (links) und charakteristische Spritzstreifen in Abhängigkeit der Drehzahl (rechts) | **Fig. 8:** Results pursued with the analysis of process parameters: range of concrete properties (left) and characteristic spraying slats depending 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

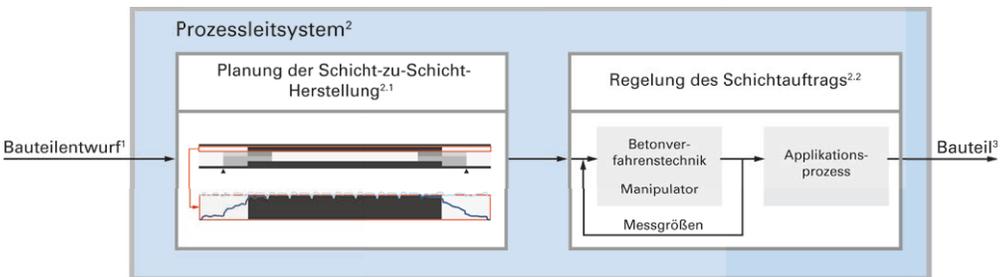


Bild 9: Übergabe des Bauteilentwurfs an das Prozessleitsystem, welches die Eingangsdaten des Bauteilentwurfs verarbeitet und die Prozessparameter zur Bauteilherstellung generiert | **Fig. 9:** Transfer of the component design¹ to the process control², which is planning the layer-by-layer production^{2,1} 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].

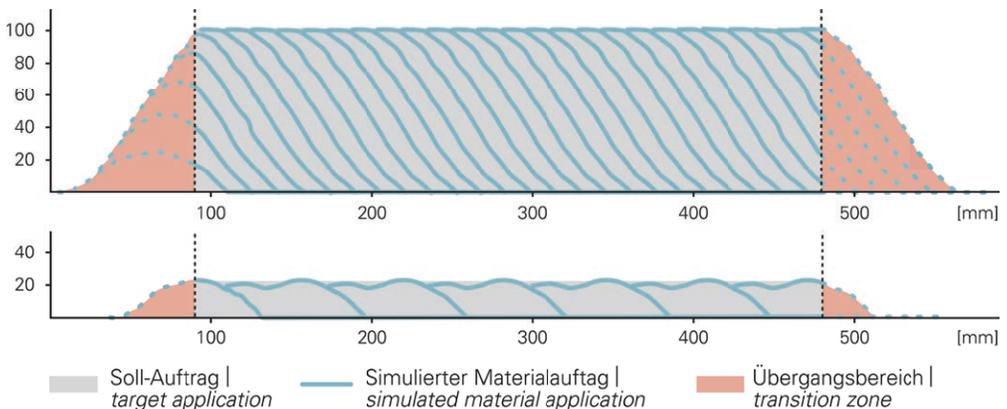


Bild 10: Planung des Materialauftrags für unterschiedliche Schichtdicken durch Variation des Bahnabstandes | Fig. 10: Material application strategy for different layer thicknesses by a variation of the path distance

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

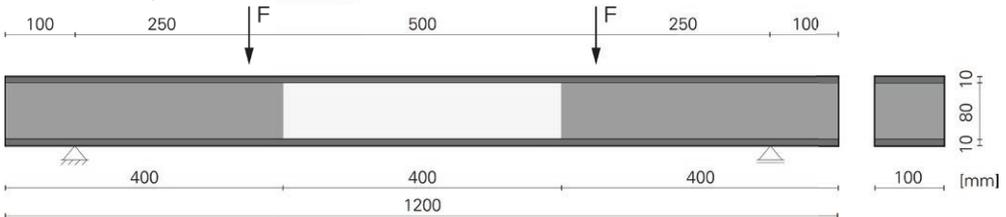
6.1 Specimens of the test series (ILEK)

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

mensionen und 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		MI/G50/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.

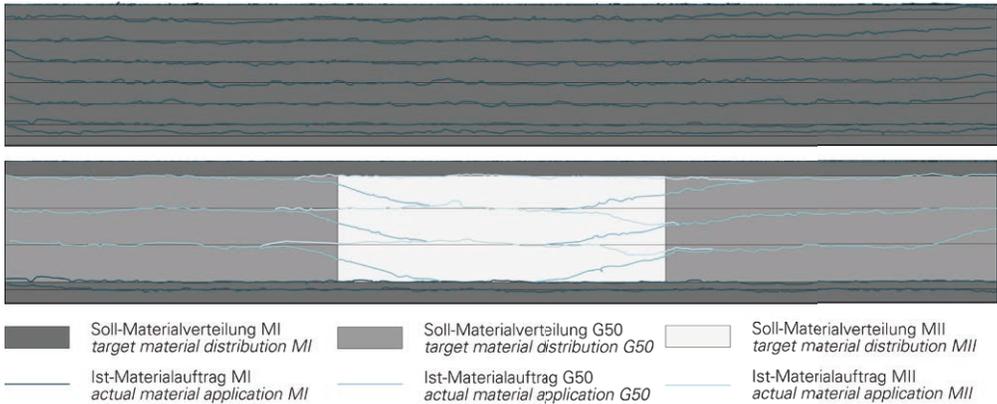


Bild 12: Gegenüberstellung von Soll-Materialverteilung und gemessenem Schichtauftrag je eines Probekörpers der Versuchsserien RL (oben) und KL (unten) | **Fig. 12:** Comparison of the target material distribution with the measured material application of one test specimen each of series RL (top) and 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.

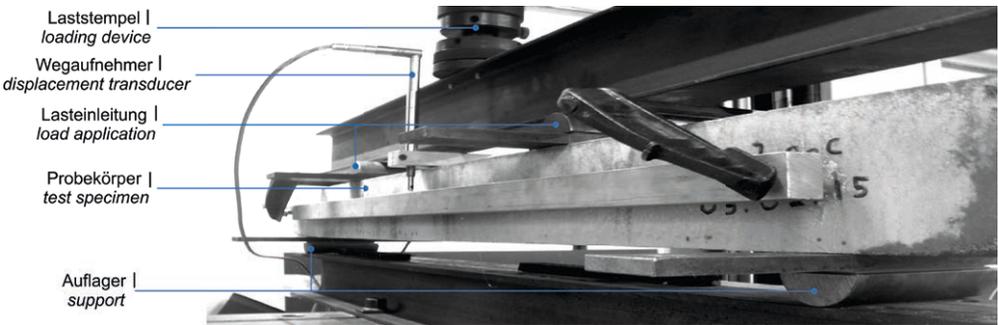


Bild 13: Versuchseinrichtung | Fig. 13: Test setup

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

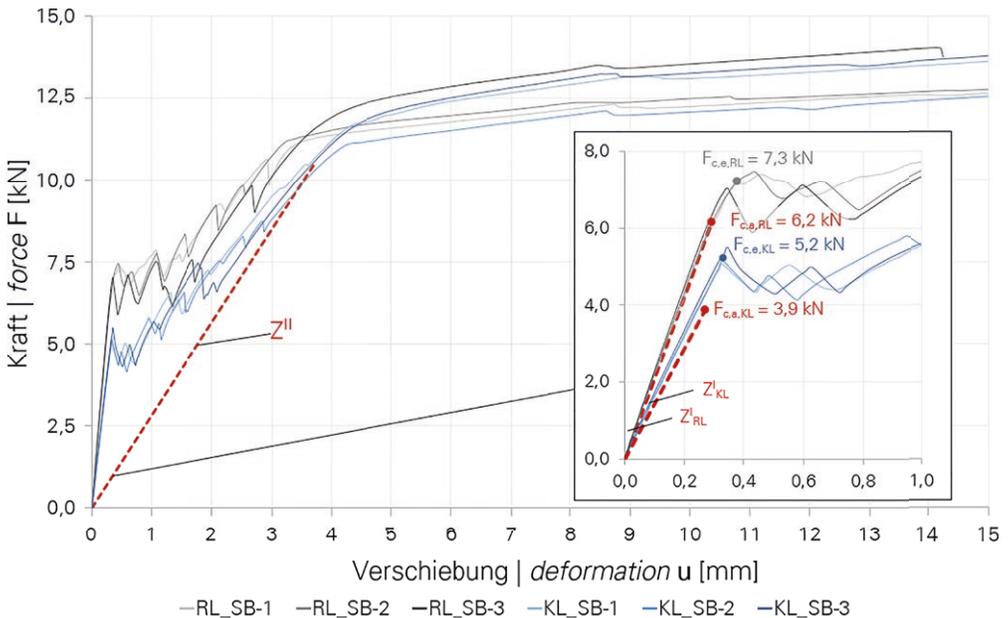


Bild 15: Kraft-Verformungsdiagramm der stahlbewehrten Versuchsserie RL_{SS} (grau) und KL_{SS} (blau); in Rot sind die analytisch berechneten Kraft-Verformungsbeziehungen im Zustand I und Zustand II dargestellt | **Fig. 15:** Force displacement diagram of the steel reinforced test specimen RL_{SS} (grey) 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

