



Manfred Rübner

Silke Scheerer · Ulrich van Stipriaan (Herausgeber)

Festschrift  
zu Ehren von  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h.  
Manfred Curbach

Dresden, 28. September 2016

## Impressum

Herausgeber	Silke Scheerer, Ulrich van Stipriaan	
Redaktion	Silke Scheerer	
Autorenfotos	<i>Fotostudio Jünger</i>	<i>S. 124 oben</i>
	<i>Edvard Krikourian</i>	<i>S. 124 unten rechts</i>
	<i>Kirsten J. Lassig</i>	<i>S. 12</i>
	<i>Bertram Lubiger</i>	<i>S. 192</i>
	<i>Juri Paulischkis</i>	<i>S. 104</i>
	<i>A. T. Schaefer, Stuttgart</i>	<i>S. 62</i>
	<i>Sylke Scholz, Dresden</i>	<i>S. 256</i>
	<i>Ulrich van Stipriaan</i>	<i>S. 80, 90, 104, 124 Mitte rechts, 146, 150, 152, 160, 216, 228, 234 Mitte links und unten links/rechts, 292, 320</i>
	<i>Nic Vermeulen</i>	<i>S. 280</i>
	<i>Irina Westermann</i>	<i>S. 42 oben</i>
	<i>Von Autoren zur Verfügung gestellt: S. 16, 24, 42 unten, 124 (2x), 178, 234 (3x)</i>	
Layout, Satz	Ulrich van Stipriaan	
Titelbild	Ulrich van Stipriaan	
Korrektur	Birgit Beckmann, Angela Heller	
Druck	addprint AG, Bannewitz	

Redaktionsschluss für dieses Buch war der 28. August 2016.

# Inhalt

<i>Silke Scheerer, Ulrich van Stipriaan und Wolfgang Leiberg</i> Zum Geleit .....	8
<b>Teil I – Texte zum Kolloquium .....</b>	<b>11</b>
<i>Hans Müller-Steinhagen</i> Grußwort .....	12
<i>Harald Budelmann</i> Laudatio .....	16
<i>Konrad Bergmeister</i> Weniger ist manchmal mehr – ein Beitrag zur Mindestbewehrung .....	24
<i>Harald S. Müller und Michael Haist</i> Opus Caementitium Optimum – Der nachhaltige Beton des 21. Jahrhunderts .....	42
<i>Werner Sobek</i> Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume .....	62
<b>Teil II – Weitere Beiträge .....</b>	<b>79</b>
<i>Thomas Bösche</i> Mehr Mut im Ingenieurbau.....	80
<i>Harald Budelmann und Sven Lehmborg</i> Von der Küchenarbeitsplatte zum leichten Tragwerk – Was kann ultrahochfester faserverstärkter Feinkornbeton? .....	90

<i>Luna Manolia Daga und Udo Wiens</i>	
Mehr als nur schwarze Buchstaben auf weißem Papier – Ein Essay .....	104
<i>Ulrich Häußler-Combe</i>	
Aspekte der Modellierung von Stahlbetontragwerken .....	108
<i>Josef Hegger, Norbert Will, Rostislav Chudoba, Alexander Scholzen und Jan Bielak</i>	
Bemessungsmodelle für Bauteile aus Textilbeton .....	124
<i>Frank Jesse</i>	
Über die Länge der Leine .....	146
<i>Peter Mark</i>	
Mit Leichtigkeit .....	150
<i>Steffen Marx</i>	
Gute Lehre im Konstruktiven Ingenieurbau .....	152
<i>Viktor Mechtcherine</i>	
Hochduktiler Beton – eine Konkurrenz zu Textilbeton? .....	160
<i>Karl Morgen</i>	
Deutschlands größte Kamera .....	178
<i>Peter Offermann</i>	
Wie alles begann .....	188
<i>Dirk Proske</i>	
Ist die Energiewende ein technischer Hype? .....	192
<i>Mike Schlaich</i>	
Die Hommage als Quelle der Inspiration .....	216

<i>Jürgen Schnell</i>	
Fashion Statement .....	228
<i>Mario Smarslik, Christoph Kämper, Patrick Forman, Tobias Stallmann, Peter Mark und Jürgen Schnell</i>	
Topologische Optimierung von Betonstrukturen .....	234
<i>Jürgen Stritzke</i>	
Leipziger Großmarkthalle – ein „Historisches Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland“	256
<i>Luc Taerwe</i>	
Self-anchored suspension bridges with prestressed concrete deck: historic examples .....	280
<b>Teil III – Institut für Massivbau .....</b>	<b>291</b>
<i>Silke Scheerer (Text) · Ulrich van Stipriaan (Fotos)</i>	
Massivbau an der TU Dresden gestern und heute .....	292
<i>Angela Schmidt</i>	
Die eingeschlichenen Fehler .....	320
<i>Manfred Curbach</i>	
Habilitation / Promotionen .....	326
<i>Ulrich van Stipriaan (Fotos)</i>	
Institut für Massivbau   Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter .....	330

Teil II  
Weitere Beiträge



Harald Budelmann und Sven Lehmborg

## Von der Küchenarbeitsplatte zum leichten Tragwerk – Was kann ultrahochfester faserverstärkter Feinkornbeton?

Prof. Dr.-Ing.  
Harald Budelmann,  
Dipl.-Ing. Sven Lehmborg

Institut für Baustoffe, Massiv-  
bau und Brandschutz (iBMB),  
TU Braunschweig

### 1 Einleitung

Der große Durchbruch des Betons kam in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts und wurde u. a. von Joseph Monier und seinen Patenten zum bewehrten Beton mit sog. „Moniereisen“ ausgelöst [1]. Es gelang ihm, aus damaligem Eisen und Beton Bauteile zu schaffen, die mechanisch effizient und kostengünstig waren. Im Laufe des 20. Jahrhunderts ermöglichte die rasante Entwicklung der Stahlbetonbauweise den Aufbau unserer modernen Infrastruktur. Doch mitunter war das Ergebnis nicht besonders ansehnlich und Begriffe wie Betonwüste, Plattenbau und Waschbeton wurden zu Synonymen für Unwirtlichkeit. Ein zunehmend negatives Image der Stahlbetonbauweise war zeitweise die Folge. Auch war das materialtechnologische Wissen noch unausgereift und zu viele Bauwerke aus dieser Zeit zeigten bereits nach einer zu

kurzen Nutzungsdauer strukturelle Schäden. Die Dauerhaftigkeit rückte zunehmend in das Blickfeld und Wege zu ihrer Gewährleistung brachten spürbare Fortschritte.

Neue Entwicklungen in der Betontechnologie zum Ende des 20. Jahrhunderts leiteten ein Umdenken im Umgang mit dem Werkstoff Beton ein. Es wurden nun zunehmend gehobenere Ansprüche an die Sichtbetonqualität gestellt, höherfeste Betone ermöglichten den Bau immer größerer und schlanker Bauwerke und eine bessere Verarbeitbarkeit sowie neue Fertigungsverfahren und Materialien führten zu neuen und inspirierenden Formen.

Viele das Bauwesen prägende Persönlichkeiten wie Robert Maillart, Franz Dischinger, Le Corbusier, Oscar Niemeyer, Heinz Isler bis hin zu Tadao



*Museu de Arte Contemporânea de Niterói (MAC) bei Rio de Janeiro (Brasilien), Architekt: Oscar Niemeyer, Fertigstellung: 1996  
(Foto: Sven Lehmborg)*



*Theater unter den Kuppeln in Leinfelden-Echterdingen, Tragwerksplaner: Heinz Isler, Fertigstellung: 1990  
(Foto: Sven Lehmborg)*



*Oberflächenqualität von trocken fügbaren UHPFRC-Bauteilen mit Prägung einer Münze und sichtbaren Fräslinien der CNC-bearbeiteten hochpräzisen Schalung*

*(Foto: Sven Lehmborg)*

Ando und Zaha Hadid haben den Stahlbetonbau selbstbewusster gemacht und ihn so bis heute – im beginnenden 21. Jahrhundert – schon fast zu einem Lifestyleprodukt werden lassen, das sich nicht mehr hinter einer Fassade verstecken muss. Heute wird Beton wieder als innovativer Baustoff von ArchitektInnen und IngenieurInnen angenommen.

Der immer stärker in den Vordergrund rückende Anspruch an die architektonische und ästhetische Qualität von Bauwerken und ihre Materialoberflächen stellt Planer jedoch auch vor neue Herausforderungen. Die Qualität von Sichtbetonflächen ist das Ergebnis des komplexen Zusammenwirkens von Schalhaut, Trennmittel und Beton [2]. Dabei ist

eine gleichmäßige porenfreie Oberfläche bei frei geformten Betonbauteilen nur mittels selbstverdichtender Feinkornrezepturen möglich. Mit fein abgestimmten Rezepturen können Oberflächenqualitäten und Herstellungsgenauigkeiten erreicht werden, die im Betonbau früher nicht möglich waren. Durch die selbstnivellierenden und meist höherfesten Betone ist es zusätzlich möglich, Bauteile auch ohne diskrete Bewehrung herzustellen. Stattdessen kommen Fasern zum Einsatz, die die Gefahr eines spröden Bauteilversagens vermindern und die die Festigkeiten sowie das Verformungsvermögen positiv beeinflussen. Für gering belastete Bauteile wie z. B. Küchenarbeitsplatten kann sogar auf jegliche Art von Bewehrung verzichtet werden, da die erhöhte Biegezugfestigkeit des Betons allein für die Stabilität ausreichend ist.

## 2 Materialeigenschaften von UHPFRC

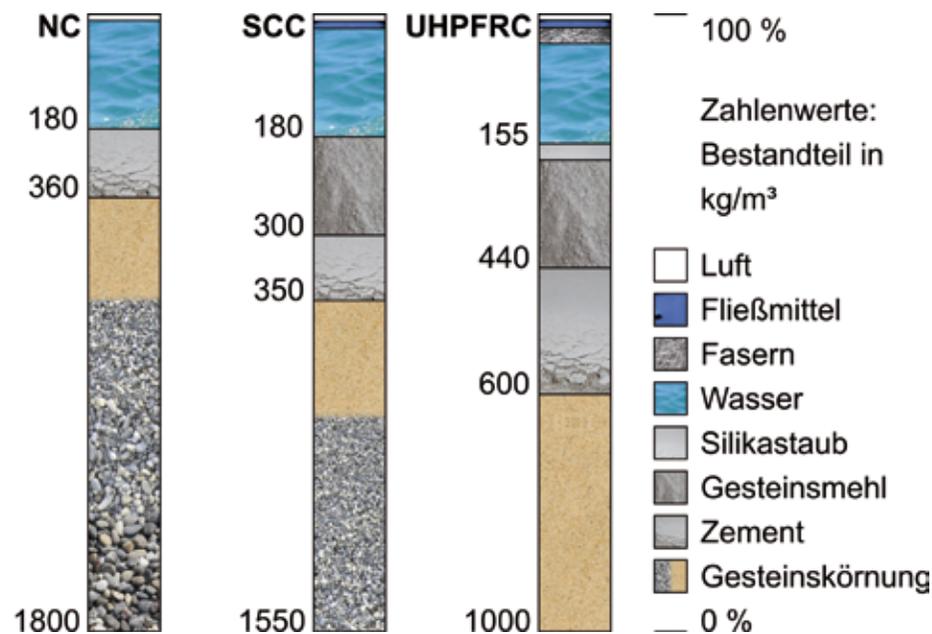
Die einstmals klassische Betonzusammensetzung aus den Bestandteilen Gesteinskörnung, Wasser und Zement ist angesichts der hohen Ansprüche an Festigkeit, Oberflächenqualität und Verarbeitbarkeit bei modernen Hochleistungsbetonen zu einem Vielstoff-Gemisch aus Gesteinskörnung, Wasser, Zement, Zusatzstoffen, wie z. B. Silikastaub und Gesteinsmehlen, und Zusatzmitteln, z. B. Hochleistungsfließmittel und Schwindreduzierer, weiterentwickelt worden. Damit werden neue Rezepturen, wie die der ultrahochfesten faserverstärkten Feinkornbetone (UHPFRC) möglich,

die durch ihre erhöhte Packungsdichte mit verringertem Porenvolumen und extrem dichten Gefüge sehr hohe Festigkeiten erreichen. Das erfordert im Bereich der ultrahochfesten Betone, das Wasser-Zement-Verhältnis deutlich unter die Grenze von 0,4 abzusenken. Da es nunmehr zu keiner vollständigen Zementhydratation mehr kommen kann, steht auch kein überschüssiges Wasser mehr zur Bildung eines zusammenhängenden kapillaren Porennetzes zur Verfügung. Stattdessen ergibt sich eine Zementsteinmatrix mit sehr feinen Gelporen und dichten Kontaktzonen zur Gesteinskörnung, was nahezu keinen Stofftransport mehr durch den Beton hindurch ermöglicht. Die erforderliche Verarbeitbarkeit und Dispergierung der großen Menge an Feinstoffen erfordert allerdings auch große Mengen von neuen Hochleistungsfließmitteln auf der Basis von Polycarboxylatether (PCE). Durch die ausgewogene Abstimmung der Rezepturkomponenten können nun die hohen Packungsdichten und möglichst selbstverdichtenden Eigenschaften solcher Betone eingestellt werden. Die damit erreichte hohe Dichtigkeit des Betons führt auch zu einem wesentlich höheren Widerstand gegen eindringende Medien. So steigt z. B. die Beständigkeit gegen Chloride, Carbonatisierung und Frost-Tau-Wechselbeanspruchung stark an [3]. Durch den Einsatz von Fasern kann zudem ein duktileres Bauteilverhalten erreicht werden. Spezielle Fasern aus Polypropylen können den ungünstigen Einfluss der hohen Gefügedichtigkeit auf die Brandwiderstandsdauer ausgleichen [3].

Für hoch beanspruchbare, dünnwandige Bauteile spielt die Faserorientierung eine große Rolle. Sie ist von vielen Parametern abhängig, wie von der Fließgeschwindigkeit, der Oberflächenbeschaffenheit der Schalung sowie von den Fließeigenschaften der Rezeptur, z. B. [4]. Damit erlangt die Verarbeitbarkeit eines Betons einen zunehmenden Einfluss auf die sich einstellende Faserorientierung im Bauteil. Die Rezeptur muss optimal eingestellt werden, wenn sie einerseits selbstverdichtende Eigenschaften bei zunehmender Tendenz zur Klebrigkeit bei ultrahochfesten Betonen gewährleisten soll und gleichzeitig einen hohen Widerstand gegen Sedimentation während der Betonierung auf-

*Betonzusammensetzungen im Vergleich: Normalbeton (NC), selbstverdichtender Beton (SCC) mit einem Größtkorn von 16 mm und ultrahochfester faserverstärkter Feinkornbeton (UHPFRC) mit einem Größtkorn von 0,5 mm*

*(Grafik: Sven Lehmborg und Silke Scheerer)*



weisen muss. Insbesondere die Art und Dosierung des Hochleistungsfließmittels muss exakt auf die Rezeptur abgestimmt sein, da ansonsten Verarbeitungsprobleme zwangsläufig sind. Für den Nachweis der Stabilität einer Rezeptur hat sich gezeigt, dass der Setzfließmaßversuch mit Blockierring gut geeignet ist und die Klasse SF1 nach DIN EN 206 [5] nicht überschritten werden sollte. Die zäh-viskose Konsistenz von UHPFRC bringt ebenfalls steigende Anforderungen an die Verdichtungszeiten und die Verdichtungsenergie mit sich [6]. Deshalb sollte UHPFRC vorwiegend im Fertigteilbau verwendet werden oder muss andernfalls einer besonders strengen Überwachung auf der Baustelle unterliegen.

Ein großer Nachteil der neuen Betone liegt in den höheren Herstellungskosten im Bereich des Vier- bis Fünffachen gegenüber normalfestem Beton. Nachhaltigkeitsbetrachtungen zeigen bei Bezug auf die Baustoffmasse: Das globale Erwärmungspotenzial (GWP) für eine Tonne Beton beträgt für UHPFRC mit Mikrostauffasern ca. 1500 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent gegenüber ca. 250 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent für normalfesten Beton [7]. Demgegenüber stehen allerdings auch Zug- bzw. Druckfestigkeiten, die bei UHPFRC ca. drei- bzw. fünfmal so hoch sind wie bei Normalbeton und den Einsatz entsprechend kleinerer Massen erfordern. Auch ermöglichen die hohe Zugfestigkeit und das dichte Gefüge neuartige und wirtschaftlichere Konstruktionen durch die Redu-

*Das Herstellen von UHPFRC kann problematisch sein: schlechte Durchmischung wegen Fließmittelunterdosierung (links) und Faserentmischen und Bluten bei Fließmittelüberdosierung (rechts)  
(Fotos: Sven Lehmborg)*





*Wassereindringen und Stofftransport in UHPFRC sind sehr gering. Nach 2 Tagen wurde das Prisma (40 × 40 × 160 mm) in einer NaCl-Lösung gelagert und nach 50 Tagen auf seine Biegezugfestigkeit geprüft. Die erzielte Biegezugfestigkeit ist vergleichbar mit der einer wassergelagerten Probe. Es ist nur Rost an freiliegenden Fasern zu sehen, jedoch keine Schädigung durch Korrosionsprodukte.*

*(Foto: iBMB, TU Braunschweig)*

zierung oder den Verzicht auf eine konventionelle Bewehrung.

Ein spezieller Gesichtspunkt ultrahochfesten Betons ist dessen Schwindverhalten. Hier spielt das autogene Schwinden die entscheidende Rolle [8]. Es entsteht durch starke kapillare Sogkräfte, die das Betongefüge zusammenziehen, da eine nicht mehr ausreichend große Menge an Wasser für die Erhärtungsreaktion zur Verfügung steht, sowie durch die Tatsache, dass chemisch gebundenes Wasser im Beton ein geringeres Volumen als freies Wasser aufweist. Die dabei entstehenden Verformungen können beträchtlich sein, sie können allerdings auch mit der Hilfe von Schwindreduzieren beherrscht werden. Trotzdem muss bei der Erhärtung von UHPFRC mit einem Schwindmaß um ca. 0,5 ‰ innerhalb der ersten 7 Tage gerechnet werden. Eine weitere Besonderheit stellt die schnelle

Erhärtung dar, die nach 7 Tagen fast vollständig abgeschlossen ist. Der schnelle Erstarrungsbeginn und das sich schon früh entwickelnde dichte Gefüge lassen kaum Schadstoffe eindringen. So zeigt ein UHPFRC-Prisma, das bereits 2 Tage nach der Betonierung in einer NaCl-Lösung gelagert worden ist, kaum Korrosionsspuren an der oberflächennahen Faserbewehrung.

Dünnwandige Bauteile aus UHPFRC sind besonders wirtschaftlich, wenn ihre mechanischen Eigenschaften optimal genutzt werden und sich die innere Faserorientierung dem Kraftverlauf im Tragwerk anpasst. Grundlage dafür ist die Kenntnis der Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Faserorientierung. Ein wesentlicher Einfluss der Faserorientierung auf die Zug-, Biegezug- und Querkrafttragfähigkeit konnte in eigenen Untersuchungen festgestellt werden. Bei Druckbeanspru-

chung verändert sich der Versagensmechanismus von spröde zu duktil, die Druckfestigkeit selbst jedoch kaum [9]. Um die Bauteileigenschaften in Abhängigkeit vom Fasergehalt und der Lage der Stahlfasern genauer beschreiben zu können, müssen diese bestimmt werden. Dafür haben sich in der Praxis Dünnschliffe [10], Induktionsmessverfahren [11] sowie die Auswertung von Bildern aus dem Mikro-Computertomographen (Mikro-CT) [12], [13] bewährt. Mithilfe eines Mikro-CT-Scans kann z. B. die Faserverteilung in Abhängigkeit von der Schalungsgeometrie fein aufgelöst beschrieben werden. Im dargestellten Versuchskörper mit Hinterschnitt wurde so das erfolgte Fließverhalten genauer analysiert.

*Sichtbarmachen von Faserorientierung und Schädigung in trocken gefügten hochpräzisen Schwalbenschwanzverbindungen aus UHPFRC mittels Mikro-CT; von links nach rechts: Ansicht der Verbindung und Faserorientierung sowie Faserverteilungen im Querschnitt nahe der oberen (horizontalen) Kontaktfläche und im oberen Eckbereich (Fotos: Sven Lehmborg)*

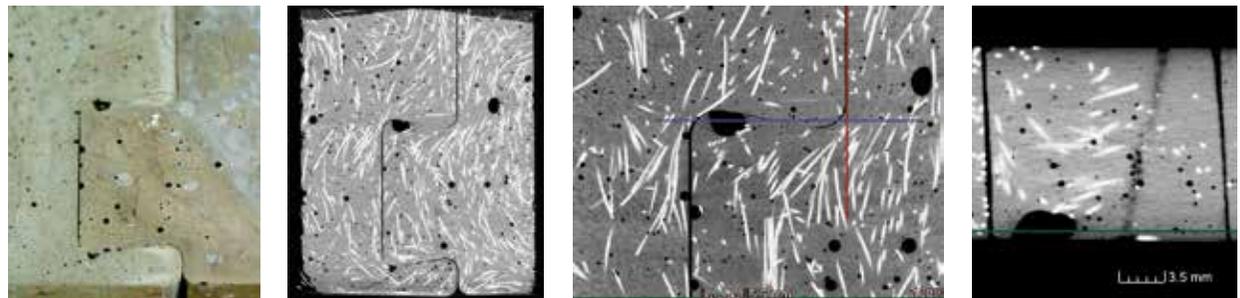
Es existieren bereits Ansätze, um die Faserorientierung im Beton rechnerisch zu simulieren [14]. Allerdings sind diese Modelle stark von der gewählten Rezeptur abhängig.

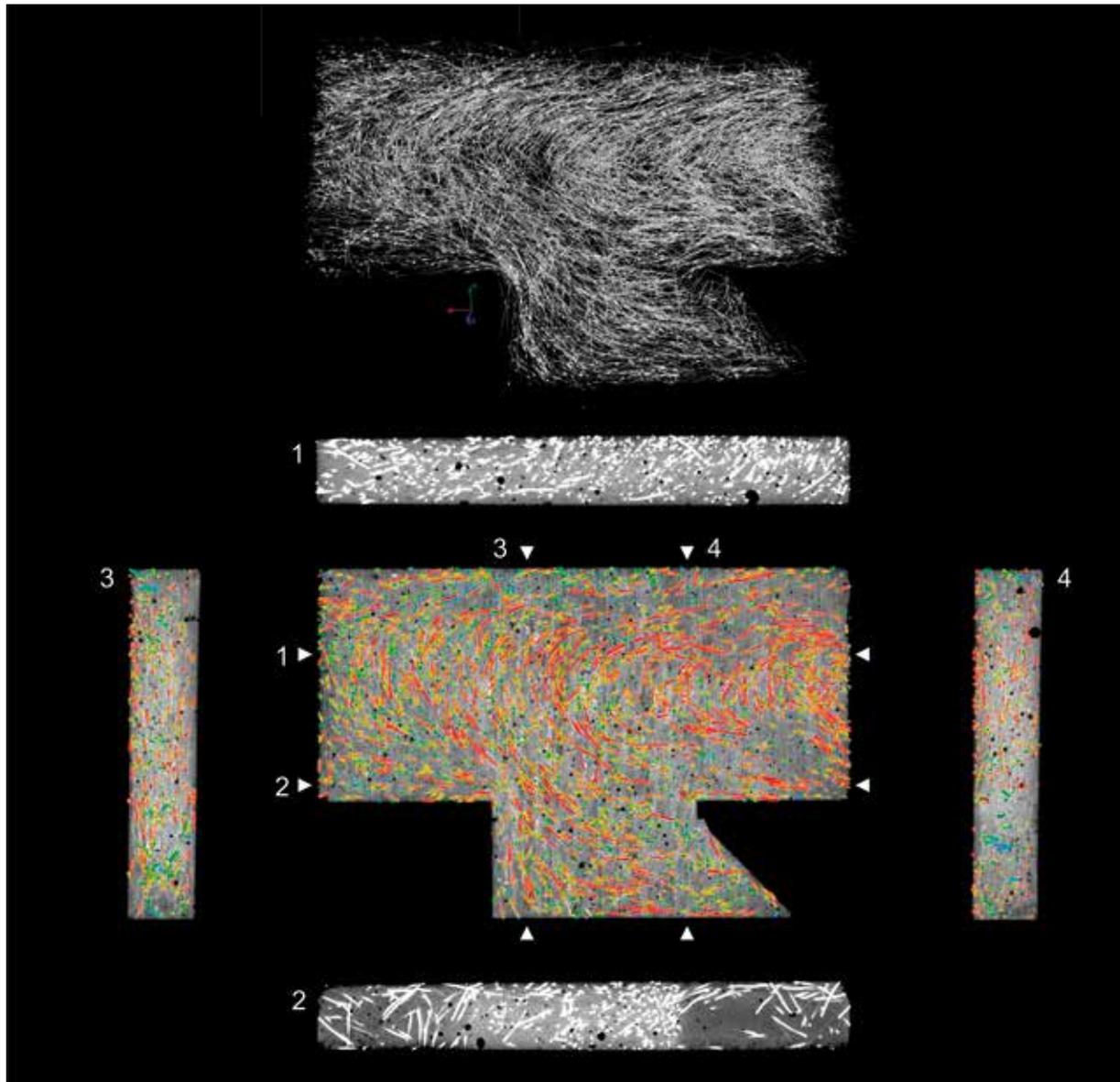
Die hohe Oberflächenqualität und die feine Struktur des UHPFRC erlauben es, hochpräzise trockene

ne Stoßverbindungen im Betonbau zu realisieren [15]. Diese können z. B. für Fertigteile verwendet werden, die dann schnell und reversibel aufgestellt werden können. Verbindungen werden dabei einfach ineinander geschoben und sorgen je nach Über- oder Untermaß der Teile zueinander für einen höheren oder geringeren Kraftschluss zwischen den Bauteilen. Es wurde an dem dargestellten trocken gefügten Schwalbenschwanzstoß nachgewiesen, dass mit UHPFRC eine schädigungsfreie Fügung möglich ist.

### 3 Küchenarbeitsplatten aus Beton

Die sehr dichte Oberfläche und das genaue Abformen ermöglichen das Herstellen von sehr präzisen, dünnwandigen und dauerhaften Bauteilen ohne zusätzliche Bewehrung. Meist werden diese Bauteile nur aus selbstverdichtendem Feinkornbeton ohne Faserzusatz hergestellt, da bereits die materialbedingte erhöhte Biegezugfestigkeit ausreicht, eine tragfähige Konstruktion herzustellen. Trotz des dichten Gefüges und des geringen Wassersau-





Bestimmung des  
Einflusses der Fließge-  
schwindigkeit und der  
Bauteilgeometrie auf  
die Faserorientierung  
und -verteilung mittels  
Mikro-CT

(Fotos: iBMB,  
TU Braunschweig)

*Konzept der trockenen  
hochpräzisen Fügung  
[16]*



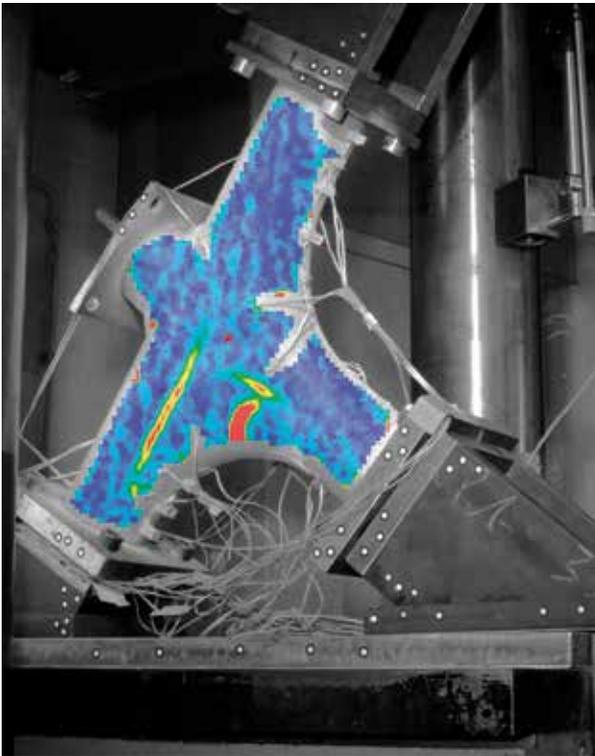
gens muss der Beton bei solchen Anwendungen aus optischen und praktischen Erwägungen vor Flüssigkeiten geschützt werden. Daher müssen bei Betonarbeitsplatten, wie bei Echtholzarbeitsplatten auch, Empfehlungen zum Umgang und zur Pflege beachtet werden. Stets müssen die material-spezifischen Eigenschaften gewollt oder in Kauf genommen werden, also z. B. dass die Oberfläche einer natürlichen Schwankung unterliegt und Poren sowie kleine Lunker an der Oberfläche möglich sind, siehe Definition der Sichtbetonqualität mittels Sichtbetonklassen [2]. Auch bringen Einflüsse der Schalung und des Erstarrens eine gewisse Schlierenbildung und Farbabweichungen mit sich; sie sind nicht Fehler sondern Charakteristika und in ihrer zeitlichen Entwicklung mit einer Patina wie bei Holzoberflächen vergleichbar. Bei größeren Abmessungen und großen Öffnungen sind auch Schwindrisse nicht immer sicher vermeidbar. Aus diesem Grund wird die Oberfläche meist nachträglich veredelt.

#### 4 Dünnwandige Betontragwerke

Die hergebrachte Bauweise mit eher massiven und orthogonal strukturierten Bauteilen kann durch den neuen Hochleistungswerkstoff Beton und neue Fertigungsmethoden zu einem kraftflussoptimierten, dünnwandigen, dauerhaften und leichten Konstruktionssystem erweitert werden. Solche Konstruktionen können dann über hochpräzise trockene Fügungen verbunden werden. Mittels dünnwandiger, trocken gefügter UHPFRC-Bauteile können Bauwerke geschaffen werden, die kompakt vorgefertigt und mit einfachen Maßnahmen auf der Baustelle verbunden und vorgespannt werden [16]. Die erhöhte Dauerhaftigkeit ermöglicht sehr kleine Betondeckungen und führt zu Querschnitten, die aufgrund ihres geringen Eigengewichts sehr effizient sind. Die Bauteile können mittels neuer Fertigungsprozesse wie dem Digital Workflow [15] durch computergesteuerte Prozesse direkt aus dem Designprozess dimensioniert und hergestellt werden.

Eine zusätzliche Optimierungsstrategie ermöglicht das Herstellen von gezielt kraftflussoptimierten Bauteilen. Der in einem Forschungsprojekt im Rahmen des DFG-geförderten Schwerpunktprogramms SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ entwickelte Stabwerksknoten kann daher neben Druck- und Zugkräften auch Biegemomente und

Querkräfte übertragen und ermöglicht so neuartige leichte Tragsysteme. Ziel der zugrunde liegenden Forschungsarbeit war es, stets ein Versagen außerhalb der Fügstellen im ungestörten Querschnitt zu erzeugen und ein Versagen im Stoßbereich oder im Bereich der Kraftumlenkung generell zu vermeiden.



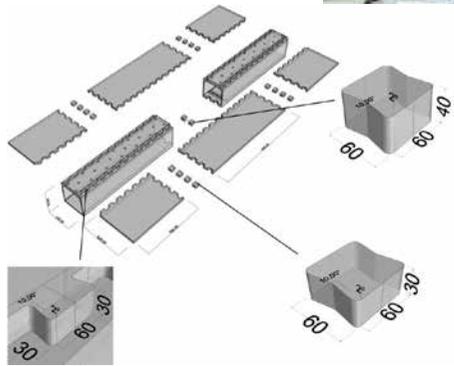
*Verformung und Rissbildung in einem dünnwandigen UHPFRC-Knoten, Stauchungen sind blau, Zugdehnungen und Biegeversagensriss im Knoten in der Mitte unten sind rot dargestellt [17]*

Für die Entwicklung von Deckensystemen wurden ebenfalls Fügeprinzipien entwickelt, welche es ermöglichen sollen, lange Hohlkastenquerschnitte miteinander zu verbinden und dünne Platten (hier mit einer Dicke von 30 mm) anzuschließen. Mit Hilfe von sog. UHPFRC-Inlay-Verbindern kann die Montierbarkeit von Platten- oder Balkenelementen auf der Baustelle deutlich vereinfacht werden. Die Konstruktion wird anschließend durch ein nichtrostendes Vorspannglied mit einer Normalkraft vorgespannt, um den Querschnitt bei Biegung und Querkraft optimal beanspruchen zu können.

Das dünnwandige Balkenelement mit einer Wandstärke von 15 mm zeigte bei der Belastung trotz der vielen Fügstellen nur eine geringe Durchbiegung im Gebrauchslastbereich. Auch wurden im Versuch keine Fügstellen beschädigt. Es war also gelungen, einen guten Verbund und Kraftschluss zwischen den Bauteilen mit Hilfe trockener Stoßverbindungen herzustellen. Die sehr geringe Wandstärke von nur 15 mm ließ schlussendlich im Traglastversuch den Balkensteg auf Querkraft versagen.

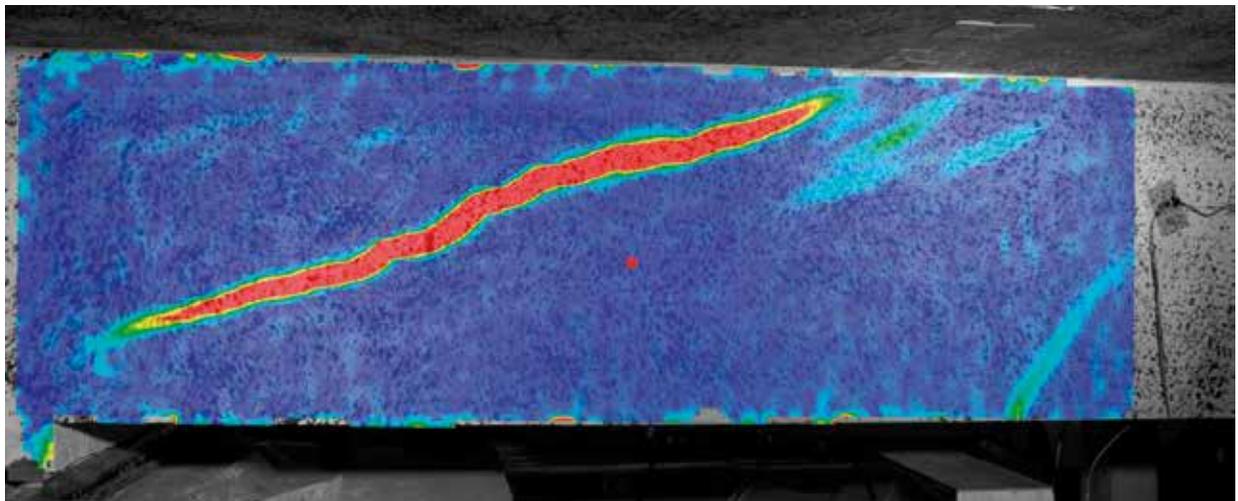
Mit UHPFRC-Inlays trocken gefügter Plattenbalken im Test

(Grafik: Lukas Ledderose, ITE, TU Braunschweig;  
Foto: Sven Lehmborg)



Mittels Photogrammetrie sichtbar gemachte Verformungen des Steges des trocken gefügten UHPFRC-Plattenbalkens während des Traglastversuchs, blau für Druckstauchungen, rot für Zugdehnungen

(Foto: Sven Lehmborg)



## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die rasante Entwicklung der Betontechnologie in den vergangenen Jahren ermöglicht die Weiterentwicklung der Betonbauweise hin zu leicht, filigran, beliebig formbar, ästhetisch; vielleicht sogar hin zu einem neuen Lifestyleprodukt Beton. Formen und Konstruktionen werden realisierbar, die früher als undenkbar galten oder nur mit sehr viel Aufwand herzustellen waren. Voraussetzung dafür sind die Ultrahochleistungsbetone neuester Generation. Diese Betone, die Phantasie sowie Kreativität bei Entwerfenden und Konstruierenden ermöglichen, bieten ein leistungsfähiges Portfolio für die Entwicklung neuer Formen und Strukturen mit hoher Effizienz. Die beeindruckenden Ideen und Projekte im Schwerpunktprogramm 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ könnten ein Startschuss in eine neue Ära des Betonbaus sein [18].

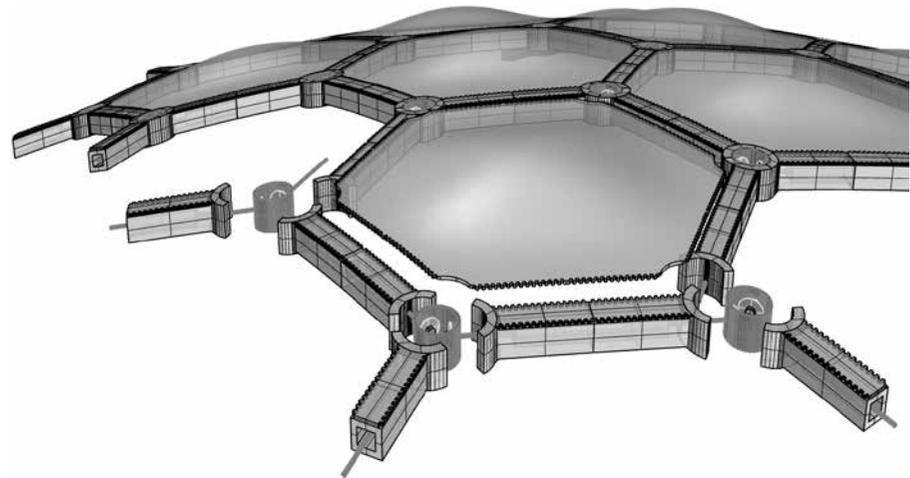
### Dank

Der besondere Dank der Autoren gilt allen im Forschungsteam mitarbeitenden Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Tragwerksentwurf (ITE) und des iBMB der TU Braunschweig sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projektes im Rahmen des Schwerpunktprogrammes 1542 „Leicht Bauen mit Beton“.

## Literaturverzeichnis

- [1] Ramm, W.: Über die faszinierende Geschichte des Betonbaus vom Beginn bis zur Zeit nach dem 2. Weltkrieg. In: DAFStb (Hrsg.): Gebaute Visionen – 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin: Beuth, 2007, 27–130
- [2] Schulz, J.: Sichtbeton Atlas: Planung – Ausführung – Beispiele. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009
- [3] Fehling, E.; Schmidt, M.; Teichmann, T.; Bunje, K.; Bornemann, R.; Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht zum DFG-Vorhaben FE 497/1-1, erschienen in: Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 1, Universität Kassel, 2005

*Stabwerkintegriertes  
Flächentragwerk aus  
trocken gestoßenen  
Betonfertigteilen [17]*



- [4] Švec, O.; Žirgulis, G.; Bolander, J. E.; Stang, H.: Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements. *Cement and Concrete Composites* 50 (2014), 60–72
- [5] DIN EN 206:2014-07: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2014
- [6] Fehling, E.; Schmidt, M.; Walraven, J. C.; Leutbecher, T.; Fröhlich, S.: Ultrahochfester Beton – UHPC. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): *Betonkalender 2013*, Band 2, Berlin: Ernst & Sohn, 2013, 118–239
- [7] Becke, A.; Reiners, J.; Sülün, C.: Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton. InformationsZentrum Beton GmbH (Hrsg.), Düsseldorf: Bau+Technik, 2014
- [8] Loukili, A.; Khelidj, A.; Richard, P.: Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete. *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 4, 577–584
- [9] Bonzel, J.; Schmidt, M.: Verteilung und Orientierung von Stahlfasern im Beton und ihr Einfluß auf die Eigenschaften von Stahlfaserbeton. *Betontechnische Berichte* 1984/85, 73–116
- [10] Tue, N. V.; Henze, S.; Küchler, M.; Schenck, G.; Wille, K.: Ein optoanalytisches Verfahren zur Bestimmung der Faserverteilung und -orientierung in stahlfaserverstärktem UHFB. *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007) 10, 674–680
- [11] Wichmann, H.-J.; Holst, A.; Budelmann, H.: Ein praxisgerechtes Messverfahren zur Bestimmung der Fasermenge und -orientierung im Stahlfaserbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 12, 822–834
- [12] Suuronen, J.-P.; Kallonen, A.; Eik, M.; Puttonen, J.; Serimaa, R.; Herrmann, H.: Analysis of short fibres orientation in steel fibre-reinforced concrete (SFRC) by X-ray tomography. *Journal of Material Science* (2013) 3, 1358–1367
- [13] Schnell, J.; Schladitz, K.; Schuler, F.: Richtungsanalyse von Fasern in Betonen auf Basis der Computer-Tomographie. *Beton- und Stahlbetonbau* 105 (2010) 2, 72–77
- [14] Deeb, R.; Karihaloo, B. L.; Kulasegaram, S.: Reorientation of short steel fibres during the flow of self-compacting concrete mix and determination of the fibre orientation factor. *Cement and Concrete Research* 56 (2014) 112–120
- [15] Mainka, J.; Lehmborg, S.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Non-Standard Fügeprinzipien für leichte Bauteile aus UHPFRC. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 11, 763–773
- [16] Lehmborg, S.; Ledderose, L.; Mainka, J.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Non-Standard Joints for lightweight modular Spatial and Shell Structures made from UHPFRC. In: Brasil, R. M. L. R. F.; Pauletti, R. M. O. (Eds.): *Proceedings of the*

IASS-SLTE 2014 Symposium "Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints", 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), full paper published on USB drive, 9 pages

- [17] Lehmborg, S.; Mainka, J.; Ledderose, L.; Budelmann, H.; Kloft, H.: Neuartige Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkelemente aus UHPFRC. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton, Forschung im Schwerpunktprogramm 1542 Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, 122–139 – online unter: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171338>
- [18] Homepage des SPP 1542:  
<http://spp1542.tu-dresden.de/>

Anmerkung: alle Internetquellen wurden am 17.5.2016 geprüft.