

Wiley Industry Days

WIN DAYS**7.-9. Juni** 2021www.WileyIndustryDays.com

Bauen 2021 - Werden Sie mit uns Teil der WINDays

Virtuelle Show mit Konferenz, Ausstellung und Networking für Architektur und Bauingenieurwesen, Automatisierung, Machine Vision, Photonics, Healthcare und Sicherheit.

- **Virtuelle Ernst & Sohn Ausstellungshalle** mit Auditorium für Architektur und Bauingenieurwesen
- **Fokus auf Ihr Networking** - Ihre Kommunikation - Ihren Vertrieb
- **3 Leistungspakete bieten Ihnen optimale Repräsentationsmöglichkeiten**, inkl. direkter Kommunikation mit den Messteilnehmern per Video- und Textchat u. v. m.



STANDBUCHUNGEN

Wenden Sie sich jetzt an unsere Experten!

Fred Doischer - Fred.Doischer@Wiley.com
Tel. +49 (0)172-3999-853

Sigrid Elgner - Sigrid.Elgner@Wiley.com
Tel. +49 (0)30-47031-254



**JETZT KOSTENFREI ALS
BESUCHER REGISTRIEREN!**
WWW.WILEYINDUSTRYDAYS.COM

Robotergestützte, magnetische Ausrichtung von Mikro-Stahldrahtfasern in dünnwandigen UHPFRC-Bauteilen

Mithilfe der robotergestützten magnetischen Verteilung und Orientierung von Mikro-Stahldrahtfasern in UHPFRC (Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete) soll der Einsatz von Stahlfasern als dezidiert notwendige Zugbewehrung ermöglicht werden. Ziel ist es, durch die magnetische Ausrichtung der Stahlfasern in der Frischbetonmatrix leistungsfähige Betonbauteile herzustellen. Die vorgestellte Forschung führt Möglichkeiten digitaler und robotergestützter Bauteilfertigung auf der einen Seite mit den Potenzialen der Faserausrichtung zur Steigerung der Materialeffizienz von UHPFRC auf der anderen Seite zusammen. Die gewählte Methode zur Verteilung und Orientierung der Mikro-Stahldrahtfasern in UHPFRC basiert auf dem physikalischen Phänomen des Magnetismus. Da Mikro-Stahldrahtfasern ferromagnetisch sind, kann deren Lage im frischen Beton durch Nutzung magnetischer Felder gezielt verändert werden. Die Magnetbehandlung zielt darauf ab, die Lage der Mikro-Stahldrahtfasern in der Betonmatrix vor dem Erstarren entsprechend dem Kraftfluss in Richtung der Zugtrajektorien auszurichten. Erste Ergebnisse zeigen, dass die definierte Anordnung der Fasern in einem Bauteil die Effizienz des eingesetzten Faseranteils signifikant steigert und so neben einer verbesserten Verarbeitbarkeit des Frischbetons zu einer erheblichen Reduktion der eingesetzten Fasermenge führt, womit ein großes Einsparpotenzial an ökologischen und ökonomischen Ressourcen einhergeht.

1 Einleitung

Mit UHPFRC (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete) als Hochleistungswerkstoff können sehr materialsparende, filigrane und hochleistungsfähige Tragwerke realisiert werden. Zwar ermöglicht schon allein die hohe Druckfestigkeit von ultrahochfestem Beton (UHPC) neuartige filigrane Bauweisen im Betonbau, durch die Zugabe von Mikro-Stahldrahtfasern kann darüber hinaus aber auch die Zugfestigkeit und Duktilität der Betonmatrix maßgeblich erhöht werden.

Leichte und schlanke Betonbauteile erfordern aufgrund ihrer geringen Wandstärke und filigranen Beschaffenheit enge Fertigungstoleranzen und eine hohe Materialausnutzung. Diese kann in Bezug auf die Materialqualität der Betonmatrix und der Fasergehalte gesteuert werden. Bei der Faserverteilung und -orientierung ist die Präzision und Effizienz jedoch nicht gegeben: In Erwartung einer gleichmäßigen Verteilung der Fasergehalte im Bauteil werden die Mikro-Stahldrahtfasern während des Misch-

Robot-assisted, magnetic alignment of microsteel fibers in thin-walled UHPFRC components

The robot-assisted magnetic distribution and orientation of microsteel fibers in UHPFRC (Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete) will be used to produce more resource-efficient concrete components in the future. Current research focuses on the possibilities of digital and robot-based component production on the one hand and the potential of fiber orientation to increase the material efficiency of UHPFRC on the other. The chosen method for the distribution and orientation of the micro steel fibers in UHPFRC is based on the physical phenomenon of magnetism. Since steel fibers are ferromagnetic, their position in fresh concrete can be specifically changed by using magnetic fields. This magnetic treatment aims to align the position of the micro steel fibers in the concrete matrix during the production process according to the flow of forces and the motto "Form Follows Force". This defined arrangement of the fibers in a component is intended to significantly increase the effectiveness of the fiber content used and thus, in addition to improved processability, lead to a considerable reduction in the amount of fibers used, which offers great potential for saving ecological and economic resources.

vorgangs der Matrix zugeführt und als fertige Mischung in die Schalungen gegossen. Um eine bestimmte Konzentration an wirksamen Fasern in UHPFRC-Bauteilen zu gewährleisten, wird die Menge aller Fasern pauschal erhöht, mit der Konsequenz der schlechteren Verarbeitbarkeit des Frischbetons [1]. So wird ein beträchtlicher Teil der eingesetzten Stahlfasern nicht wirksam genutzt.

In diesem Beitrag werden neue Ansätze zur Herstellung ressourceneffizienter, leichter Betonbauteile mithilfe einer robotergestützten magnetischen Verteilung und Orientierung von Mikro-Stahldrahtfasern in UHPFRC vorgestellt. Die Mikro-Stahldrahtfasern sollen hierbei definiert im noch nicht abgebundenen Beton in die Zugbereiche des Bauteils bewegt werden und dort eine – entsprechend den zu erwartenden Zugspannungen – angeordnete Ausrichtung und Verteilung erhalten. Diese definierte Anordnung der Fasern in einem Betonbauteil soll die Effizienz des eingesetzten Faseranteils signifikant steigern und somit auch Potenzial für eine drastische Reduktion des Faseranteils bieten.

2 Material und Verfahren

2.1 Bisherige Versuche

Das Verfahren der magnetischen Ausrichtung von Stahlfasern in Frischbeton ist schon seit den 1970er Jahren bekannt [2]. Einem praxistauglichen Einsatz der Methode standen jedoch bislang die großen Bauteilabmessungen des konventionellen Massivbaus sowie der hohe manuelle Einsatz für das Führen der Magnete entgegen. Durch die neuartige Filigranbauweise mit UHPC in Kombination mit dem Einsatz sowohl leistungsstarker Dauer- und Elektromagnete als insbesondere auch von Robotern und deren anwenderfreundlichen Steuerung ist es heute möglich, das Verfahren für eine baupraktische Anwendung weiterzuentwickeln. Auch die bereits weit entwickelte FEM-Simulation einer kraftflussgerechten Bewehrungsführung für dünne faserverstärkte Bauteile, wie etwa aus CFK oder Textilbeton, kann für das Verfahren genutzt werden.

Entscheidend für eine wirtschaftliche Umsetzung des Verfahrens wird die reproduzierbare Steuerung der Verfahrensprozesse sein, die durch die Nutzung der neuesten Entwicklungen im Bereich der robotergestützten Fertigung sichergestellt wird. Die praktischen Anwendungsmöglichkeiten für dieses Verfahren der magnetischen Faserausrichtung sind vielfältig und für unterschiedliche Bauteilgruppen denkbar. Insbesondere kann die Methode bei der Herstellung von modular aufgebauten, dünnwandigen Stab- und Flächenelementen (Platten) als auch an den hochbelasteten Fügestellen (Zahnverbindungen) zum Einsatz kommen mit dem Ziel, eine eindeutige Leistungssteigerung dieser Hochleistungsbauteile zu erreichen. So kann das Verfahren zur Zugfestigkeitserhöhung in lokal hochbeanspruchten Bereichen wie z. B. im Bauteil-Fügebereich dienen oder zur Gradierung der Materialeigenschaften über die Bauteildicke angewendet werden.

Am ITE (Institut für Tragwerksentwurf) durchgeführte Laborversuche zur Ausrichtung der Stahlfasern mit Magneten haben bereits gezeigt, dass die mechanischen Eigenschaften damit positiv beeinflusst werden können [3, 4]. Anstoß für diese ersten Versuche war der Wunsch nach einer reproduzierbaren Leistungssteigerung dünnwandiger, mittels Zahnverbindungen trocken gefügter Hochleistungsbauteile aus UHPFRC, die in einer Kooperation des ITE und iBMB (Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz) der TU Braunschweig im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ entwickelt und untersucht wurden [5, 6]. Die Sinnhaftigkeit einer Traglaststeigerung im Fügebereich wird durch das Schadensbild von Scherversuchen an trocken gefügten Zahnverbindungen für dünnwandige Platten aus UHPFRC in Bild 1 (links) verdeutlicht. Die Versuche wurden vom ITE und iBMB in der ersten Förderperiode des SPP 1542 durchgeführt. Bild 1 (Mitte, rechts) veranschaulicht den Prozess der magnetischen Faserausrichtung für diesen Anwendungsfall in transluzentem Träger-Gel als Substitut für die eigentliche Betonmatrix:

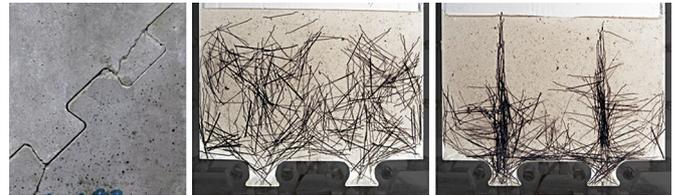


Bild 1 Typisches Rissbild nach Scherversuchen von trocken gefügten Zahnverbindungen zwischen dünnwandigen Platten aus UHPFRC (links); zufällige Verteilung von Stahlfasern (Mitte) und deren Transformation zu rissüberbrückenden Zahnwurzeln (rechts)
Typical crack pattern after shear tests of dry jointed tooth connections between thin walled UHPFRC plates (left); random distribution of steel fibers (center) and their transformation to crack-bridging tooth roots (right)

Die in dem Gel zunächst zufällig verteilten Stahlfasern (Mitte) werden mit Magneten, die auf der Schalungsaußenseite entsprechend der gewünschten Ausrichtung der Fasern bewegt werden, zu rissüberbrückenden Zahnwurzeln modelliert, welche parallel zu den Hauptzugspannungen und somit orthogonal zu den zu erwartenden Rissen verlaufen (rechts).

2.2 UHPFRC

Hochbeanspruchte und filigrane Betonbauteile erfordern enge Fertigungstoleranzen und eine hohe, verlässliche Materialausnutzung. Daher spielen nicht nur die beiden Komponenten Matrix und Bewehrung dieses Hybridmaterials eine entscheidende Rolle, sondern insbesondere auch ihr fein abgestimmtes Zusammenspiel. Neue Richtlinien zu Ultrahochfestem Beton werden derzeit vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) erarbeitet.

Für die Herstellung der in diesem Bericht beschriebenen Probekörper und Bauteile aus UHPFRC wurde aufgrund der benötigten Reproduzierbarkeit auf ein kommerzielles Produkt als Fertigmischung zurückgegriffen, welches selbstnivellierende Eigenschaften besitzt (Tab. 1) und von ITE und iBMB bereits verwendet und untersucht wurde [7, 8].

In Kombination mit den verwendeten Mikro-Strahldrahtfasern und Magnetfeldern kann das entwickelte Verfahren aufgrund der guten Fließeigenschaften des gewählten

Tab. 1 Ausgangsstoffe für den Beton UHPFRC ND-2,5 für Bauteilversuche [6]
Mix design for concrete UHPFRC ND-2,5 for component tests [6]

Ausgangsstoff	Masse [kg/m ³]
NANODUR® Compound 5941 Grau	1100
Halterner Quarzsand H33	1012
STRATEC Weidacon Mikro-Stahldrahtfasern (2,5 Vol.-%; d/l = 0,18/11 mm)	192
Fließmittel (GRACE ADVA® Flow 375)	21
Schwindreduzierer (GRACE Eclipse® Floor)	7
Wasser	159

Tab. 2 Materialkennwerte des UHPFRC ND-2,5 [6]
Material properties of UHPFRC ND-2,5 [6]

Kennwert	Mittelwert
Zylinderdruckfestigkeit (d/h = 80/160 mm)	138 MPa
Einachsige Zugfestigkeit (d/h = 80/160 mm)	9 MPa
Prismenbiegezugfestigkeit (b/h/l = 40/40/160 mm)	17 MPa
Elastizitätsmodul	49,2 GPa

Feinkornbetons sehr gut angewandt werden. Auch sind die spezifischen rheologischen Eigenschaften dieses UHPFRC für die Anwendung der Methode von Vorteil, da die Fasern bei ihrer Bewegung durch die Matrix einen im Vergleich zu konventionellem, grobkörnigem Beton geringen Widerstand erfahren. Die mittleren Materialkennwerte des UHPFRC ND-2,5 sind in Tab. 2 dargestellt. Für die Dimensionierung und Bemessung der einzelnen Bauteile in Abschn. 3.5 wurden die Mittelwerte aus den Standardversuchen verwendet.

Im Zuge der Entwicklung von UHPFRC haben sich insbesondere hochzugfeste Mikro-Stahldrahtfasern bewährt. Ein besonderes Merkmal der Matrix ist hierbei, dass aufgrund der hohen Festigkeit und Dichtigkeit des Gefüges eine mögliche Korrosion der Mikro-Stahldrahtfasern am Rand eines Bauteils keinen nachteiligen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit hat. Aus ästhetischen Gründen kann jedoch auch auf Drahtfasern aus korrosionsbeständigem Stahl zurückgegriffen werden [9]. Während des Ziehprozesses bei der Drahtherstellung bilden auch einige austenitische korrosionsbeständige Stähle Verformungsmartensit. Da Martensit ebenso wie Ferrit magnetisierbar ist, hat diese Umwandlung entsprechende magnetische Eigenschaften des austenitischen korrosionsbeständigen Stahls zu Folge und qualifiziert gezogene Fasern aus diesen Stahlsorten, insbesondere 1.4301 und 1.4305, für das Verfahren der magnetischen Faserausrichtung [10].

Am ITE werden auch sogenannte Fasercocktails, also Kombinationen verschiedener nicht magnetischer und magnetischer Fasergemische im Hinblick auf die gegenseitige Beeinflussung während der magnetischen Ausrichtung in der UHPC-Matrix untersucht. Diese Fasercocktails können Kombinationen aus Fasern unterschiedlicher Werkstoffe wie Stahl, Glas und Kunststoff sein, die in einem Bauteil aus UHPFRC eingesetzt werden, um unterschiedlichen, spezifischen Anforderungen zu genügen. So können etwa Kombinationen von Stahl- und Polypropylenfasern (PP-Fasern) das Bruch- und Verformungsverhalten hochfester Betone gezielt steuern und verbessern [11]. Für die Duktilität und Nach-Riss-Tragfähigkeit zeichnet dabei primär der rissüberbrückende Stahlfaseranteil verantwortlich. Zudem erhöht er neben der Zug- auch die Abriebfestigkeit des Bauteils. Durch die Verwendung der PP-Fasern hingegen werden die Schrumpfeigenschaft während des Abbindens, der Wassereindringwiderstand und der Brandwiderstand positiv beeinflusst [12].

2.3 Auswahl geeigneter Magnete

Grundsätzlich bieten sich zwei Arten von Magneten für das Verfahren an: Elektromagnete und Dauermagnete. Elektromagnete bestehen meist aus einer oder zwei stromdurchflossenen Spulen mit einem Kern aus einem weichmagnetischen Werkstoff. Diese Anordnung führt zu einem starken Magnetfeld, das über die zugeführte Stromstärke geregelt wird und wodurch der Intensitätsgrad der Faserausrichtung gesteuert werden kann. Ein Dauermagnet hingegen besitzt ein statisches Magnetfeld, das im Gegensatz zu Elektromagneten keinen elektrischen Stromfluss benötigt. Der Vorteil von Dauermagneten, insbesondere der von Neodym-Magneten, ist ein punktuell konzentriertes, starkes Magnetfeld, das diese besonders für die lokale Ausrichtung kurzer Fasern in dünnwandigen UHPFRC-Bauteilen prädestiniert. Die Steuerung der Feldstärke von Dauermagneten beschränkt sich auf die variable Distanz zu den zu bewegenden Fasern und der damit einhergehenden quadratischen Abnahme der Feldstärke.

Für das Verfahren der magnetischen Faserausrichtung bieten Elektromagnete eine Reihe von Vorteilen: Zum einen ist über die Steuerung der angelegten elektrischen Spannung eine definierte, über einen recht weiten Bereich regelbare und somit reproduzierbare Magnetfeldstärke zu erzielen, die sich sehr einfach in einen robotergestützten Prozess implementieren lässt. Auch sind Elektromagnete insbesondere für die Auslegung von stärkeren magnetischen Feldern gegenüber Dauermagneten die ökonomischere Lösung. Zum anderen eröffnet die FEM-Simulation die Möglichkeit, Elektromagnete entsprechend ihren gewünschten Eigenschaften zu entwerfen, also Magnetfelder zu modellieren, die exakt auf die Anforderungen der zu behandelnden Bauteilgeometrie abgestimmt sind. So ist es beispielsweise möglich, neben der Auslegung der Spule auch die Form des Eisenkerns entsprechend der gewünschten Feldgeometrie zu entwickeln.

Bild 2 zeigt die Simulation des Magnetfeldes eines Dauermagneten (links) und eines in Bezug auf seine magnetische Feldgeometrie äquivalenten Elektromagneten (rechts). Dessen U-förmiger Kern mit abgehenden Polshuhen spannt einen weiten Bereich auf, in dem die Feldlinien annähernd gerade verlaufen und der sich somit für eine zur Schalhaut parallele Ausrichtung der Fasern eignet.

2.4 Robotergestützte Fertigung

Die großen Potenziale der magnetischen Ausrichtung von Mikro-Stahldrahtfasern in UHPFRC können in idealer Weise mit den Vorzügen der Robotik zusammengeführt werden. Die robotergestützte Fertigung hat den Vorteil der akkurat einstellbaren Prozesssteuerung bezüglich der beiden Parameter Geometrie und Geschwindigkeit der auszuführenden Bewegungen (Roboterpfade).

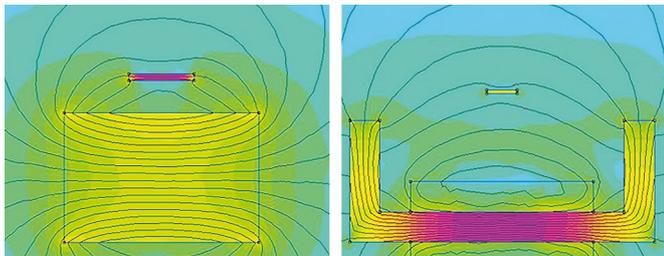


Bild 2 FEMM-Simulation der Magnetfelder eines Dauermagneten (links) und eines äquivalenten Elektromagneten mit gleicher magnetischer Flussdichte in einer einzelnen Stahlfaser (rechts)
FEMM simulation of magnetic fields of a permanent magnet (left) and equivalent electromagnets with identical magnetic flux density in a single steel fiber (right)



Bild 3 Offline-Simulation (links) und kleinmaßstäbliche Laborversuche zur roboterassistierten magnetischen Ausrichtung von Stahlfasern, Video veröffentlicht auf www.ite.tu-bs.de (rechts)
Offline-simulation (left) and small-scale experiments on robot-assisted magnetic alignment of steel fibers at the ITE, video published on www.ite.tu-bs.de (right)

Hierdurch können reproduzierbare Prozesse mit einer Präzision und Komplexität ausgeführt werden, wie sie durch eine manuelle Führung der Magnete nicht möglich ist. Der definierten Reproduzierbarkeit sowie der Entwicklung einer digitalen Prozesskette kommen auch bei einer späteren industriellen Anwendung des Verfahrens zentrale Rollen zu.

Am ITE wurden bereits zentrale Elemente dieser digitalen Prozesskette entwickelt, die für eine weitgehend automatisierte Anwendung des Verfahrens nötig sind. Bild 3 zeigt die für die visuelle Überprüfung notwendige Offline-Simulation der zuvor mit der CAD-Software Rhinoceros3D und Grasshopper erstellten Roboterbewegung (links) sowie erste Tastversuche der roboterassistierten magnetischen Ausrichtung von Stahlfasern in transluzentem Träger-Gel mithilfe des Knickarmroboters UR5 und entsprechenden Endeffektors (rechts).

Dem Institut für Tragwerksentwurf (ITE) steht seit 2016 die Roboteranlage DBFL (Digital Building Fabrication Laboratory) für Forschung und Lehre zur Verfügung (Bild 4). Das DBFL ist mit einer 14-achsigen Kinematik ausgestattet und ermöglicht in einem Bauraum von $18 \times 10 \times 2,5 \text{ m}^3$ sowohl das subtraktive Bearbeiten (Fräsen, Schleifen) als auch die additive Fertigung (Drucken, Spritzen, Schweißen). Mit dem DBFL ist es möglich, die kleinmaßstäblichen Laborversuche auf den Maßstab großformatiger Betonbauteile zu übertragen, wobei der



Bild 4 Das DBFL am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) an der Technischen Universität Braunschweig
The DBFL at the Institute of structural design (ITE) at the Technical University of Braunschweig

„Digital Workflow“ in beiden Maßstäben in seinen Grundzügen der gleiche ist: Zunächst dient eine FEM-basierte, lastpfadoptimierte Anordnung der Hauptspannungslinien eines belasteten Bauteils als Leitbild für eine optimale Ausrichtung der Mikro-Stahldrahtfasern längs der Hauptzugtrajektorien. Die digitalen Daten dieser FEM-Analyse dienen anschließend als Grundlage für die Roboterpfade zur magnetischen Faserausrichtung.

2.5 Effizienzsteigerung des Faseranteils

Zur Wirksamkeit von Fasern in Abhängigkeit von deren Orientierung in Betonbauteilen existieren zahlreiche Untersuchungen und Veröffentlichungen, wobei über den positiven Effekt der Faserorientierung in Zugrichtung Konsens herrscht und lediglich die Größenordnungen differieren [13–15]. Die Möglichkeit zur Steuerung der mechanischen Eigenschaften im UHPFRC durch die Beeinflussung des Fasergehalts und der Faserorientierung sind bereits im Labormaßstab untersucht worden [16, 17]. CHRISTOPH GEHLEN und seine Mitarbeiter am Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der TU München haben eine weitere Methode entwickelt, bei der Faserorientierung und -konzentration in UHPFRC durch das Rotieren einer mit noch flüssigem Faserfeinkornbeton verfüllten Schalung beeinflusst werden [18]. Durch dieses Verfahren sollen die Fasern derart nach außen geschleudert werden, dass die Zugtragfähigkeit an den Rändern des Bauteils deutlich gesteigert wird. Die angedachten Tragwerke beschränken sich auf segmentierte Schalenelemente. Eine andere Methode der Einflussnahme auf die Faserausrichtung stellt die gezielte Steuerung der Befüllrichtung des flüssigen Faserbetons in die Schalung dar. Hierzu wurden in der Vergangenheit am iBMB der TU Braunschweig bereits umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Faserorientierung und

Faserverteilung und deren Einfluss auf die Nachrisszugfestigkeit bzw. Leistungsfähigkeit des Faserbetons durchgeführt [19]. Untersuchungen zur möglichen Einflussnahme auf die Faserorientierung während des Herstellungsprozesses durch robotergestützte magnetische Ausrichtung hingegen sind Gegenstand der hier dargelegten Forschung.

Maßgebend für die Effizienz der Mikro-Stahldrahtfasern in der UHPFRC-Matrix sind – neben dem prozentualen Gehalt – die Fasergeometrie, das Verbundverhalten und die lokale Verteilung und Orientierung der Fasern [20, 14]. Insbesondere ist nur jener Faseranteil für die Übertragung von Zugkräften relevant, der in einem Bauteil parallel oder in einer moderaten Abweichung zur Richtung der auftretenden Zugspannungen liegt. Auch sind nur jene lokalen Stellen von Bedeutung, an denen Zugspannungen tatsächlich auftreten [21]. In einem Bauteil mit völlig homogener Verteilung der Fasern ist somit nur etwa die Hälfte der eingesetzten Fasern für die Übertragung der Zugkräfte relevant. Nur sie führen zur gewünschten lastübertragenden Rissvernähung im gerissenen Zustand des Bauteils sowie zur damit einhergehenden Versagensankündigung und Steigerung der Nach-Riss-Tragfähigkeit [22]. Für die Übertragung von Druckkräften dagegen sind Fasern nicht wirksam und jener Faseranteil, der in einem Bauteil in etwa parallel zu den auftretenden Druckkräften orientiert ist, bleibt wirkungslos [23].

Durch die bisherigen Forschungen auf dem Gebiet des UHPFRC wird deutlich, dass die gezielte Ausrichtung und lokale Anordnung der Mikro-Stahldrahtfasern in der Betonmatrix insbesondere entlang der Zugspannungen ein enormes Einsparpotenzial mit sich bringen. Da die Mikro-Stahldrahtfasern rund 50% der Materialkosten von UHPFRC ausmachen [24], stellt die Optimierung der Verteilung und Ausrichtung auch ein hohes wirtschaftliches Potenzial dar. So würde eine angestrebte Reduktion des Fasergehalts um 40% eine Kostenersparnis von rund 20% pro Tonne UHPFRC bedeuten.

3 Erste Untersuchungen zur Effizienz ausgerichteter Stahlfasern

3.1 Herstellen der Versuchskörper

In Versuchen zur maximal möglichen Steigerung der Biegezugfestigkeit wurden am ITE zwei Serien aus zehn magnetisch behandelten und zehn unbehandelten Mörtelprismen verglichen. Die Mörtelprismen wurden aus zweihäufig geschaltem, je 40 mm starken UHPFRC-Platten mithilfe des Wasserstrahlschneidverfahrens getrennt, um eine Einflussnahme des leistungssteigernden Randeffekts der unbehandelten Versuchskörper zu vermeiden. Dieser Effekt betrifft insbesondere solche Versuchskörper, die in konventionellen, fünfseitigen Einzelschalungen gegossen werden, da die am Schalungsrand befindlichen Fasern dazu neigen, sich entlang dieser Flächen auszurichten. Für die magnetische Behandlung des noch flüssigen UHPFRC kurz nach dem Befüllen der Schalungen kam

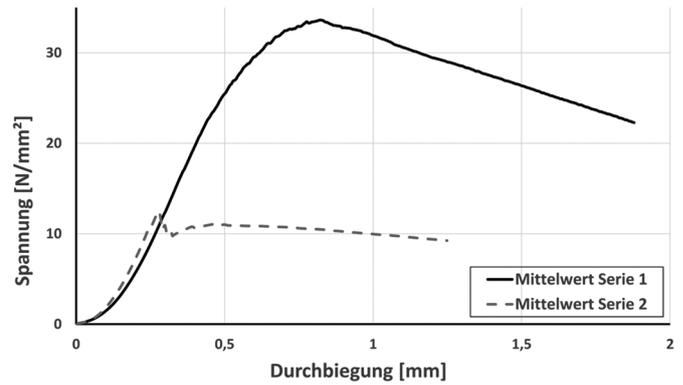


Bild 5 Spannungs-Durchbiegungs-Diagramm: Mittlere Biegezugfestigkeit [N/mm²] zu Weg [mm]; Prüfverfahren: 3-Punkt-Biegeversuch
Mean Stress-deflection diagram: Bending tensile strength [N/mm²] to displacement [mm]; Test method: 3-point bending test

ein quaderförmiger Neodym-Magnet (60 × 40 × 40 mm³) mit einer Zugkraft von 2800 N zum Einsatz. Dieser wurde bei der behandelten Serie dreimal mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 0,1 m/s und einem Bahnabstand von 50 mm robotisch über eine Kunststoffschalung aus Polycarbonat mit einer Wandstärke von 10 mm geführt.

Wie in Bild 5 dokumentiert, ergaben die Versuchsergebnisse des 3-Punkt-Biegezugversuchs eine eindrucksvolle, mittlere Steigerung der maximalen Biegezugfestigkeit der Serie 1 (magnetisch ausgerichtete Fasern) gegenüber der Serie 2 (zufällige Faserverteilung) von rund 260 Prozent.

Diese enorme Steigerung ist auf zwei Effekte zurückzuführen. Zum einen auf die ideale Orientierung der Fasern entlang des Zugkräfteverlaufs in den Probekörpern, zum anderen auf die gesteigerte Konzentration der Fasern in der Zugzone, wodurch sich der innere Hebelarm im Querschnitt des Probekörpers signifikant erhöht, vgl. Gl. (1) nach [7].

$$M_R = \frac{2}{3} \cdot F_c \cdot x + F_f \cdot 0,95 \cdot (h - x) \quad (1)$$

3.2 Optische Überprüfung der magnetischen Faserausrichtung

Um eine sofortige visuelle Kontrolle über den Einfluss der Magnetfelder auf die Bewegung der Fasern zu ermöglichen, hat sich die Verwendung eines medizinischen Ultraschallgels als Ersatz für die eigentliche Betonmatrix bewährt. Um sich der Viskosität der noch flüssigen Betonmatrix zu nähern, wird das Mischungsverhältnis dieses Ersatzstoffs auf 55 Gewichtsteile Gel pro 100 Gewichtsteile Wasser eingestellt. In ersten Versuchsserien wurde so die robotergestützte Herstellung von parallelen und sich kreuzenden Fasersträngen untersucht [3].

Bild 6 zeigt exemplarisch einen der Roboterpfade (links) mit dem entsprechenden Ergebnis der Stahlfaserausrichtung (rechts). In diesem Versuch wurde die Mög-

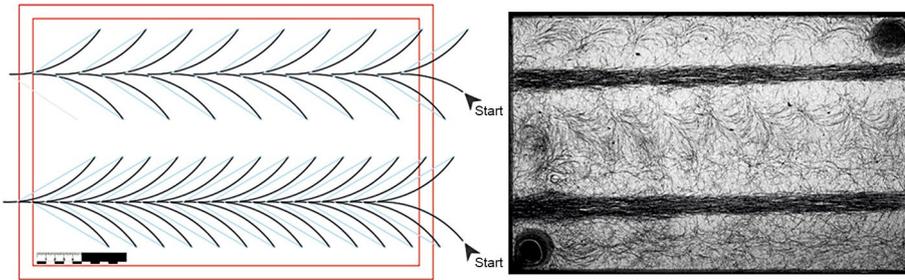


Bild 6 Rispenförmige Roboterpfade (links), verdichtete Strangbildung nach mehreren Durchläufen (rechts), aus [3]
Panic-shaped robot paths (left), concentrated strand formation after several passes (right), from [3]

lichkeit untersucht, durch Roboterpfade ähnlich einer Blattrispe zunächst möglichst viele Fasern auf einem Streifen zu konzentrieren, um in einem anschließenden Durchgang den Streifen mit linearen Pfaden weiter zu verdichten.

3.3 Computertomografische Analyse der Faserorientierung und -verteilung

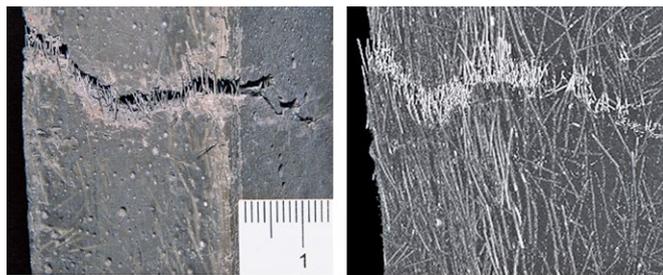
Die Erfassung der Mikro-Stahldrahtfasern in der UHPFRC-Matrix erfolgte mittels Mikro-Computertomografie (Mikro-CT). Eine spezielle Softwarelösung ermöglichte die exakte und automatisierte Analyse der Mikro-Stahldrahtfasern in Bezug auf deren Verteilung, Menge, Lage und Orientierung in den Probekörpern. Ausgehend von der Faserorientierung und Verteilung innerhalb der Probekörper konnten somit die Auswirkungen der eingesetzten Verfahrensparameter der magnetischen Faserausrichtung auf deren Anordnung und Orientierung kontrolliert werden. Besonderes Augenmerk lag auf der Erfassung des Faserorientierungsbeiwerts, der den Einfluss der

Ausrichtung auf die Wirksamkeit der Faser in einer bestimmten Achsrichtung beschreibt [25].

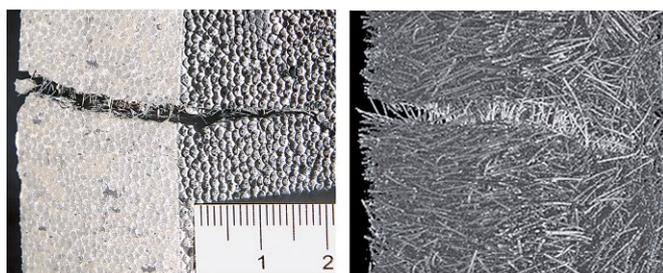
Bild 7 zeigt vergleichend dazu Biegerisse eines konventionell betonierten und eines magnetisch behandelten Mörtelprismas, jeweils in Detailaufnahme und CT-Scan. Auffällig ist die dichte, im Zugbereich konzentrierte und längs der Zugspannungen orientierte Faseranordnung des magnetisch behandelten Probekörpers (oben) im Vergleich zur zufälligen Stahlfaserverteilung und -ausrichtung des konventionellen Probekörpers (unten).

Auf der Annahme gründend, dass eine optimale Ausrichtung der Fasern idealerweise parallel zu den Hauptzugspannungen und somit orthogonal zu den zu erwartenden Rissen verläuft, werden hier exemplarisch zwei Verzahnungen aus UHPFRC gezeigt, wobei eine mit den Magnetfeldern behandelt und die andere konventionell betoniert wurde. In Bild 8 sind die CT-Scans der beiden Probenstücke gegenübergestellt.

Der unbehandelte Probekörper (Bild 8a) zeigt eine Faserverteilung, die sich entsprechend der Fließrichtung während des Einfüllens des Frischbetons einstellt. Im Unterschied dazu wurde der zweite Probekörper (Bild 8b) unmittelbar nach dem Einfüllen des Frischbetons stirnseitig mithilfe eines Magnetfelds ausgerichtet. Deutlich ist die



Serie 1: magnetisch ausgerichtete Fasern



Serie 2: zufällige Faserverteilung

Bild 7 Foto und CT-Scan der Rissbilder von Probekörpern mit (oben) und ohne Magnetbehandlung (unten)
Photo and CT scan of the crack images of specimens with (top) and without magnetic treatment (bottom)

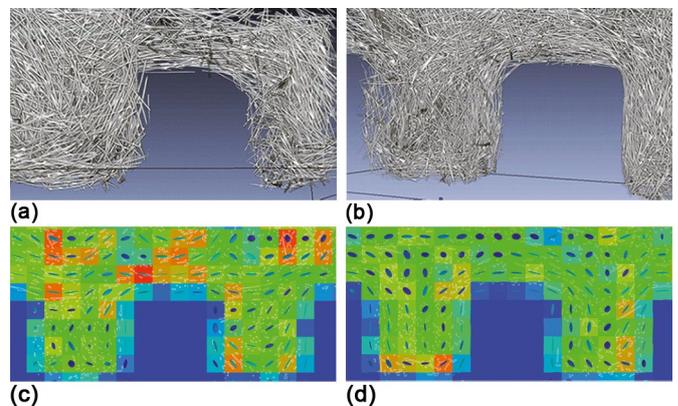


Bild 8 CT-Scan einer Zahnverbindung aus UHPFRC ohne (a) und mit (b) Magnetbehandlung; Rasterflächen-Analyse der Faserorientierung ohne (c) und mit (d) Magnetausrichtung
CT scan of a tooth connection made of UHPFRC without (a) and with (b) magnetic treatment; screen area analysis of the fiber orientation without (c) and with (d) magnetic alignment

Strangbildung über den Ecken zu erkennen, die eine gesteigerte Schubfestigkeit der Zahnverbindung erwarten lässt. Die Bilder 8c und 8d zeigen die mithilfe eines Software-Tools (VG Studio Max – Faserverbundwerkstoffanalyse) durchgeführte Analyse der Faserorientierung innerhalb der beiden Zahnverbindungen in je einem gerasterten Schnitt durch die CT-Scans. Jede einzelne Rasterfläche zeigt die lokale, durchschnittliche Faserausrichtung. Diese Analyse bestätigt und quantifiziert die erkennbare Tendenz: Durch die magnetische Behandlung wurde eine große Anzahl der Mikro-Stahldrahtfasern entlang der Zahnkontur gleichmäßig und bogenartig ausgerichtet und liegt nach magnetischer Behandlung orthogonal zu den zu erwartenden Rissen an den Zahninnenecken (Bild 8d). Die Auswertung der CT-Scans hat ebenfalls gezeigt, dass ein Verbund zwischen Mikro-Stahldrahtfasern und Beton auch in Bereichen mit hohen Faserkonzentrationen mit einem Feinkorn UHPFRC möglich ist.

3.4 Rechnerische Biegezugfestigkeit

Beim Nachweis des Biegetragverhaltens von Stahlfaserbeton wird ein homogenes Material im Querschnitt unterstellt, welches mit globalen Faktoren für unterschiedliche Faserverteilungen und Faserorientierungen modifiziert wird. Um jedoch die Biegezugfestigkeit von dünnwandigen Bauteilen aus UHPFRC ohne konventionelle Biegezugbewehrung nachzuweisen, ist es notwendig, den mechanischen Einfluss der Stahlfasern auf das Tragverhalten des Bauteils genauer zu beschreiben. Hierbei ist es nicht ausreichend, ausschließlich über die Bestimmung der globalen Faserorientierung und des globalen Fasergehalts eine Aussage über die mechanischen Bauteileigenschaften zu treffen. So konnte in [7] gezeigt werden, dass es zusätzlich zum bereits bekannten Maßstabeffekt und zum Einfluss der Betonierung Einflüsse aus lokalen Abweichungen bei der Faserorientierung und dem Fasergehalt zu beachten gilt. Alle notwendigen Einflussfaktoren sind in der Fasereffektivität $k_{f,eff}$ nach [7] zusammengefasst und beschrieben worden.

Durch den Ansatz der Fasereffektivität ist es nun möglich, den Biegezugnachweis nach FEHLING et al. [26] zu modifizieren und das Biegetragverhalten eines Bauteils aus UHPFRC zu berechnen, vgl. Gl. (2).

$$M_R = \frac{2}{3} \cdot F_c \cdot x + F_f \cdot 0,55 \cdot (h - x) \quad (2)$$

mit:

F_c Druckkraft

F_f Faserzugkraft

h Bauteilhöhe

x Druckzonenhöhe

Zur Bestimmung der Biegetragfähigkeit von dünnwandigen Bauteilen aus UHPFRC wird der Faserzugkraftanteil im Kräftegleichgewicht nach [7] mit der Fasereffektivität erweitert, um das Tragverhalten von dünnwandigen

UHPFRC-Bauteilen genau beschreiben zu können, vgl. Gl. (4).

$$F_c = 0,5 \cdot b \cdot x \cdot f_{cm} \quad (3)$$

$$F_f = 0,81 \cdot (h - x) \cdot b \cdot (k_{f,eff} \cdot \sigma_{cf0}) \quad (4)$$

mit:

b Bauteilbreite

f_{cm} mittlere Betondruckfestigkeit

$k_{f,eff}$ Fasereffektivität

σ_{cf0} Faserwirksamkeit

3.5 Magnetbehandlung flächiger Bauteile

Die Faserausrichtung stellt in einer zukünftigen Gesamtfertigungskette einen von mehreren, sich aufeinander beziehenden, digital gesteuerten Bearbeitungsschritten für die Herstellung eines Bauteils dar. Die Anwendungsmöglichkeiten für dieses Verfahren sind vielfältig und für unterschiedliche Bauteilgruppen denkbar. Wie bereits erwähnt, kann das Verfahren zur Zugfestigkeitserhöhung in lokal hochbeanspruchten Bereichen wie etwa im Bauteil-Fügebereich dienen. Darüber hinaus bietet sich das Verfahren zur Leistungssteigerung von flächigen Bauteilen an.

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ wurde das Verfahren der magnetischen Ausrichtung von Mikro-Stahldrahtfasern in dünnwandigen UHPFRC-Bauteilen für zwei großmaßstäbliche UHPFRC-Tragwerke eingesetzt. Schwerpunkt der Untersuchungen in den bearbeiteten Teilprojekten war es, durch intelligente Kopplung einzelner, modular aufgebauter Stab- und Flächenelemente hybride, zusammenwirkende Tragesysteme zu entwickeln. Durch Kombination trocken gestoßener Stäbe mit schubfest verbundenen, ebenen oder gekrümmten Flächenelementen konnte so die Realisierbarkeit baupraktisch relevanter, überwiegend biegebeanspruchter Tragwerkstypen nachgewiesen werden. Das Besondere dieser neuen Bauweise ist es, dass ein Gesamttragwerk aus einzelnen Betonfertigbauteilen zusammengesetzt wird, indem diese trocken, also ohne Vergussmörtel, gefügt werden.

Das Verfahren wurde hier zum einen für die Modellierung der Schubbewehrung in den Seitenwänden eines der vier Kreuzmodule eines Gitterrosts [27] verwendet. Zum anderen wurde es für die Biegebewehrung der Deckensegmente eines hocheffizienten Tragwerks aus UHPFRC, dem Demonstrator uni-con², eingesetzt. In Bild 9 sind die Verläufe der magnetisch ausgerichteten Stränge aus Mikro-Stahldrahtfasern entsprechend dem zuvor simulierten Verlauf der Hauptzugtrajektorien dargestellt. Zum Einsatz kam hier ein Neodym-Magnet ($80 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$, Zugkraft: 2800 N). Das Verfahren konnte sowohl an liegenden als auch an stehenden Schalungen der dünnwandigen Bauteile (15 bis 25 mm) ohne Absinken der Stränge in der flüssigen Matrix angewendet werden.

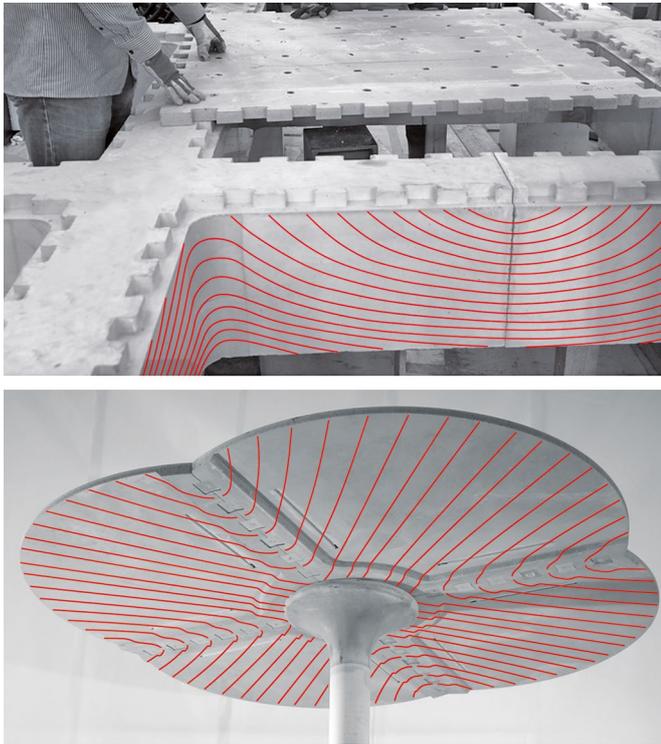


Bild 9 Roboterpfade (rot), projiziert auf die Seitenwände zweier Balkensegmente des Gitterrosts aus [27] (oben) und die trocken gefügten Deckensegmente des Demonstrators uni-con² (unten)
 Robot path (red) projected onto the sidewalls of two beam segments of the coffered ceiling in [27] (top) and onto the dry jointed ceiling segments of the demonstrator uni-con² (bottom)

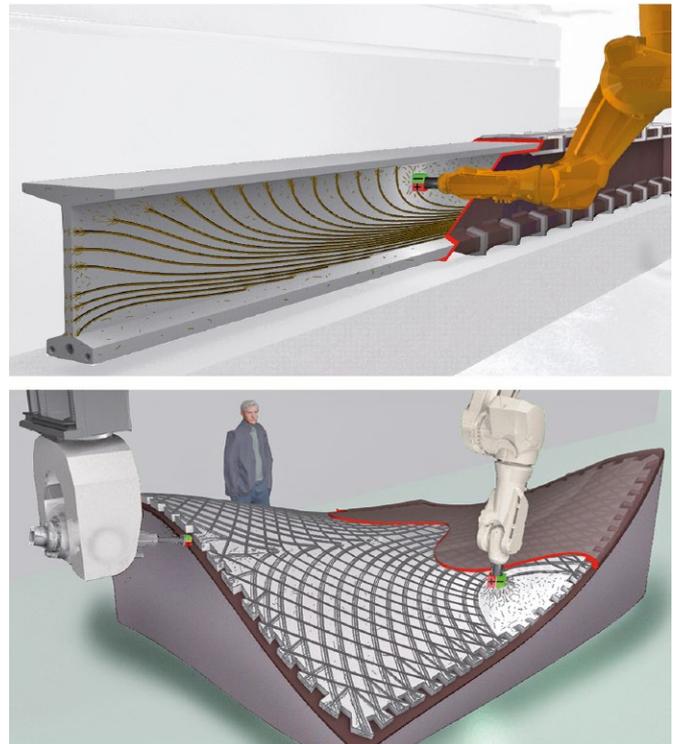


Bild 10 Visualisierungen robotergestützter Modellierung von kraftflussoptimierten Bewehrungssträngen aus Mikro-Stahldrahtfasern in UHPFRC-Bauteilen (Schalung teilweise fehlend dargestellt)
 Visualizations of robot-supported modelling of force-flow-optimized reinforcement strands of micro steel fibers in UHPFRC components (formwork partly shown missing)

Über diese beiden Anwendungsfälle hinaus ist das Verfahren auch für weitere UHPFRC-Bauteile denkbar, wie etwa für die Modellierung der Schubbewehrung in Doppel-T-Trägern oder der gesteuerten Faserkonzentration im Stoßbereich von Schalensegmenten aus UHPFRC.

In Bild 10 (oben) ist als ein möglicher Produktionsprozess die Modellierung von Bewehrungssträngen im Schubfeld eines Trägers aus UHPFRC dargestellt: Stränge aus Mikro-Stahldrahtfasern werden in der noch flüssigen Matrix mithilfe der robotergestützten magnetischen Ausrichtung durch Abfahren der Roboterpfade entlang der Außenseite der Schalung modelliert, die zuvor entsprechend den im Gesamtragwerk zu erwartenden Zugtrajektorien berechnet wurden. Bild 10 (unten) zeigt, wie durch den Einsatz zweier kinematischer Einheiten unterschiedlich bestückte Endeffektoren (Magnetköpfe) eingesetzt werden können, die zeitgleich verschiedene Regionen eines Bauteils, wie etwa die Randverzahnung und die flächigen Regionen eines Schalensegments, magnetisch nachbehandeln.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der beschriebenen Forschung ist es, die Grundlage für die Herstellung ressourceneffizienter Bauteile mithilfe der gesteuerten, robotergestützten magnetischen Verteilung und Orientierung von Stahlfasern in

UHPFRC (Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete) zu schaffen. Das Verfahren setzt dabei zwischen den Möglichkeiten digitaler und robotergestützter Bauteilfertigung auf der einen Seite und den Potenzialen der Faserausrichtung zur Steigerung der Materialeffizienz von UHPFRC auf der anderen Seite an. Der hier dargelegte Forschungsansatz zielt darauf ab, die Lage der Stahlfasern in der flüssigen Betonmatrix während des Produktionsprozesses entsprechend dem angenommenen Kraftflussverlauf magnetisch auszurichten. Diese definierte Anordnung der Fasern steigert die Effizienz des eingesetzten Faseranteils in einem Bauteil signifikant und kann so zu einer großen Leistungssteigerung oder einer erheblichen Reduktion der eingesetzten Mikro-Stahldrahtfasern führen. Dadurch ist neben einer verbesserten Verarbeitbarkeit des UHPFRC ein großes Einsparpotenzial an ökologischen und ökonomischen Ressourcen gegeben. Entscheidend für eine wirtschaftliche, baupraktische Anwendung des im Labormaßstab bereits erprobten Verfahrens wird zukünftig die reproduzierbare Steuerung der Verfahrensprozesse sein, die durch die Nutzung der neuesten Entwicklungen im Bereich der robotischen Fertigung sichergestellt werden soll.

Über die Anwendung des Verfahrens für in Schalungen gegossene Bauteile aus UHPFRC hinaus ist die Nutzung des Prinzips der magnetischen Faserausrichtung in modifizierter Form auch in der additiven Fertigung von Beton-



Bild 11 Am ITE im Shotcrete 3D Printing (SC3DP)-Verfahren hergestelltes Wandelement
Shotcrete 3D Printed (SC3DP) wall element produced at ITE

bauteilen möglich. So haben erste Tastversuche zum Einsatz des Verfahrens in einem kombinierten Prozess mit dem im DBFL entwickelten Shotcrete 3D Printing (SC3DP) [28] bereits vielversprechende Ergebnisse zeigen können, die eindeutige Hinweise auf eine mögliche, neuartige Bewehrungsstrategie für schalungslos hergestellte Betonbauteile, wie etwa das in Bild 11 dargestellte Wandelement, geben.

Das Forschungsfeld der magnetischen Faserausrichtung birgt somit über die beschriebenen Anwendungsmöglichkeiten hinaus das Potenzial, auf weitere, innovative Bauweisen mit Beton ausgeweitet zu werden.

Dank

Der besondere Dank der Autoren gilt allen im Forschungsteam mitarbeitenden Kolleginnen und Kollegen im Institut für Tragwerksentwurf (ITE) und im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung sowohl im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ als auch der bereits bewilligten, zukünftigen Förderung des hier ausgeführten Forschungsfeldes am ITE.

Literatur

- [1] FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; TEICHMANN, T.: *Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC)*. Kassel: Kassel University Press GmbH, 2004.
- [2] KOCH, K.-H.: *Bewehrtes Leimgefüge*. Deutsches Patentamt Offenlegungsschrift, Veröffentlichungsnummer 2217963, 1979.
- [3] LEDDEROSE, L.; KLOFT, H.: *Preliminary Investigations for magnetic rearrangement of Steel Fibers in UHPFRC*. Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium “Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints”, 2014. Brasilia, Brasilien, 8 S. (veröffentlicht auf USB-Stick).
- [4] LEDDEROSE, L.; KLOFT, H.: *Robot-Aided Rearrangement of Steel Fibers in UHPFRC by Magnetic Forces*. Proceedings of the IASS-SLTE 2015 Symposium “Future Visions”, 2015. Amsterdam, Niederlande, 9 S. (veröffentlicht auf USB-Stick).
- [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.; LEDDEROSE, L.; WIRTH, F.; BUDELMANN, H.; KLOFT, H.: *Von der Bauteilfügung zu leichten Flächentragwerken: Trocken gefügte Flächenelemente aus UHPFRC*. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), Heft 12, S. 806–815.
- [7] LEHMBERG, S.: *Herstellung und Eigenschaften von dünnwandigen, trocken gefügten Bauteilen aus ultrahochfestem faserverstärktem Feinkornbeton*, Dissertation TU Braunschweig, 2018.
- [8] 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.
- [9] HEINEMEYER, S.: *Zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern aus ultrahochfestem Beton mit Verbundleisten*. Dissertation, RWTH Aachen, 2011.
- [10] Informationsstelle Edelstahl: *Merkblatt 827, Magnetische Eigenschaften nichtrostender Stähle*. 1. Auflage, 2013.
- [11] KÖNIG, G., KÜTZING, L.: *Mit einem Fasercocktail zur Duktilität von Druckgliedern aus Hochleistungsbeton*. Berlin: Ernst & Sohn 1989.
- [12] WIETEK, B.: *Stahlfaserbeton. Grundlagen und Praxisanwendung*. 1. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH 2008.
- [13] LEUTBECHER, T.: *Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem ultrahochfestem Beton (UHPC)*. Dissertation, Universität Kassel, 2007.
- [14] FRETTLÖHR, B.: *Bemessung von Bauteilen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton (UHFFB)*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2011.
- [15] WALRAVEN, J.: *High performance fiber reinforced concrete. Progress in knowledge and design codes*. Mater Struct 42 (2009), (9), S. 1247–1260.
- [16] EIDE, M. B.; HISDAL, J.-M.: *Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) – State of the art*. COIN Project report 44. Oslo, Norwegen, 2012.
- [17] TOUTLEMONDE, F.; RESPLENDINO, J.: *Designing and Building with UHPFRC. State of the Art and Development*. England: Wiley 2010.
- [18] ILLGUTH, S.; LOWKE, D.; GEHLEN, C.: *Effiziente Schalentragwerke aus funktional gradierten Betonfertigteilen*. Leicht Bauen mit Beton – Forschung im DFG SPP 1542, Förderphase 1. Dresden: Eigenverlag TU Dresden, 2014.

- [19] EMPPELMANN, M.; TEUTSCH, M.: *Faserorientierung und Leistungsfähigkeit von Stahlfaser- sowie Kunststofffaserbeton*. Beton 59 (2009), S. 254–259.
- [20] BERTRAM, G.: *Zum Verbund- und Querkrafttragverhalten von Spannbetonträgern aus ultra-hochfestem Beton*. Dissertation, RWTH Aachen, 2012.
- [21] BONZEL, J.; SCHMIDT, M.: *Verteilung und Orientierung von Stahlfasern im Beton und ihr Einfluß auf die Eigenschaften von Stahlfaserbeton*. Beton 34 (1984), S. 463–470.
- [22] BERNIER, G.; BEHLOUL, M.: *Effet de l'orientation des fibres sur le comportement mecanique des BPR*. 2e colloque international francophone sur les betons renforce's de fibres metalliques (1996), S. 233–240.
- [23] PFYL, T.: *Tragverhalten von Stahlfaserbeton*. Dissertation, ETH Zürich, 2003.
- [24] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: *Sachstandsbericht „Ultrahochfester Beton“*. DAfStb-Heft 561. Beuth Verlag GmbH 2008.
- [25] SCHNELL, J.; SCHLADITZ, K.; SCHULER, F.: *Richtungsanalyse von Fasern in Betonen auf Basis der Computer-Tomographie*. Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), Heft 2, S. 72–77.
- [26] FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; WALRAVEN, J. C.; LEUTBECHER, T.; FRÖHLICH, S.: *Ultrahochfester Beton – UHPC*. KONRAD BERGMEISTER, FRANK FINGERLOOS, JOHANN DIETRICH WÖRNER (Hrsg.): *Beton-Kalender 2013: Lebensdauer und Instandsetzung – Brandschutz*, 2013, S. 118–239.
- [27] LEDDEROSE, L.; LEHMBERG, S.; WIRTH, F.; BUDELMANN, H.; KLOFT, H.: *From digital design to precise production: Dry-jointed coffered ceiling made of UHPFRC-components*. BÖGLE, A.; GROHMANN, M. (Eds.): *Interfaces: architecture. engineering.science – Proceedings of the IASS Annual Symposium*, Hamburg, (2017), S. 124.
- [28] LINDEMANN, H.; GERBERS, R.; IBRAHIM, S.; DIETRICH F.; DRÖDER, K.; RAATZ, A.; KLOFT, H.: *Development of a shotcrete 3D-printing (SC3DP) technology for Additive Manufacturing of reinforced freedom concrete structures*. First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018, Zürich: Springer, 2018.

Autoren



Dipl.-Ing. (M. a. A) Lukas Ledderose (Arch.)
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf (ITE)
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
l.ledderose@tu-bs.de



Dr.-Ing. Sven Lehmborg
Materialprüfanstalt für das Bauwesen Braunschweig
Fachbereich Konstruktionen und Baustoffe
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig
s.lehmborg@ibmb.tu-bs.de



Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Fachgebiet Baustoffe
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig
h.budelmann@ibmb.tu-bs.de



Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf (ITE)
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
h.kloft@tu-braunschweig.de