



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

SILKE SCHEERER, MANFRED CURBACH (HRSG.)

LEICHT BAUEN MIT BETON

**FORSCHUNG IM
SCHWERPUNKTPROGRAMM 1542
FÖRDERPHASE 1**

Neuartige Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkelemente aus UHPFRC

Sven Lehmborg¹
 Jeldrik Mainka²
 Lukas Ledderose²
 Harald Budelmann¹
 Harald Kloft²

¹ Institut für
 Baustoffe,
 Massivbau und
 Brandschutz,
 TU Braunschweig

² Institut für
 Tragwerksentwurf,
 TU Braunschweig

Durch die digitale Entwicklung und Fertigung von Fertigteilen gewinnen Bauteile an struktureller Effizienz sowie Komplexität. Dies führt dazu, dass Bauteile aus ultrahochfestem faserverstärktem Beton (UHPFRC) aufgrund der hohen Festigkeit mit geringen Wandstärken und ohne zusätzliche Bewehrung hergestellt werden können. Um die hochpräzise gefertigten Bauteile zu einem Gesamttragwerk zu verbinden, muss die trockene Fügung von Beton genauer untersucht werden. Die Erforschung dieser neuen Bauweise für Stabwerk- und Flächenelemente ist das Ziel des Teilprojektes im DFG-Schwerpunktprogramm 1542 *Leicht Bauen mit Beton*. Die Erkenntnisse zum ganzheitlichen Ansatz des „Digital Workflow“ vom Design bis zum Bauteil werden in diesem Beitrag dargestellt. Dafür werden für einzelne Stabwerk- und Flächenelemente numerische und experimentelle Ergebnisse vorgestellt.

1 Einleitung

Trotz der enormen Entwicklungen in der digitalen Planung und Fertigung wird unser Denken im Bauwesen immer noch vom Standard der industriellen Fertigung geprägt. Die aus Stahl und Holz produzierten Profile und Halbzeuge, ebenso wie die marktüblichen Schalungssysteme für Betonbauteile, implizieren eine möglichst einfache Geometrie und Fügung. Demzufolge sind heutige Tragkonstruktionen überwiegend aus biegebeanspruchten, masseintensiven Bauteilen zusammengesetzt. Leichte formaktive Tragwerke, wie beispielsweise die 1972 erbaute Lufthansa-Wartungshalle V am Frankfurter Flughafen, werden heute hingegen kaum noch gebaut. In Zukunft wird dem effizienten Einsatz von Material und Energie eine entscheidende Bedeutung für die Umsetzung einer nachhaltigen Bauwirtschaft zukommen. Statt Komplexität auf Kosten erhöhter Massen zu vermeiden, wird es zukünftig vielmehr darum gehen, Material durch strukturelle Effizienz einzusparen. Die Chance hierzu liegt in der Zusammenführung der neuesten Entwicklungen im Bereich der Materialtechnologien mit denen der digitalen Planung und Fertigung.

Ziel muss es sein, für Hightech-Werkstoffe – wie ultrahochfesten Stahlfaserbeton (UHPFRC) – dem Material angemessene Konstruktionen und Fügeprinzipien zu entwickeln, die trotz gesteigerter Komplexität wirtschaftlich zu fertigen sind. Hier setzt die Forschung des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) und des Instituts für Tragwerksentwurf (ITE) der TU Braunschweig im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogrammes 1542 *Leicht Bauen mit Beton* an. Im Teilprojekt mit dem Thema *Entwicklung neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkelemente aus UHPC* werden die neuesten Erkenntnisse im Bereich von UHPC mit den Möglichkeiten der CNC-gesteuerten Fertigungstechnik für Formenbau zusammengebracht, um innovative Leichtbaustrukturen und deren Fügeprinzipien aus Beton zu entwickeln [1]. In der ersten Förderperiode ist das Hauptziel die detaillierte Grundlagenuntersuchung des Tragverhaltens für Verbindungselemente von Fertigteilen aus UHPFRC für modulare Stabwerk- und Flächenelemente. Da es unmöglich ist, im Rahmen der Forschungstätigkeit alle Tragwerkelemente in ihrer geometrischen Vielfalt zu untersuchen, wurde die Arbeit exemplarisch an drei Struktur- bzw. Verbindungstypen ausgeführt:

1. Trockenstoßverbindungen zur Fügung von rohrförmigen linearen Stabwerkbauteilen (1D),
2. Stabwerkknotenelemente zur Verbindung von drei linearen Stabwerkbauteilen (2D),
3. Trockenstoßverbindungen zur Fügung von ebenen und gekrümmten Flächenbauteilen (3D).

In Analogie zu der durchgeführten Forschungsarbeit werden die numerisch und experimentell durchgeführten Untersuchungen in diesem Beitrag vorgestellt.

2 Formgebungsprinzipien

2.1 Digital Workflow

Als „Digital Workflow“ werden Produktionsprozesse bezeichnet, bei welchen Bauteile von der Planung bis zur Fertigung in einem digital kontrollierten Prozess hergestellt werden. Diese Entwicklung hat in den letzten Jahren im Bereich des Bauwesens vor allem zu einer gesteigerten Komplexität geführt, wobei die gewünschte architektonische Form leider oft nicht mit struktureller Effizienz verbunden ist [2] (Bild 1). Vor allem im Betonbau ist festzustellen, dass die neuen Chancen zur freien Formbarkeit des Materials durch den Einsatz digitaler Werkzeuge bisher wenig genutzt wurden.

Als Grund hierfür wird häufig die mangelnde Wirtschaftlichkeit angeführt. Dabei ist gerade die Ausnutzung der geometrischen Steifigkeit durch Krümmung und Faltung der entscheidende Vorteil von frei geformten Konstruktionen im Hinblick auf die Entwicklung ressourceneffizienter Tragstrukturen. Dies zu ändern und strukturelle Effizienz wirtschaftlich umzusetzen, wird in Zukunft eine der wesentlichen Aufgaben sein. Dem konstruktiven Detail und der Fügung kommen hierbei eine Schlüsselrolle zu. War es in der vordigitalen Zeit Standard, eine große Stückzahl möglichst gleicher Elemente herzustellen und mit einfachen Details zu verbinden, um wirtschaftlich zu bauen, stellen Wirtschaftlichkeit und Individualität heute mit den vorhandenen digitalen Techniken keinen Widerspruch mehr dar.

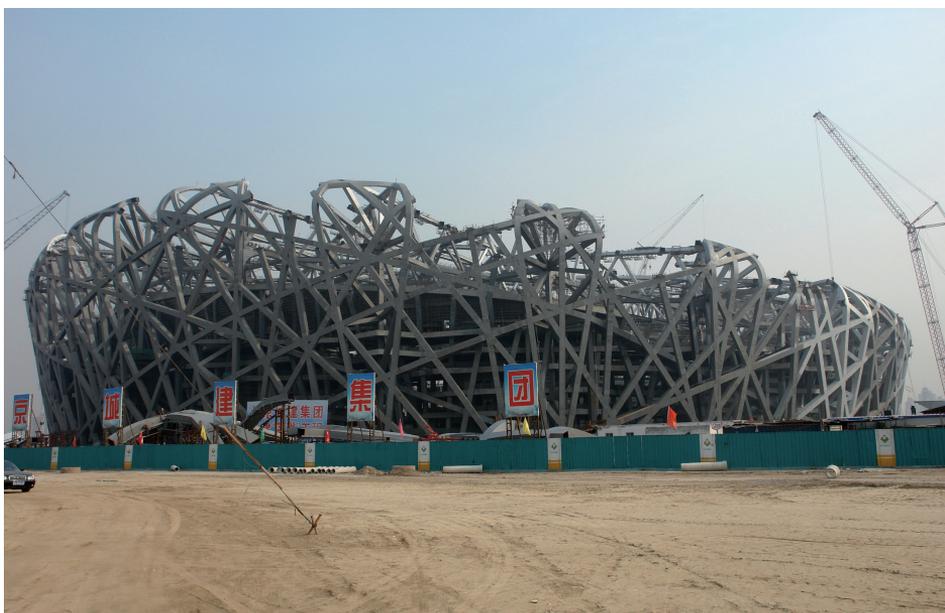


Bild 1: Das „Vogelnest“ genannte Nationalstadion in Peking

[Foto: Harald Kloft]

2.2 Materialeigenschaften

Die im Forschungsprojekt einheitlich verwendete UHPFRC-Rezeptur FK1-2,5, siehe Tabelle 1, wurde aus der Referenzmischung M2Q der Universität Kassel [3], die im Rahmen des SPP 1182 entwickelt wurde, für die Verwendung bei dünnwandigen Bauteilgeometrien am iBMB weiterentwickelt.

Tabelle 1: Ausgangsstoffe des verwendeten UHPFRC FK1-2,5

| Ausgangsstoff | Masse [kg/m ³] |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Zement CEM I 52,5 R HS-NA | 595 |
| Silikastaub | 69 |
| Quarzmehl I | 314 |
| Quarzmehl II | 119 |
| Quarzsand | 1029 |
| Mikrostahlfasern (d/l = 0,15 / 9 mm) | 192 |
| Fließmittel | 40 |
| Wasser | 156 |

Entwicklungskriterien waren die zu gewährleistenden selbstnivellierenden und selbst-entlüftenden Eigenschaften bei gleichzeitig hohen Druck- und Zugfestigkeiten. Der Einsatz von Stahlfasern, welche ein gutes Nachbruchverhalten des spröden UHPC sicherstellen, ermöglicht es, auf konventionelle Bewehrung zu verzichten. Auch der Einsatz von Vorspannsystemen ohne zusätzliche Stahleinbauteile kann damit realisiert werden.

Es handelt sich bei den vorgestellten Arbeiten um Grundlagenforschung, sodass zur Designoptimierung der Bauteilgeometrien mittels numerischer Analyse Mittelwerte aus Materialprüfungen verwendet werden, welche in Tabelle 2 dargestellt sind. Diese wurden anhand von Standardprüfungen ermittelt.

Tabelle 2: Materialkennwerte des UHPFRC FK1-2,5

| Mechanische Eigenschaft | Mittelwert |
|--------------------------|------------|
| Druckfestigkeit | 151 MPa |
| Einachsige Zugfestigkeit | 10 MPa |
| Elastizitätsmodul | 46,7 GPa |
| Querdehnzahl | 0,18 |

Als Voruntersuchungen wurden am iBMB von HERMERSCHMIDT & BUDELMANN [4] Tests zur Kerbempfindlichkeit durchgeführt. Dabei ist die Kerbempfindlichkeit als das Verhältnis der Versagenslast einer gekerbten Probe zu der eines ungekerbten Querschnitts definiert. Die Versuche ergaben, dass für Ausrundungsradien größer als 5 cm kein Einfluss der Kerbwirkung auf Prüfkörper aus UHPFRC FK1-2,5 mehr festzustellen ist. Allerdings reagiert der UHPFRC empfindlicher auf Einkerbungen als Normalbeton. Im Vergleich zu dreieckigen und halbrunden Kerben bewirkten Kerben in Form eines flachen Kreissegmentes die geringste Beeinträchtigung der Traglast.

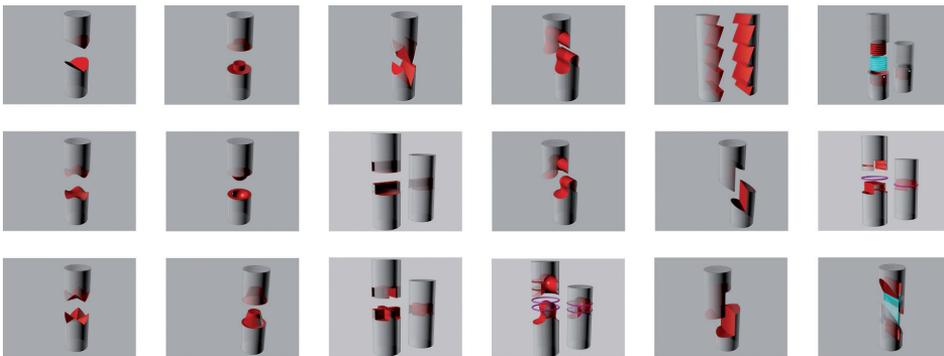
3 Modulare Stabtragwerke

In der ersten Hälfte des Forschungsprojekts wurden Non-Standard-Fügeprinzipien für dünnwandige Stabquerschnitte entwickelt. Mit diesen Trockenstoßverbindungen zur Fügung von rohrförmigen linearen Stabwerkbauteilen ist es möglich, vorgefertigte Stabelemente als Module herzustellen und auf der Baustelle trocken zu fügen. Durch die Verwendung von Vorspannung zur Überdrückung der Verzahnung ist eine Kraftübertragung in verschiedene Richtungen möglich. Ziel ist es, die Traglast des Tragelementes in der Stoßfuge ohne Schwächung zu übertragen.

3.1 Geometrische Verzahnung durch trockene Fügung

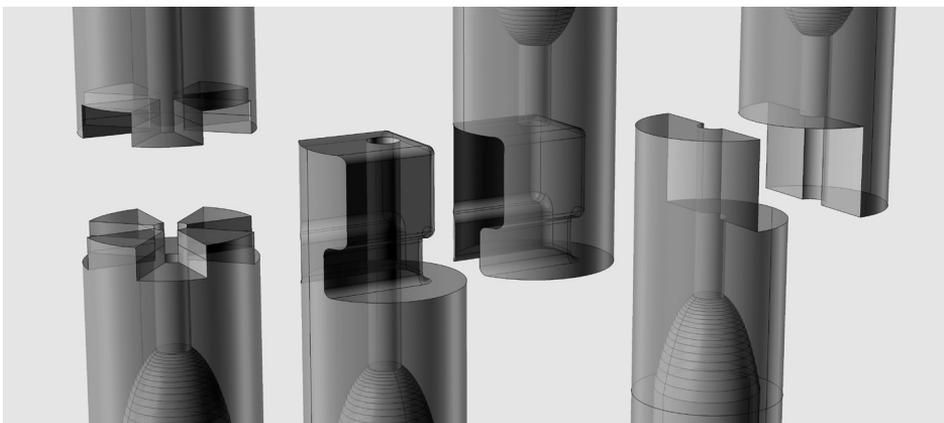
In einem ersten Schritt wurden vielfältige Konstruktionsprinzipien für Stoßverbindungen von Stäben entwickelt (Bild 2). Zur Erstellung aller dreidimensionalen Geometrien wurde das CAD-Programm Rhinoceros® verwendet. Für die typologische Entwicklung möglicher Verbindungstypen wurden folgende Designkriterien herangezogen:

- Hauptkraftübertragung: Druck, Zug, Querkraft und Moment, Torsion,
- Herstellbarkeit: Gießen, Fräsen, Sägen, Schleifen und
- Fügerichtung / Montage: axial, quer, schräg, radial.



*Bild 2:
Designstudie zu
unterschiedlichen
geometrischen
Verzahnungen aus
UHPFRC FK1-2,5
[5]*

In enger Zusammenarbeit der beiden beteiligten Institute iBMB und ITE wurde aus den vielfältigen Konstruktionsprinzipien eine Auswahl von drei Stoßverbindungstypen für den aus Vorspannung druckbeanspruchten Trockenstoß getroffen. Die verschiedenen Typen tragen den unterschiedlichen Anforderungen bei der Montage eines möglichen Stabtragwerks Rechnung. Die in Bild 3 dargestellten Stoßvarianten A, B und C zeigen einen Zwischenstand der entwickelten und optimierten, trockenen Stoßverbindungen.



*Bild 3: Stoß-
varianten A (links),
B (Mitte) und
C (rechts) nach
erster rechneri-
scher Optimie-
rung [5]*

3.1.1 Kraftweiterleitungsbereiche zwischen Stoß- und Stabquerschnitt

Bevor die drei ausgewählten Stoßverbindungstypen auf ihre Tragfähigkeit geprüft werden konnten, wurde in einem Zwischenschritt der Kraftweiterleitungsbereich zwischen Stoßquerschnitt – dort liegt nahezu ein Vollquerschnitt vor – und rohrförmigem Stabquerschnitt untersucht. Die Aufweitung des Querschnittes ist notwendig, da die eigentliche Stoßkontaktfläche aufgrund von Imperfektionen in der Herstellung eine Schwachstelle darstellt und auf ihrer Oberfläche nicht die Maximalspannungen des UHPFRC erträgt. Durch die Vergrößerung der Fläche wird eine Verringerung der Spannungen in der Stoßkontaktfläche erwirkt. Als Referenzgeometrie für die Kraftweiterleitungsbereiche wurden Katenoide, Zylinder, Halbkreise und Ellipsen als Krafteinleitungsbereich rechnerisch und experimentell überprüft. Diese geometrischen Formen zeigt anschaulich Bild 4, wo sie als Verdrängungskörper in den Acrylglasschalungen für die spätere Betonierung zu sehen sind.



Bild 4: Vorbereitung für die Herstellung der Versuchskörper; zu sehen sind hier die zusammengesetzten Schalungen für die Realisierung der Krafteinleitungsbereiche [5] [Foto: ITE]

In der numerischen Analyse der ausgewählten Krafteinleitungsbereiche wurde ein großer Einfluss der Vernetzung, des Elementtyps und der verwendeten Geometrie festgestellt. Es zeigte sich, dass der Versagensort in der nichtlinearen numerischen Berechnung, resultierend durch die auftretenden Schubspannungen jedoch auch für die experimentellen Versuche zutreffend ist (siehe Bild 5). Des Weiteren wurde erkannt, dass der Schubbruch am Übergang zum Vollquerschnitt auftritt. Die optische Verformungsmessung bestätigte in Versuchen zusätzlich das Ausbeulen, welches bereits in der numerischen Analyse den Versagensort ankündigt.

3.1.2 Herstellung

Da es sich bei den entworfenen Stoßverbindungen um exakt herzustellende komplexe Geometrien handelt, sind für die Herstellung der Schalung traditionelle bzw. manuelle Verfahren wenig geeignet. Die Herstellung dieser Schalungen ist in einem wirtschaftlichen Rahmen nur durch die Verwendung von CNC-gesteuerten additiven oder subtraktiven Formgebungsverfahren möglich. Mit der hier verwendeten CNC-Fräse wird eine Oberflächentoleranz von $\pm 0,05$ mm erreicht.

Für die Versuchskörper für die experimentelle Untersuchung der Krafteinleitungsbereiche sowie der Stoßverbindungen besteht die Schalung des Kernes aus in einzelnen Lagen CNC-gefrästem Styrodur (XPS) mit Silikonüberzug. Die Styrodurkerne mit einem Durchmesser von 70 mm dienen zur Formgebung des Kraftüberleitungsbereiches vom Rohr- auf den breiteren Stoßquerschnitt (Bild 4) und konnten ausreichend genau gefräst werden. Für die Stoßverbindungen, welche eine sehr hohe Anforderung an die Genauigkeit der Schalung stellen, wird als Schalungsmaterial für den Stirnbereich bzw. die Stoßfläche ein hartes Polyoxymethylen (POM) gewählt, welches sich im CNC-Fräsvorgang sehr gut und exakt bearbeiten lässt und das auch während des Betonierens formstabil bleibt.

Für die Stöße wurde ein Baukastenprinzip entwickelt, bei dem es für jeden Stoßflächentyp ein entsprechendes Schalungselement gibt, mit welchem der entsprechende Stoß hergestellt werden kann. Die Außenhülle der Schalung besteht aus einem Acrylrohr mit

einem Innendurchmesser von 100 mm und einer Wandungsstärke von etwa 5 mm. Zur Fixierung und exakten, lotrechten Ausrichtung der einzelnen Schalungskomponenten dienen M8-Gewindestangen, welche die gefräste POM-Stirnplatte mit der gefrästen Kopfplatte aus Brettschichtholz verbinden. Aus den optimierten Stoßseriengeometrien A, B und C (Bild 3) werden mithilfe dieser Schalungen die entsprechenden UHPFRC Probekörper der Serien für die Prüfung hergestellt.

3.1.3 Prüfung

Die Versuche zu den unterschiedlichen Kräfteinleitungsbereichen zeigen, dass ein Versagen grundsätzlich im oberen Bereich der Kraftumlenkung auftritt und die Kraftumlenkungsgeometrie einen geringen Einfluss auf die Traglast hat. Die in der numerischen Simulation erhaltenen großen horizontalen Verformungen oberhalb der Kraftumlenkung konnten ebenfalls kurz vor dem Erreichen der Traglast im Versuch gemessen werden [6], was Bild 5 verdeutlicht. Dieser kritische Bereich ist zudem durch die höchste Schubbeanspruchung gekennzeichnet.

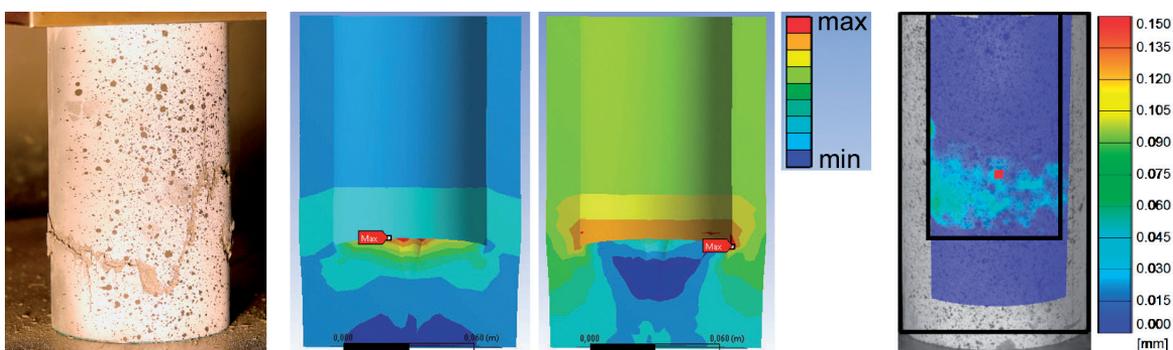


Bild 5: Vergleich von Theorie und Praxis: zu sehen sind ein Prüfkörper, der im Stoßbereich zylindrisch geformt war, nach dem Versagen im Druckversuch, die zuvor in der Modellierung ermittelten maximalen Hauptspannungen und maximalen Schubspannungen bei rechnerischer Bruchlast und rechts ein Ergebnis der optischen Verformungsmessung, nämlich die horizontale Verschiebung kombiniert mit einem Schnitt durch den Probekörper nach dem Versuch, [5] und [6]. [Quelle: iBMB]

Im Versuch beträgt die Abweichung der Traglast gegenüber einem ungestörten Rohrquerschnitt maximal 20 % (Tabelle 3). Auffällig ist die große Abweichung bei der Zylinder- und Halbkreisgeometrie, welche auf die in Kapitel 3.1.1 genannten Gründe zurückzuführen ist.

Tabelle 3: Experimentelle Ergebnisse der Versuche zu den Kräfteinleitungsbereichen

| Querschnitt | Traglast im Versuch $f_{cc,max,exp}$ [MPa] | Versuchslast im Verhältnis zur Referenz $f_{cc,max,exp} / f_{cc,max,exp, Rohr}$ | Traglast aus Simulation $f_{cc,max,calc}$ [MPa] | Verhältnis Rechnung zu Versuch $f_{cc,max,calc} / f_{cc,max,exp}$ |
|-------------|--|--|---|--|
| Rohr | 151 | 100 % | 151 | 100 % |
| Zylinder | 135 | 89 % | 57 | 43 % |
| Halbkreis | 121 | 80 % | 41 | 34 % |
| Ellipse | 128 | 85 % | 105 | 82 % |
| Katenoide | 136 | 90 % | 97 | 72 % |

Für die Probekörper der Trockenstoßverbindungen (Serien A, B und C) wurde die Katenoide (Kettenliniengeometrie) für den Krafteinleitungsbereich gewählt, da diese die tragfähigste Geometrie darstellt. Die an diesen Probekörpern (Bild 6) durchgeführten Versuche zeigen ebenfalls ein Versagen im Kraftumlenkungsbereich und kein Versagen des eigentlichen Stoßbereichs. Der Vergleich der Versuchsergebnisse des katenoiden Krafteinleitungsbereiches (Tabelle 3) mit denen der Trockenstoßverbindungen der Serie A (Tabelle 4) zeigt die nahezu gleich hohen Traglasten. Da die Abminderung zum ungestörten Rohrquerschnitt vorwiegend auf die Kraftumlenkung zurückzuführen ist, wurde im Folgenden das Zusammenspiel von der Geometrie des Kraftumlenkungsbereiches und der Fügung weiter untersucht. Die Herausforderung der weiteren Optimierung des Stoßes zum Übertragen der vollen Rohrtragfähigkeit liegt, außer in der Ausbildung der Stoßfläche, vor allem in der Ausbildung des Krafteinleitungsbereiches.

Tabelle 4: Versuchsergebnisse der Rohrquerschnitte und der Trockenstoßverbindungen Serie A, B und C

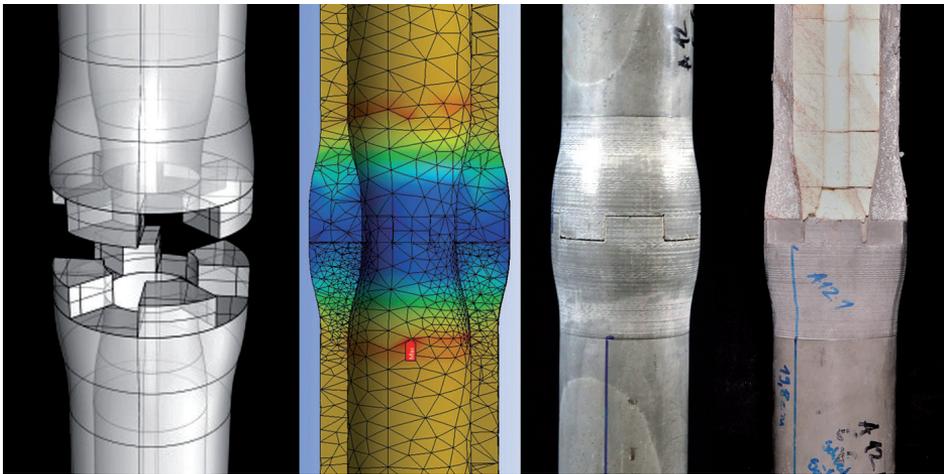
| Querschnitt | Traglast im Versuch $f_{cc,max,exp}$ [MPa] | Versuchslast im Verhältnis zur Referenz $f_{cc,max,exp} / f_{cc,max,exp,Rohr}$ |
|-------------|---|---|
| Rohr | 151 | 100 % |
| A8 | 129 | 85 % |
| B5 | 113 | 75 % |
| C4 | 126 | 83 % |

Obwohl sich mithilfe der durchgeführten nichtlinearen, numerischen Berechnungen die maximale Traglast der Stoßverbindungen nicht exakt bestimmen lässt, kann der zu erwartende Versagensort im Bereich der maximalen Schubspannung, resp. Lastumlenkung, gut bestimmt werden. Der Vergleich der numerischen Untersuchung der Trockenstoßverbindung A8 mit dem geprüften Probekörper A8 (siehe die beiden linken Teilbilder in Bild 6) zeigt dies anschaulich. Anhand des so ermittelten Versagensortes wurden die Geometrien der Trockenstoßverbindungen weiter optimiert mit dem Ziel, die gesamte Traglast des UHPFRC-Rohrquerschnittes übertragen zu können.



Bild 6: Versuche an Trockenstoßverbindungen: berechneter Schubkraftverlauf (hier für Serie A8, die roten Bereiche sind am stärksten, die blauen am schwächsten ausgelastet) und gefügte Probekörper nach dem Druckversuch: Serie A8, B5 und C4 (von links nach rechts) [Quelle: iBMB]

Um dies zu erreichen, wurde der Querschnitt der Serie A in einem weiteren Optimierungsschritt symmetrisch nach außen und innen aufgedickt, was in Bild 7 zu sehen ist. Dadurch konnten im Vergleich zur asymmetrischen Aufdickung nach innen (Bild 6) die entstehenden Schubspannungen in der numerischen Simulation deutlich verringert werden. Auch die am Probekörper A12 durchgeführten Versuche zeigen, dass durch die geometrische Optimierung der Verbindung die von den Stäben aufnehmbare Traglast sowohl durch den Krafteinleitungsbereich als auch durch die Stoßfläche weitergeleitet werden kann. Dies führt zu einem Versagen im Rohrquerschnitt (rechts im Bild 7). Das Verbindungselement stellt somit keine Schwachstelle einer möglichen modularen Stabwerkkonstruktion mehr dar.

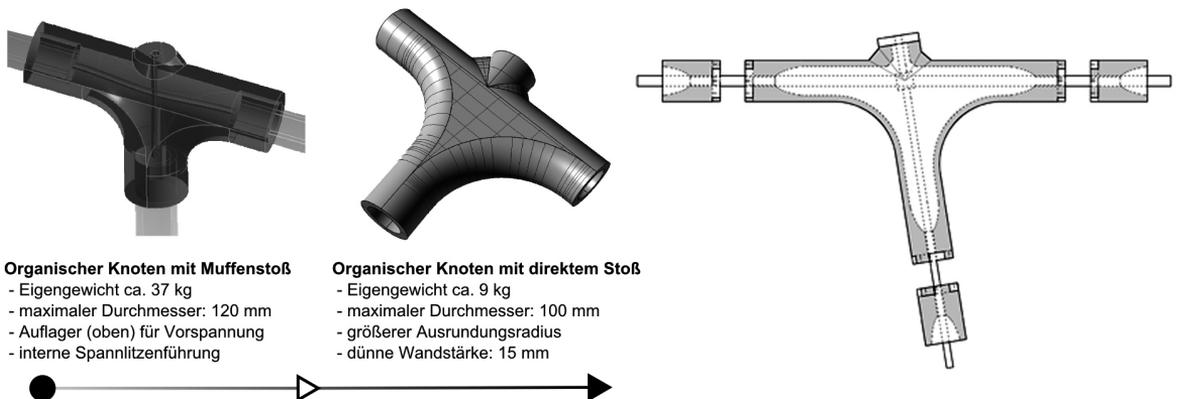


*Bild 7:
Stoßserie A12 mit
symmetrischer
Aufweitung:
CAD-Zeichnung,
berechnete
maximale Schub-
spannungen sowie
hergehaltener und
geprüfter Probe-
körper mit Schub-
versagen
im oberen Rohr-
bereich*

[Quelle: ITE]

3.2 Stabwerkknotenelemente zur Verbindung von drei linearen Stabwerkbauteilen

Im ersten Schritt wurde der Anschlusstyp einer Muffenverbindung zwischen Rohr und Knoten untersucht (Bild 8 links). Durch die Vorgabe einer Betonzugfestigkeit von 10 MPa ergab sich numerisch eine erforderliche Wanddicke der Muffen von 10 mm für die Übertragung der Momente und Normalkräfte aus dem Stab. Das hohe Gewicht, der hohe Einfluss der Passgenauigkeit einer Muffenverbindung auf die Tragfähigkeit sowie ästhetische Defizite eines solchen Knotens führen zum Verwerfen dieser Lösung mit der daraus folgenden Idee, den Stoß aus dem unmittelbaren Knotenbereich heraus zu verlagern (Bild 8 Mitte). Dadurch konnten die Knotengeometrie deutlich schlanker ausgeführt und die Stoßverbindungen selbst separat (vgl. Kapitel 3.1) entwickelt und untersucht werden. Außerdem konnten die Wanddicke des Knotens auf 15 mm reduziert und der Ausrundungsradius der Schenkel vergrößert werden, um somit ein größeres Biegemoment abtragen zu können. Durch späteres Zusammenführen des gewichtsoptimierten organischen Knotens und der Trockenstoßverbindungen zur Fügung von rohrförmigen, linearen Stabwerkbauteilen (Bild 8 rechts) entsteht so ein Verbindungselement für modulare Stabwerkelemente aus UHPFRC-Fertigteilen.



Organischer Knoten mit Muffenstoß
- Eigengewicht ca. 37 kg
- maximaler Durchmesser: 120 mm
- Auflager (oben) für Vorspannung
- interne Spannleitenführung

Organischer Knoten mit direktem Stoß
- Eigengewicht ca. 9 kg
- maximaler Durchmesser: 100 mm
- größerer Ausrundungsradius
- dünne Wandstärke: 15 mm

Bild 8: Knotenentwicklung: Organischer Knoten mit Vorspannung und Muffenstoß (links), gewichtsoptimierter organischer Knoten (Mitte), gewichtsoptimierter organischer Knoten mit angeschlossenen Trockenstoßverbindungen zur Fügung von rohrförmigen linearen Stabwerkbauteilen (rechts) [5]

Zur Aussteifung der Auflagerfläche für die vertikalen Spannritzen auf der Oberseite des Knotens wurde durch eine Verbreiterung des Querschnitts unter 45° ein „Kragen“ auf dem Knoten abgesetzt. Beim Entwurf des Knotens selbst stand als Ziel ein leichter Knoten mit der Wandstärke des gewählten Rohrquerschnitts im Vordergrund. Dieser bedurfte hinsichtlich seiner Tragfähigkeit und Herstellbarkeit der weiteren Untersuchung und Optimierung.

3.2.1 Herstellung der Knotenelemente

Die Knoten dienen der Kraftumlenkung im Tragwerk. Da es sich, je nach Lage und Belastung im Tragwerk, um optimierte Bauteile handelt, unterliegen sie einer erhöhten Variation in Form und Gestalt. Aus diesem Grund ist eine Wiederverwendbarkeit der Schalungen, wie bei den Stoßflächen, nicht gegeben. Um einen vertretbaren Erstellungsaufwand der Knotenschalungen sicherzustellen, werden geringere Anforderungen an die Maßhaltigkeit der Knotenaußenwände gestellt (etwa $\pm 0,5$ mm im Vergleich zu $\pm 0,05$ mm im Stoßbereich). Durch diese geringeren Anforderungen können schneller zu bearbeitende Schalungsmaterialien wie Polystyrol oder Wachs verwendet werden.

Besonders Wachs, wie es bereits durch GRAMAZIO und KOHLER im Tailorcrete-Projekt für Betonschalungen verwendet wird [7], stellt eine nachhaltige und umweltschonende Alternative zu GFK beschichtetem Polystyrol dar. Aus diesen Gründen wurde für die Außenschalung des Knotens ein Verfahren für Betonschalungen aus Wachs verwendet, welches sich am ITE in der Entwicklung befindet. Der Innenkern wurde, wie bereits bei den Versuchskörpern der Stöße, aus Polystyrol in zwei Halbschalen gefräst, in welche die Spannglieder eingelegt wurden. Anschließend wurde der Innenkern mit den Spanngliedern an den Stirnplatten aus Acrylglas (PMMA) in die Schalung eingesetzt. Alternativ zu den PMMA-Stirnplatten für den Versuchsknoten könnten für die spätere Ausführung in einem Stabwerk an dieser Stelle die gefrästen POM-Stirnplatten zur Erzeugung der Stoßflächen eingesetzt werden.

Während des Betonierens wurde die Schalung langsam aufgerichtet, sodass über die Einfüllöffnung sowie die in die Schalung integrierten Öffnungen ein Entlüften des UHPFRC gewährleistet war. Aufgrund der hydrophoben Eigenschaften von Wachs konnte beim Betonieren weitgehend auf Trennmittel verzichtet werden. Der fertige UHPFRC-Knoten wiegt bei einer Wanddicke von 15 mm nur etwa 9 kg. Der gesamte Herstellungsprozess ist in Bild 9 zu sehen.

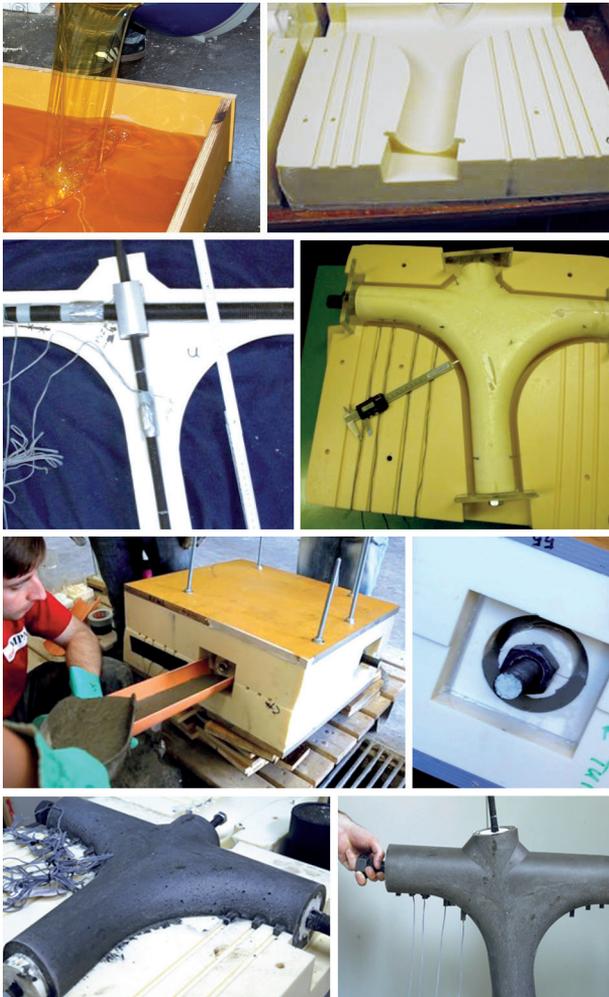


Bild 9: Herstellung der Knotenelemente, von oben nach unten: Fertigung der Außenschalung des Knotens bestehend aus Wachs, Polystyrol-Innenkern mit Spanngliedern und dies in der Außenschalung montiert, Betonieren des Knotens, wobei stetig die Steighöhe des Betons optisch kontrolliert wurde und Ausschalen des fertigen leichten UHPFRC-Knotens [5] [Quelle: ITE & iBMB]

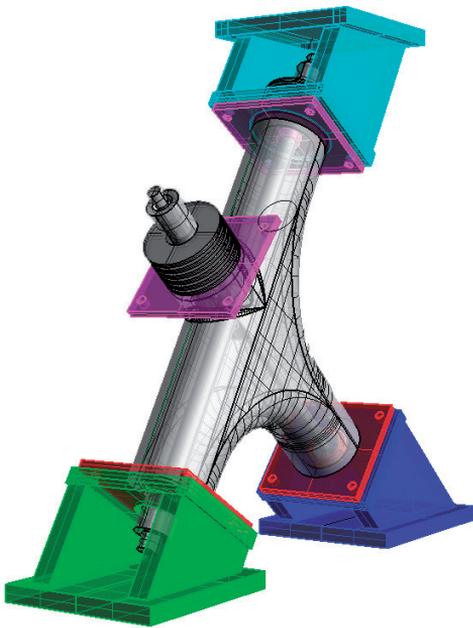


Bild 10: Versuchsaufbau für die Knotenprüfung [5]
[Foto: iBMB]

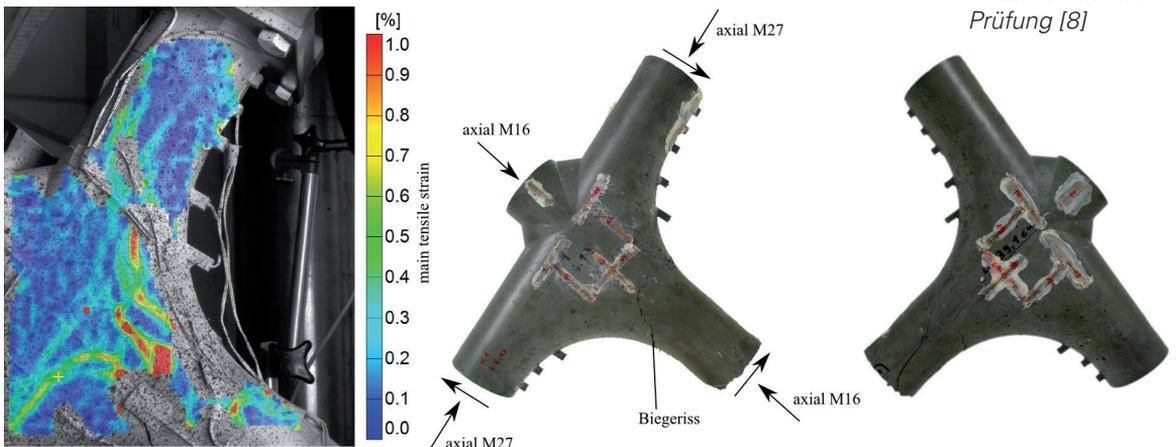
3.2.2 Prüfung der Knotenelemente

Die Prüfung der Knotenelemente erfolgte in zwei Druckversuchen mit unterschiedlichen Auflagerbedingungen. Den Versuchsaufbau zeigt Bild 10. Der Druckversuch wurde weggeregelt mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,01 mm/Minute gefahren.

Prüfung des ersten Knotens

Die Prüfung des ersten Knotens wurde mit unverschieblichen Auflagern durchgeführt. Beim Versuch wurden die axialen Kräfte in den vorgespannten Gewindestangen M27 und M16 gemessen. In der Gewindestange M27 wurde ein Kraftverlust von nahezu 20 kN festgestellt, wogegen in der vorgespannten Gewindestange M16, trotz der verwendeten Tellerfedern, während der Prüfung 20 kN Kraftgewinn zu verzeichnen war. Der Unterschied zwischen der Maschinenkraft F von 100 kN und der axialen Kraft in der Gewindestange M27 zeigt, dass der Knoten einer Querbelastung von fast 80 kN vor dem Versagen standhielt.

Bild 11: Knoten 1 nach dem Test; zu sehen sind die optisch erfassten Zugverformungen und das Rissmuster dieses ersten Knotens nach der Prüfung [8]



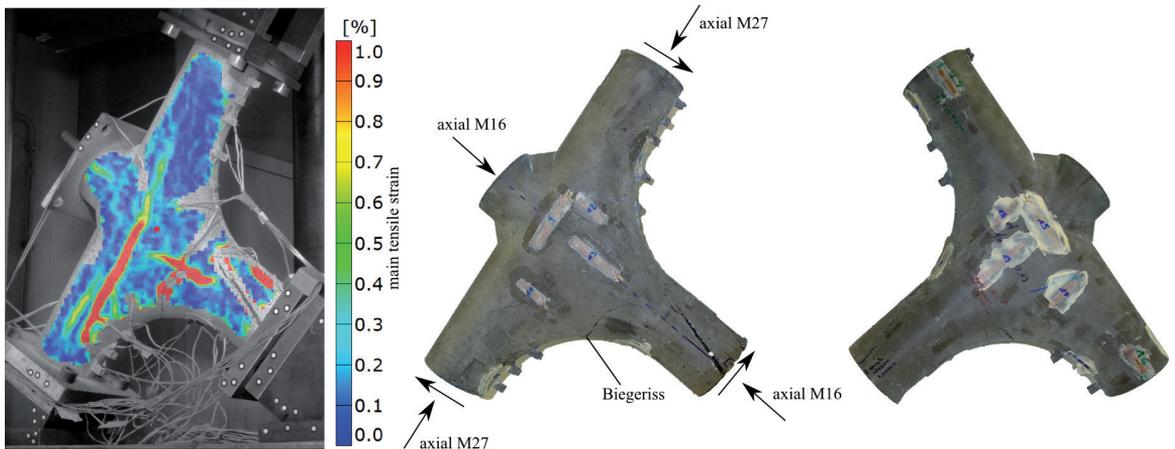


Bild 12: Knoten 2 nach dem Test: zu sehen sind die optisch erfassten Zugverformungen und das Rissmuster des Knotens 2 nach der Prüfung [8]

Prüfung des zweiten Knotens

Bei der Prüfung des zweiten Knotens waren die unteren beiden Auflager verschieblich ausgebildet. Dadurch trat eine Rissbildung im unteren Teil des Knotens auf – im Gegensatz zum ersten Knoten, wo eine Rissbildung vor der Umlenkung im Bereich des Rohres auftrat. Bild 12 links zeigt wieder die optisch gemessenen Hauptzugspannungen zum Zeitpunkt des Erreichens der Bruchlast. Der Haarriss vom unteren linken Rohransatz bis zur Mitte des Knotens ist nach der Prüfung nicht mehr sichtbar, was das sehr duktile Verhalten des UHPFRC mit seinem enormen Kraftumverteilungspotenzial belegt.

Die getesteten Knoten zeigen, dass das Forschungsziel, dünnwandige, leichte UHPFRC-Knoten und -Strukturen zu entwerfen, zu optimieren und zu bauen, möglich ist. Die Testergebnisse in Bezug auf die gute Biegesteifigkeit durch Verwendung von axialer Vorspannung zeigen die Tragfähigkeit von hochpräzisen Fertigteilen in räumlichen Strukturen. Durch einen hohen Stahlfasergehalt des verwendeten UHPFRC kann zudem ein gutes und duktiler Nachrissverhalten erreicht werden.

4 Modulare Flächentragwerke

4.1 Trockenstoßverbindungen zur Fügung von ebenen und gekrümmten Flächenbauteilen (3D)

Im zweiten Teil des Forschungsprojektes wurden die Prinzipien der erforschten hochpräzisen Trockenstoßverbindungen zur Fügung von rohrförmigen, linearen Stabwerkbauteilen auf die Entwicklung von Trockenstoßverbindungen zur Fügung von ebenen und gekrümmten Flächenbauteilen übertragen. Im Vergleich zu den vorgespannten Verbindungen der Stabwerkbauteile sollen die Verbindungen der Flächenbauteile nicht nur Druck und Biegung übertragen, sondern in einem geringen Maße auch Zugkräfte. Auf Grundlage der Stoßtypenserien A und B aus dem ersten Teil des Forschungsprojektes (vgl. Kapitel 3.1) und inspiriert von historischen Holzverbindungen, wurden verschiedene Schwalbenschwanzverbindungen entworfen. Designparameter – vor allem der Zähne – der Schwalbenschwanzverbindungen waren: das Verhältnis von Zahnlänge zu -breite (z. B.: Serie A: 20 mm Breite zu 10 mm Länge) und Verzahnungswinkel der Schwalbenschwanz-Zähne (5°, 10° und 20°). Basierend auf der so entstandenen Matrix als eine Kombination dieser Parameter wurden verschiedene Probekörpergeometrien

entwickelt, optimiert, aus UHPFRC betoniert und getestet. Für die erste Versuchsserie wurde eine konstante Plattendicke von 15 mm gewählt. Alle Zähne haben zudem in Dickenrichtung einen Fügungswinkel von 2°. Die Verbindungstechnik für diese Schwalbenschwanz-Zähne basiert auf dem Prinzip, dass die UHPFRC-Bauteile hoch präzise hergestellt und durch eine Presskraft quer zur Fläche zu einer Verbindung zusammengedrückt werden. Diesen Vorgang zeigt Bild 13. Die so erzeugte formschlüssige Verbindung wird in Fügerichtung durch Reibung der Flanken gehalten und kann aufgrund ihrer Irreversibilität als „Kaltverschweißen von Beton“ angesehen werden.

Um den Einfluss des Zusammenpressens auf die Verzahnungen, zum Beispiel im Hinblick auf eine Mikrorissbildung, zu untersuchen und die Faserorientierung in den Zähnen zu überprüfen, wurden Teile der Versuchskörper im Computertomografen (CT) des iBMB betrachtet. Die Ergebnisse der CT-Untersuchung sind auszugsweise in Bild 14 dargestellt. Die Auswertung hat ergeben, dass sich die Fasern im Kontaktbereich an der Schalung ausgerichtet haben, im Kernbereich der Probe aber eine gute homogene multidirektionale Ausrichtung aufzeigen. In Bezug auf das Fügen der Verzahnung unter Druck wurde festgestellt, dass dieses im Zentralbereich der Probe schadensfrei möglich ist, im Randbereich des kurzen Viertel-Zahnausschnittes, welcher in der Mitte im Bild 14 zu sehen ist, aber ein Riss entstand. Bei der folgenden geometrischen Ausformulierung der Verzahnung wurde daher darauf geachtet, dass die Verzahnung im Randbereich immer mit einem vollen Zahn endet.

Für die zweite Serie in der Evolution der UHPFRC-Schwalbenschwanzverbindungen wurde die ebene Geometrie der Serie 1 lokal aufgeweitet, um die Momententragfähigkeit im Stoßbereich zu erhöhen. In der dritten Entwicklungsstufe der Serie 3 wurden die Zähne aus dem Element herausgelöst, um so die Fügung auf der Baustelle zu erleichtern. Die Verbindung von zwei Flächensegmenten durch Einpassen eines dritten Fügeteils aus UHPFRC ermöglicht es, zwei große Segmente in ihrer endgültigen Lage

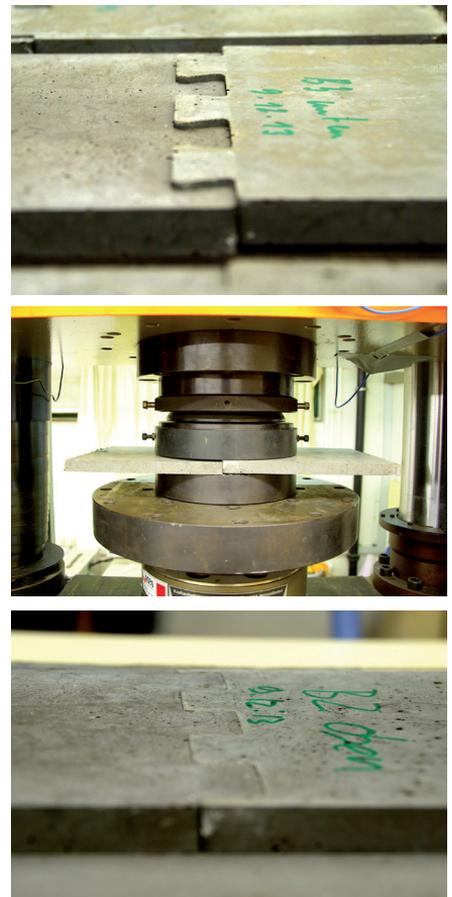


Bild 13: Fügen der hoch präzisen Schwalbenschwanzverbindungen aus UHPFRC durch Zusammenpressen der Zähne [8]
[Fotos: iBMB]

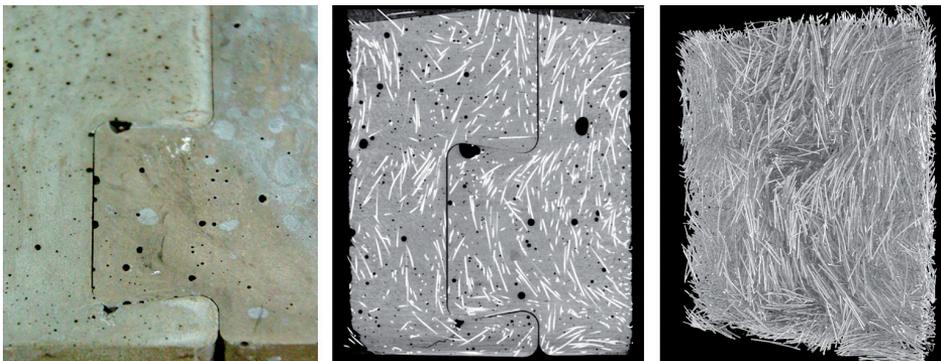


Bild 14: Detaillierte Untersuchung der Verzahnung des UHPFRC-Versuchskörpers; zu sehen sind ein Zahn in der Vergrößerung, das Ergebnis der Prüfung auf Fehlstellen im CT mit erkennbarer Rissbildung im unteren linken Viertelzahn und Visualisierung der 3D-Faserverteilung des UHPFRC im Zahnbereich [Fotos: iBMB]

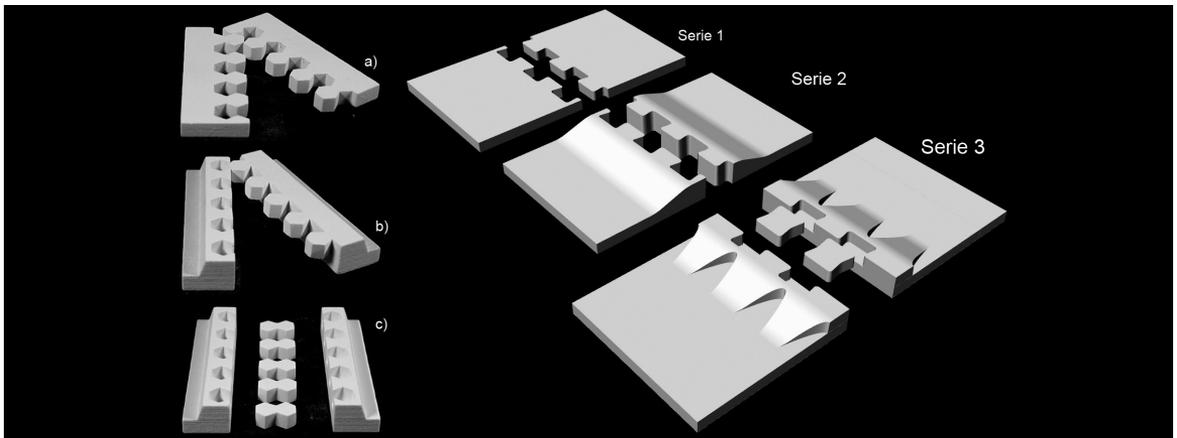


Bild 15: Weiterentwicklung der Schwalbenschwanzverbindungen: links sind alternative Verzahnungsprinzipien als 3D-Gips-Druck zu sehen, Variante a) als flache Verbindung, Variante b) als aufgeweitete Verbindung mit Zug- und Druckzone und Variante c) als fügensoptimierte Verbindung mit Verbindungsimplantat; rechts sind die 3D-Modelle des Evolutionsprozesses der Schwalbenschwanzverbindungen von Serie 1 als ebene Geometrie über Serie 2 mit lokaler Aufweitung im Fügungsbereich bis hin zu Serie 3 als Verbindung durch Einpressen eines dritten Fügeteils zu sehen.

zu positionieren und durch ein zusätzliches Implantat aus UHPFRC formschlüssig zu verbinden (Bild 15 rechts). Um die Parameter Kraftübertragung, Herstellbarkeit und Fügerichtung vorab haptisch überprüfen zu können, wurden vor der eigentlichen Erstellung der UHPFRC-Probekörper reale Gips-Modelle der Evolutionsprinzipien mittels 3D-Printer hergestellt, die links im Bild 15 zu sehen sind.

4.2 Herstellung und Maßhaltigkeit der Probekörper

Für die Herstellung der UHPFRC-Probekörper für die Schwalbenschwanz-Trockenstoßverbindungen kam, wie schon für die Herstellung der Knotenelemente, eine hochpräzise, mittels CNC-Verfahren gefräste Wachsschalung zum Einsatz (Bild 16). Da diese Schalungstechnik bisher noch nicht im Detail erforscht ist, wurden die erstellten Probekörper auf ihre Maßhaltigkeit gegenüber den digitalen 3D-Modellen überprüft, um später eine gleichbleibende Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse gewährleisten zu können.

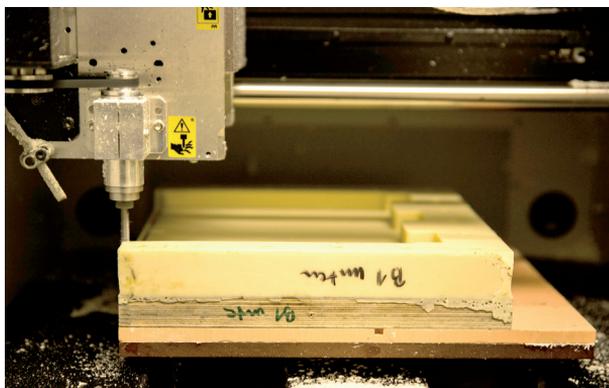


Bild 16: CNC-Bearbeitung eines Wachsblocks, aus dem die Schalungen für die Probekörper für die Schwalbenschwanzverbindungen hergestellt werden [9]

[Foto: ITE]

Zur Vermessung der geometrisch komplexen Probekörper wurde ein hochpräziser optischer 3D-Scanner verwendet. Die Auswertung der Abweichung zwischen 3D-Modell und der 3D gescannten Probe wurde mit dem Programm GOM Inspect® der Firma GOM mbH durchgeführt. Die erreichte Genauigkeit im Vergleich zu den sonst zulässigen Toleranzen im Hochbau gemäß DIN 18202 [10] ist als sehr hoch einzustufen. Unter Verwendung des in GOM integrierten Best-Fit-Skalierungsalgorithmus konnte zudem ein durchschnittliches multidirektionales Schwinden des Probekörpers von 2,35 % berechnet werden. Wird dieses Maß als Zulage für die Schalung verwendet, kann dem Schwindeffekt und somit der entstehenden geometrischen Abweichung

entgegengewirkt werden. Die kleinen Bereiche mit zu viel Material (rot im Bild 17) bzw. zu wenig (dunkelblau) sind auf Positionsabweichungen des Fräskopfes bei der Schalungsherstellung zurückzuführen und konnten durch eine Neujustierung der CNC-Fräse behoben werden.

4.3. Druckprüfung

Die Probekörper aller entwickelten Serien der Trockenstoßverbindungen wurden in einem ersten Versuchsschritt auf ihre Tragfähigkeit unter axialem Druck geprüft (Bild 18). Dabei waren die Platten durch eine feste Einspannung auf der Unterseite und gelenkig oben gelagert. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 0,5 mm pro Minute. Alle untersuchten Trockenstoßverbindungen gewährleisten eine gute Druckkraftübertragung. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die Probekörper versagten allesamt auf Schub im Bereich der Verzahnung. Der Vergleich der geprüften Referenzplatte ohne Stoßverbindung mit den gefügten Verbindungstypen zeigt, dass eine nahezu gleich hohe Tragfähigkeit bei allen Stoßtypen der Serie B erreicht wird. Die durchschnittliche Reduktion im Vergleich zur ungestoßenen Referenz betrug etwa 20 %. Folglich ist das entwickelte, trocken gestoßene Verbindungssystem der Serie B ideal für den Anschluss von druckbelasteten Schalenbauteilen geeignet.

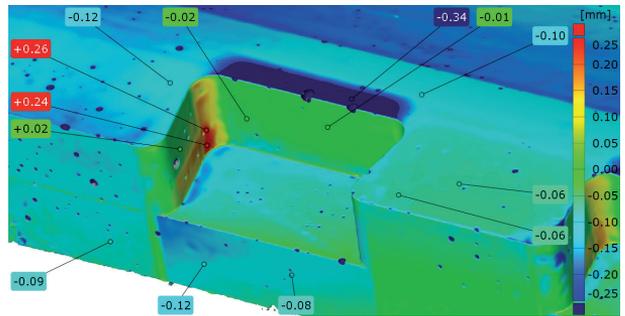


Bild 17: Ermittlung der geometrischen Abweichung zwischen digitalem 3D-Modell und dem gescannten Probekörper mit dem Programm GOM Inspect; hier: Detail der „Bucht“ des Schwalbenschwanzes (Angaben in mm) [9]

Tabelle 5: Maximale Traglast der Stöße für flächige Verbindungen im Druckversuch

| Stoßtyp | Traglast im Versuch $f_{cc,max}$ [MPa] | Verhältnis von Traglast zu Referenz $f_{cc,max} / f_{cc,max,Platte}$ |
|--------------------------|--|--|
| Referenzplatte ohne Stoß | 155 | 100 % |
| A2 | 100 | 65 % |
| B1 | 120 | 77 % |
| B2 | 123 | 79 % |
| B3 | 126 | 81 % |

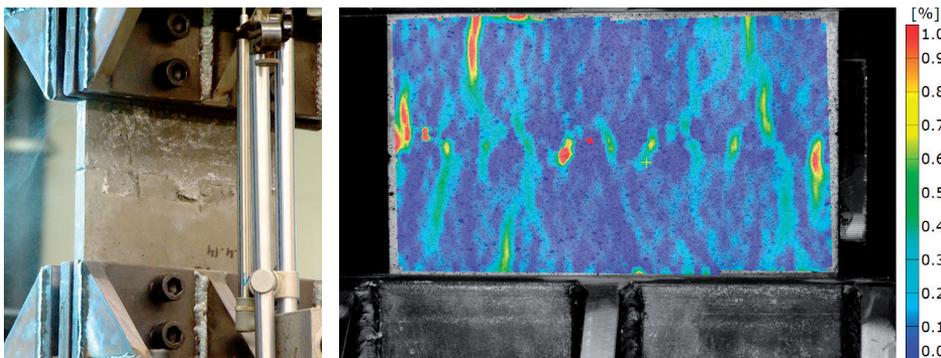


Bild 18: Flächige Stoßverbindung im Druckversuch; zu sehen sind zwei gefügte Platten nach dem Versagen im Druckversuch und ein Ergebnis der optischen Verformungsmessung kurz vor dem Versagen der Probe [8] [Foto: iBMB]



Bild 19: Versuchsaufbau Biegezugprüfung [8]

[Foto: iBMB]

4.4 Biegeprüfung

Die Probekörper aller entwickelten Serien der Trockenstoßverbindungen wurden nach der Druckprüfung erneut hergestellt und im 4-Punkt-Biegeversuch auf ihre Biegezugfestigkeit in der Stoßverzahnung geprüft (Bild 19). Im Vergleich zur axialen Druckprüfung zeigen die Ergebnisse des 4-Punkt-Biegeversuchs (Tabelle 6) große Unterschiede zwischen den Verbindungstypen. Es wurde festgestellt, dass die Zahngröße der Schwalbenschwanzverbindung bei unterschiedlichen Länge : Breite-Verhältnissen einen starken Einfluss auf die Steifigkeit und die Biegefestigkeit der Verbindungen hat. Im Vergleich zur Referenzplatte ohne Stoßverbindung, die eine Biegezugfestigkeit von 15,5 MPa erreicht, kann ein

erheblicher Rückgang für einige der Verbindungsgeometrien festgestellt werden. Die relativ kurzen Zähne zeigten die beste Steifigkeit und die höchste Biegezugfestigkeit, während Proben mit flachen Zahnwinkeln und langen Zähnen ein sehr weiches Biegeverhalten zeigten. Insgesamt kann festgestellt werden, dass die optimalen Entwurfsparameter für Schwalbenschwanzverbindungen aus UHPFRC in Relation zur Dicke des jeweiligen Bauteiles stehen. Die Zahnlänge sollte etwa der Elementdicke (hier 15 mm) entsprechen, das Länge : Breite-Verhältnis sollte mit 1:2 beibehalten werden, der Verzahnungswinkel (Schwalbenschwanz-Winkel) sollte 15° und der vertikale Fügewinkel 2° (in Dickenrichtung) betragen.

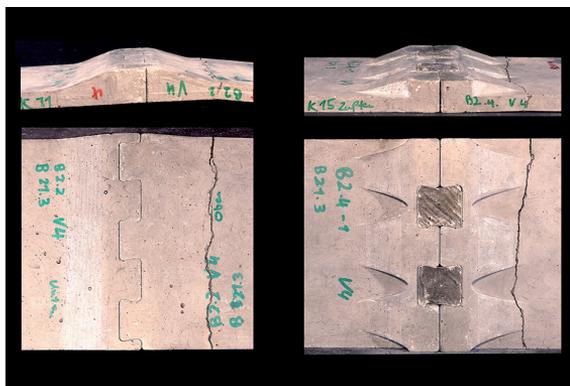
Tabelle 6: Biegezugfestigkeit der Schalenstöße

| Stoßtyp | Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl}$ [MPa] | Verhältnis der Biegezugfestigkeit zur Referenz $f_{ct,fl} / f_{ct,fl,Platte}$ |
|--------------------------|--|--|
| Referenzplatte ohne Stoß | 15,5 | 100 % |
| B3 (Serie 1) | 5,8 | 37 % |
| B2 (Serie 1) | 5,4 | 35 % |
| A2 (Serie 1) | 3,9 | 25 % |
| B1 (Serie 1) | 4,8 | 31 % |
| B2.2 (Serie 2) | 16,8 | 108 % |
| B2.4 (Serie 3) | 16,0 | 103 % |

Da durch die Zahngeometrie die ebenen Trockenstoßverbindungen der Serie 1 nicht die volle Biegezugfestigkeit des verwendeten UHPFRC erreichen können, wurde zur Erhöhung der Momententragfähigkeit für die Probekörper der Serien 2 und 3 der Querschnitt im Fugebereich aufgeweitet (Bild 20). Die Versuchsergebnisse (Tabelle 6) für die Serie 2 zeigen, dass hierdurch die volle Momententragfähigkeit der ungestörten Referenzplatte erreicht werden kann. In Analogie zur durchgeführten Optimierung der Trockenstoßverbindungen für Stabtragwerke stellt auch der letzte Optimierungsschritt der Trockenstoßverbindungen zur Fügung von ebenen und gekrümmten Flächenbauteilen einen Verbindungstyp bereit, bei welchem die Fügung selbst gegenüber der Gesamtkonstruktion keine Schwachstelle mehr darstellt. Zudem wurde durch die Entwicklung und Verwendung eines dritten Fügebauteils, einem Implantat aus

UHPFRC, die Montage der Verbindung erheblich vereinfacht.

Bild 20: Probekörper nach der 4-Punkt-Biegezugprüfung mit Bruch in der Platte: je ein Prüfkörper der Serie 2 mit lokaler Aufweitung im Fügungsbereich und der Serie 3 mit Verbindungselement durch Einpressen eines UHPFRC-Implantats [Foto: ITE]



5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Hinblick auf einen ressourceneffizienten Einsatz von Werkstoffen wird dem Einsatz von leichten und schlanken Betonkonstruktionen aus UHPC in Zukunft eine wichtige Bedeutung zukommen. Die Forschungsergebnisse der ersten Antragsphase zeigen, dass es möglich ist, kraftflussoptimierte Bauteilfügungen aus ultrahochfestem stahlfaserverstärktem Beton für komplexe Stab- und Flächentragwerke unter Nutzung und Zusammenführung dieser neuen Technologien herzustellen. Die entwickelten neuartigen Fügungen können als Trockenstöße mithilfe hochpräziser, CNC-gefräster Schalungstechnologie (sogenanntem ultra-präzisen Schalungsbau) so exakt gefertigt werden, dass bei der Zusammenfügung der Bauteile zu einem Gesamttragwerk auf verbindende Einbauteile oder Vermörtelungen weitgehend verzichtet werden kann.

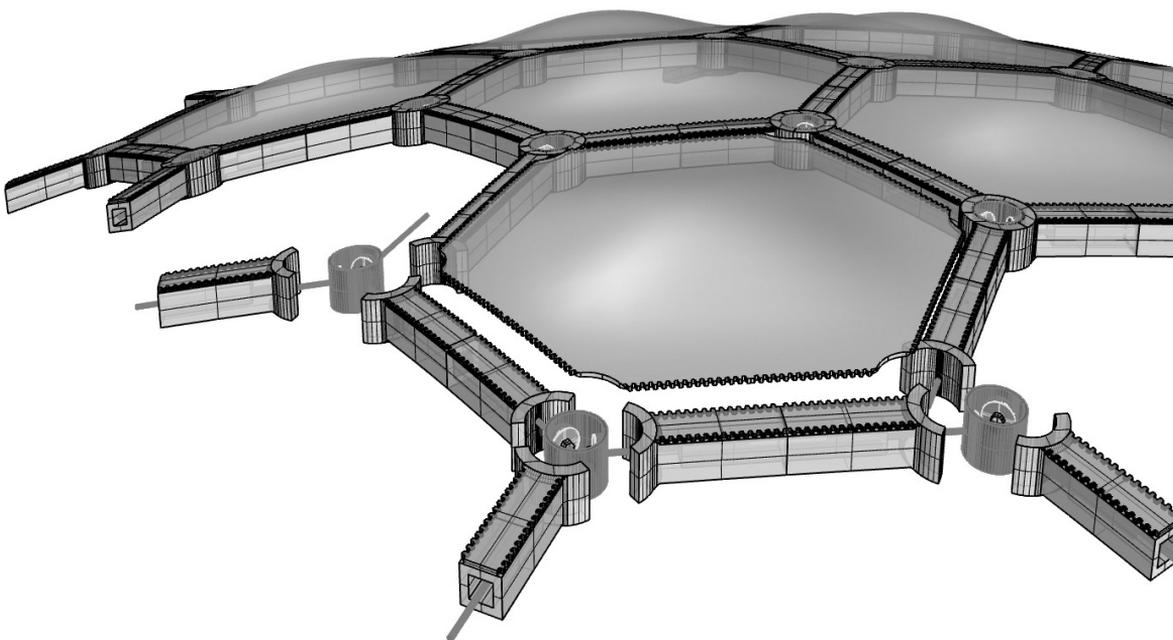


Bild 21: Hexagonales, räumlich gekrümmtes stabwerkintegriertes Flächentragwerk mit Knotenfügung von drei Stäben und Plattenelementen im Gesamtsystem als mögliche Kombination der entwickelten Fügeprinzipien

Die Entwicklung der stabförmigen und flächigen Verbindungen der ersten Antragsphase erfolgte zwar unabhängig voneinander, nutzte aber die gleichen Prinzipien. Die entwickelten Stoßverbindungen für Stäbe sind als vorgespannte, trocken gefügte Stoßverbindungen konzipiert, welche vorrangig in ebenen oder gekrümmten Stabtragwerken Anwendung finden können. Die neuartigen flächigen Verbindungen zielen auf das Fügen von ebenen Bauteilen wie Fertigteilplatten für hauptsächlich druckbelastete, membranartige Schalentragswerke ab. Motivation für die zukünftige Forschung ist es daher, die Erkenntnisse über tragende Bauteile aus UHPFRC mit den Möglichkeiten der digitalen Planung, Berechnung und CNC-gesteuerten Fertigungstechnik für den Formenbau weiter zusammenzubringen und mithilfe bereits gezeigter und weiterer Verbindungsmöglichkeiten innovative, modulare Leichtbaustrukturen zu entwickeln, wie sie beispielsweise Bild 21 zeigt.

Die in der ersten Förderperiode des SPP 1542 im Forschungsprojekt entwickelten Fügeprinzipien können so die Grundlagen bilden, um leistungsfähige hybride Stab-, Flächen- und Raumtragelemente zu entwickeln, welche die stabförmigen und flächigen Verbindungen optimal zusammenführen und eine einfache Fügung der Elemente erlauben. Mithilfe leistungsfähiger Verbindungen können Bauteile zu effektiven stabwerkintegrierten Linien-, Flächen- und Raumtragwerken zusammengesetzt werden, bei welchen die Tragwirkungen von Stab- und Flächenelementen über deren Fügung als hybride Tragstrukturen quasimonolithisch zusammenwirken. Je nach geometrischer Randbedingung können die so entstehenden Hybridtragsysteme durch eine implementierte Abwinkelung oder Krümmung als Schale bzw. Raumtragwerk oder in der Ebene als Platte bzw. Scheibe wirken. Je nach Nutzungsanforderung bzw. Rahmenbedingung kann so durch die Kombination der Bauteile und deren Fügesysteme ein jeweils optimal angepasstes Tragwerk entwickelt werden.

Dank

Der besondere Dank der Autoren gilt den im Forschungsteam mitarbeitenden Kollegen im iBMB und ITE der TU Braunschweig sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Schwerpunktprogrammes 1542 *Leicht Bauen mit Beton*.

Literaturverzeichnis

- [1] BUDELMANN, H.; KLOFT, H.: DFG-Forschungsantrag – Entwicklungen neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen und Stabtragwerke. Braunschweig, 2011.
- [2] KLOFT, H.: Logic and Form – From ISLER Shells to Non Standard Structures. Journal of the International Association of Shell and Spatial Structures 52 (2011), Heft 3, S. 191–199.

- [3] FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; TEICHMANN, T.; BUNJE, K.; BORNEMANN, R.; MIDDENDORF, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). Universität Kassel: Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, 2003.
- [4] HERMERSCHMIDT, W.; BUDELMANN, H.: Kerbempfindlichkeit von ultrahochfestem Beton. iBMB-Kurzberichte aus der Forschung, <http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/docpool/reports/KaF-2012-12.pdf>, TU Braunschweig, 2012.
- [5] MAINKA, J.; LEHMBERG, S.; BUDELMANN, H.; KLOFT, H.: Non-Standard Fügeprinzipien für leichte Bauteile aus UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 11, S. 763–773.
- [6] LEHMBERG, S.; BUDELMANN, H.: Entwicklung von dünnwandigen Stabwerksknoten aus ultrahochfestem faserverstärkten Beton. In: BREITENBÜCHER, R.; MARK, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAFStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium in Bochum, 07.–08.11.2013, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 47–52.
- [7] GRAMAZIO, F.; KOHLER, M.; MIRJAN, A.; OESTERLE, S.; VANSSTEENKISTE, A.: holcimfoundation.org/Architecture & Digital Fabrication, ETH Zurich [Online]. Available: <http://www.holcimfoundation.org/Portals/1/docs/A12/A12in1CH/A12GLin1CH-posterhigh.pdf>. [Zugriff am 04.06.2013].
- [8] LEHMBERG, S.; LEDDEROSE, L.; MAINKA, J.; BUDELMANN, H.; KLOFT, H.: Non-Standard joints for lightweight modular spatial and shell structures made from UHPFRC. Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium, Brasilia, Brasilien, 2014.
- [9] MAINKA, J.; KLOFT, H.; HEINEMANN, T.: A novel recyclable wax formwork-system for high-precision free-form UHPC members and joints. Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium, Brasilia, Brasilien, 2014.
- [10] DIN 18202: Toleranzen im Hochbau – Bauwerke. Deutsche Institut für Normung e.V. 2005.

Entwicklung neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkelemente aus UHPC

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann ¹⁾
 Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft ²⁾

Projektbearbeiter

Dipl.-Ing. Sven Lehberg ¹⁾
 Dipl.-Ing. Jeldrik Mainka ²⁾
 Dipl.-Ing. Lukas Ledderose ²⁾

Projektlaufzeit

11/2011 – 10/2014

Web

www.ibmb.tu-braunschweig.de ¹⁾
www.ite.tu-bs.de ²⁾