

Zur Untersuchung von stahlfaserverstärkten Betonen auf Basis der 3D-Computer-Tomographie

Frank Schuler ^{#1}, Katja Schladitz ^{*2},

[#]*Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion, Technische Universität Kaiserslautern
Paul-Ehrlich-Str. Geb. 14, 67663 Kaiserslautern*

¹*fschuler@rhrk.uni-kl.de*

^{*}*Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik
Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern*

²*katja.schladitz@itwm.fraunhofer.de*

Abstract—In einem gemeinsamen Forschungsprojekt haben die TU Kaiserslautern und das Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM nachgewiesen, dass die Computer-Tomographie (CT) kombiniert mit moderner Bildverarbeitungs- und Analysesoftware geeignet ist, die Faserorientierung und Faserverteilung in faserverstärkten Hochleistungsbetonen zu untersuchen. Gegenüber bisher angewendeten Methoden eröffnet die Computer-Tomographie die Möglichkeit, für Betone mit Fasern und Gelegen aller Art die Faserorientierung und Faserverteilung im gesamten Volumen eines Probekörpers zu betrachten und zu analysieren.

Nach Abschluss dieser Machbarkeitsstudie stehen nun Versuche im Bereich stahlfaserverstärkter Betone im Vordergrund. Dabei sollen neue Anwendungsfelder in der Praxis und im Bereich der Forschung erschlossen werden.

Ein neuartiger Versuchsaufbau der die CT-Aufnahme eines Probekörpers während der Belastung erlaubt, ermöglicht erstmalig die in-situ Beobachtung der Betonmikrostruktur und des Faserhaltens bei mechanischer Beanspruchung.

I. EINLEITUNG

Betone unterschiedlichster Art sind hervorragend geeignet, Druckspannungen aufzunehmen, jedoch ist die Zugfestigkeit dieser Betone wesentlich niedriger und von vielen äußeren Parametern abhängig. Gerade bei steigender Druckfestigkeit der Betone ist das Nachbruchverhalten, sprich die Duktilität des Baustoffes, nicht zufriedenstellend. Um die geforderte Duktilität zu erreichen und dem spröden Bruchverhalten entgegenzuwirken, werden diesen Betonen Fasern beigemischt. Für die Verbesserung der Festbetoneigenschaften ist die Fasermenge, Faserorientierung und Faserverteilung ausschlaggebend. Dies macht eine Überwachung dieser Eigenschaften notwendig, sei es zur Qualitätssicherung auf der Baustelle oder im Bereich der Forschung zur Weiterentwicklung von Hochleistungsbetonen.

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde daher die Möglichkeit untersucht, Fasern in faserverstärkten Betonen mithilfe der Computer-Tomographie (CT) zu detektieren und hinsichtlich ihrer Orientierung und Verteilung zu analysieren. Bei diesen Vorversuchen kamen unterschiedliche Faserarten in Betonen mit unterschiedlicher Probengeometrie zum Einsatz. Diese Studie hat gezeigt, dass die CT geeignet ist, die Faserorientierung und -verteilung zu quantifizieren. Insbesondere kann

der Orientierungsbeiwert mit Methoden der 3D-Bildanalyse robust gemessen werden, siehe [1] und [2].

Weiterführende Arbeiten umfassten insbesondere Versuche zur Beurteilung der Wiederholstreuung der Messergebnisse sowie die Entwicklung vereinfachter bzw. teilweise automatisierter Analysetools.

Aufgrund der Anwendbarkeit in der Praxis und der Mitarbeit des Fachgebiets Massivbau und Baukonstruktion der TU Kaiserslautern im Schwerpunktprogramm SPP 1182 „Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem Beton“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) konzentrieren sich die aktuellen Arbeiten einerseits auf den Schwerpunkt „stahlfaserverstärkte Ultrahochfeste Betone“ und andererseits auf die Untersuchung von „normal festen“ Stahlfaserbetonen.

Neben der Darlegung von möglichen Anwendungsgebieten der im Folgenden vorgestellten CT-Analyse-Verfahren, liegt der Fokus dieses Aufsatzes auf der Beobachtung und Beschreibung des Nachbruchverhaltens dieser Betone mithilfe dieser Verfahren.

Fig. 1 gibt einen strukturierten Überblick über die bisher durchgeführten und geplanten Anwendungen der CT-Analyse-Methoden.

II. COMPUTER-TOMOGRAPHIE

A. Grundlagen

Mithilfe der Computer-Tomographie können zerstörungsfrei alle Arten von Fehlstellen in Bau-/Werkstoffen (Poren, Lunker, Einschlüsse, etc.) detektiert und als virtuelle, dreidimensionale Körper dargestellt werden. Hierbei können Größe und Lage solcher Fehlstellen genau vermessen werden.

Die 3D-Computer-Tomographie ist ein bildgebendes, zerstörungsfreies Prüfverfahren, bei dem das Objekt aus unterschiedlichen Richtungen mit Röntgenstrahlen durchstrahlt wird. Dabei entstehen Projektionsbilder, welche die Stärke der Absorption an verschiedenen Stellen abhängig von der Materialart und Materialstärke widerspiegeln. Aus den Projektionen wird die dreidimensionale Aufnahme tomographische rekonstruiert.

Zur Erzeugung eines tomographischen 3D-Bildes wird die Betonprobe schrittweise gedreht. Fig. 2 zeigt eine schemati-

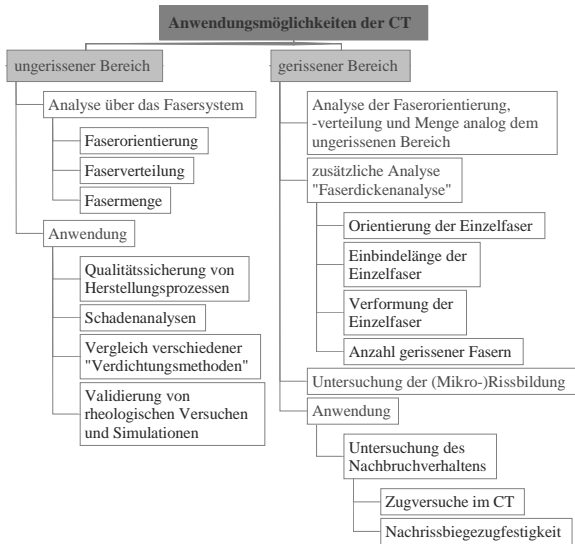


Fig. 1. Anwendungsmöglichkeiten der Computer-Tomographie

sche Darstellung einer CT-Aufnahme. Für jede Winkelposition wird dabei jeweils ein Projektionsbild erzeugt, bis ein Winkelbereich von 360 Grad abgedeckt ist. Die tomographische Rekonstruktion erzeugt dann ein räumliches Bild des untersuchten Probekörperteils. Aus diesen dreidimensionalen Bildern können nun Bestandteile mit gleichen physikalischen Eigenschaften herausgefiltert werden.

Verschiedene Komponenten der untersuchten Probe werden durch unterschiedlichen Absorptionskontrast auf entsprechend verschiedene Grauwerte abgebildet.

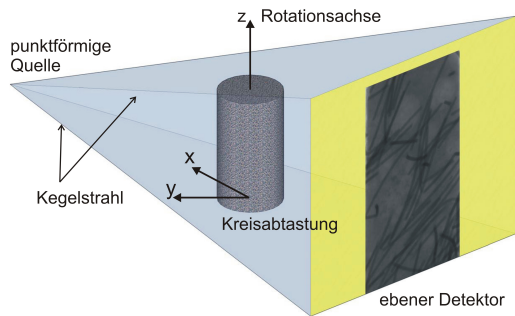


Fig. 2. Schematische Darstellung einer 3D-Computer-Tomographie-Aufnahme

B. Segmentierung des Fasersystems

Auf der Basis des segmentierten Fasersystems können wichtige Kennwerte wie der Faservolumengehalt sowohl der gesamten Probe als auch in Teilvolumina bestimmt werden. So kann die Homogenität der Struktur beurteilt werden.

Die rekonstruierten mikrocomputertomographischen Bilder (μ CT) liegen in einem 16-bit Graustufenformat vor, d. h. in Abstufung von 0 (schwarz) bis 65.536 (weiß).

Segmentierung bedeutet im vorliegenden Fall, die Fasern von der Betonmatrix und eventuell vorhandenen anderen

Objekten zu trennen. Alle Pixel, die zur Faserkomponente gehören, bekommen den Wert „1“, allen übrigen Pixel (Betonmatrix, Poren, Einschlüsse, etc.) wird der Wert „0“ zugewiesen. Da es jetzt im Bild nur noch zwei Werte gibt, wird dieses Verfahren "Binarisierung" genannt.

Zum Einsatz kommt ein Schwellwertverfahren, bei dem nur einzelne Pixel betrachtet werden. Der Grauwert eines Pixels stellt einen reinen Helligkeitswert dar, nach dem jedes Pixel der Gruppe (Segment) zugeordnet wird (vgl. [3]). Fig. 3 stellt an zwei Beispielen die Segmentierungsergebnisse den 16-bit Schnittbildern gegenüber.

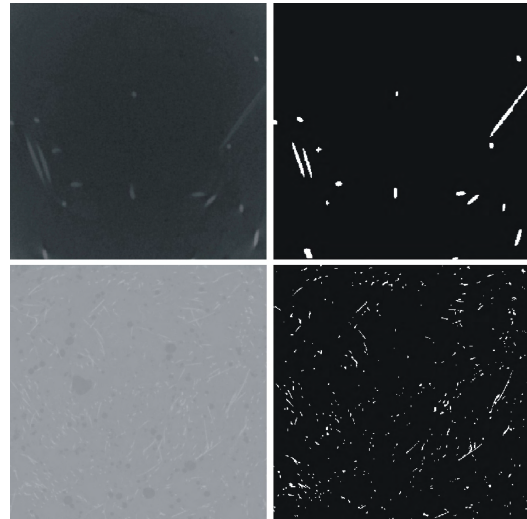


Fig. 3. Zweidimensionale Schnitte der 3D-Aufnahmen vor und nach der Segmentierung; Oben: Graustufenbild (links) und segmentiertes Bild (rechts) eines Stahlfaserbetons (Stahlfaser: $l=60$ mm, $d=1$ mm, Kantenlänge des betrachteten Bereichs: 68 mm); Unten: Graustufenbild (links) und segmentiertes Bild (rechts) eines UHPC (Stahlfaser: $l=6$ mm, $d=0,175$ mm, Kantenlänge des betrachteten Bereichs: 48 mm)

C. Faserorientierungsbeiwert

Der Faserorientierungsbeiwert beschreibt den Einfluss der Faserorientierung auf die Wirksamkeit der Faser. Bisher wurde bei der experimentellen Bestimmung des Faserorientierungsbeiwertes die Orientierung der Faser zum Beispiel an einer Schnittfläche oder Bruchfläche ermittelt. Ein Überblick über diese Analysemethoden wird in [1], [4] und [5] gegeben.

Im Gegensatz hierzu wird bei der Analyse der dreidimensionalen Bilder der Computer-Tomographie gleich das gesamte Volumen betrachtet. Dieser Faserorientierungsbeiwert η_ϕ beschreibt das Verhältnis der projizierten Faserlänge $L_{p,\phi}$ zur tatsächlichen Länge L_V innerhalb des betrachteten Volumens V und kann so nach Gleichung (1) berechnet werden. Der berechnete Faserorientierungsbeiwert liegt zwischen „0“ und „1“ (Wert „1“, alle Fasern richten sich in Richtung ϕ aus; Wert „0“, alle Fasern richten sich orthogonal zur Richtung ϕ aus).

$$\eta_\phi = \frac{L_{p,\phi}}{L_V \cdot V} \quad (1)$$

Sowohl die Faserlängendichte L_V als auch die verallgemeinerte Projektionslänge $L_{p,\phi}$ lassen sich leicht aus den Dichten

der inneren Volumina ableiten bzw. als Nebenprodukt bei deren Bestimmung anhand digitaler Bilddaten gewinnen. Für Details siehe [6]. L_V und $L_{p,\phi}$ für 13 Raumrichtungen lassen sich mithilfe des Softwaresystems MAVI [7] effizient aus 3D Bilddaten bestimmen.

Zur Beurteilung der Wiederholbarkeit der Messergebnisse wurde ein Probekörper mehrfach tomographiert. Neben der Variation des Startwinkels der CT-Aufnahmen wurde der Probekörper auch überkopf aufgenommen.

Die Ergebnisse bestätigen eine hohe Aussagegenauigkeit der ermittelten Faserorientierungsbeiwerte. Lediglich bei der Ermittlung des Faservolumens kann durch untereinander abweichende „Bildqualitäten“ die Wahl eines geeigneten Schwellwertes erschwert werden, was bei den durchgeführten Versuchen zu Abweichungen von max. 1 % führte.

D. Faserdickenanalyse

Für die quantitative Analyse des Faserauszugsverhaltens ist u.a. die Faserdicke interessant. Lägen die Fasern einzeln und sich nicht berührend in der Probe, so könnte jede Faser im Bild als einzelnes Objekt segmentiert und vermessen werden. Trotz des im Vergleich z. B. zu faserverstärkten Kunststoffen geringen Faservolumengehalts, berühren sich viele Fasern. Die Bildverarbeitung bietet verschiedene Methoden zur Trennung von Objekten, jedoch ist keine robust auf langgestreckte Objekte mit großem Berührungsbereich anwendbar.

Eine Alternative bietet der in [8] entwickelte Algorithmus für die Bestimmung sogenannter Radienkarten. In jedem Pixel des Fasersystems werden die Sehnenlängen in 26 Raumrichtungen gemessen und anschließend aus den Sehnenlängen Trägheitsachse und -momente berechnet. Die korrigierte Trägheitsachse ist gerade die lokale Richtung der Faser. Mit ihrer Hilfe kann dann aus den Sehnenlängen der Radius abgeleitet werden:

$$r = \frac{1}{8} \sum_{i=12}^{19} d_i \sin(\angle(\nu_i, \nu)) \quad (2)$$

wobei d_i die nach ihrer Größe sortierten Sehnenlängen sind, ν_i die zugehörigen Richtungen und ν die lokale Richtung der Faser. Die kleinsten und größten Sehnenlängen werden nicht in die Mittelung einbezogen, um den Schätzer robuster zu machen.

Die Korrektheit dieses Algorithmus wurde in [8] anhand computergenerierter Strukturen nachgewiesen. Die Ergebnisse für reale Daten hängen jedoch stark von der Qualität der Binarisierung (vgl. Abschnitt II-B) ab. Bei weichen Grauwertübergängen zwischen Matrix und Fasern kann die Faserdicke daher leicht unterschätzt werden. Der Einfluss der Binarisierung kann jedoch durch direktes Arbeiten auf dem Grauwertbild vermieden werden. Statt der Länge von Sehnen im Vordergrund werden nun die (gerichteten) Abstände zu einem starken Grauwertabfall bestimmt, siehe [8].

III. ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN DER COMPUTER-TOMOGRAPHIE

A. Analyse der Faserorientierung, -verteilung und -menge mithilfe der CT

1) *Sonderbauteile:* Bei der Entwicklung von Formteilen aus mit Fasern hochbewehrten ultrahochfesten Betonen sind Faserorientierung, -verteilung und -menge für die Festbetoneigenschaften die ausschlaggebenden Faktoren. Fig. 4 zeigt einen ausgewählten Bildausschnitt einer 3D-Visualisierung eines Druck-Schublaggers der Fa. Halfen, dessen Zulassungsversuche an der TU Kaiserslautern durchgeführt wurden. Die Kenntnis über die Verteilung, Ausrichtung und Menge der Fasern gestattet die Qualitätskontrolle der Herstellung und die Beurteilung des Tragverhaltens.

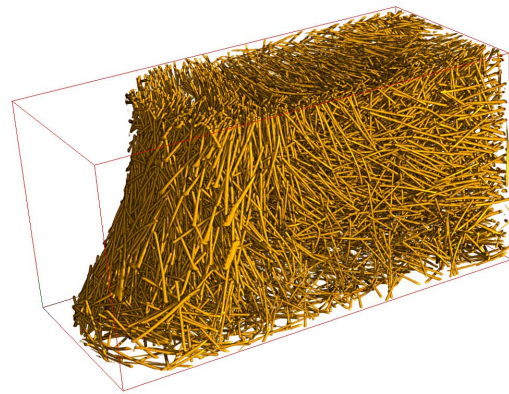


Fig. 4. Ausgewählter Bildausschnitt einer 3D-Visualisierung eines Druck-Schublaggers der Fa. Halfen

2) *Untersuchung von Stahlfaser-Industriefußböden:* Zur Qualitätskontrolle der Herstellung und der Verarbeitung von Stahlfaserbetonen gibt das CT-Analyseverfahren Auskunft über die Orientierung, die Menge und die Verteilung der eingebauten Fasern.

Mit Unterstützung der ortsansässigen Transportbetonfirma TRAPOBET wird eine Reihenuntersuchung an ausgeführten Stahlfaserindustriefußböden bzw. -bodenplatten durchgeführt.

Aufgrund der immer gleichen Materialstärke bei der Durchstrahlung, stellen zylindrische Probekörper die ideale Probengeometrie dar. Daher werden für die Versuche Bohrkerne entnommen.

Um eine ausreichend genaue Aussage über Fasergehalt und Fasermenge treffen zu können, müssen an jeder Messstelle mehrere Bohrkerne ($n > 3$) entnommen werden. Gegenüber einer „anonymen“ Entnahme von Proben, stehen in dieser Prüfreihe alle relevanten Parameter wie der Mischungsentwurf, die Art des Beimischens der Stahlfasern sowie das Einbring- und Verdichtungsverfahren zur Bewertung zur Verfügung.

Ziel ist es den Einfluss verschiedener Herstellverfahren auf die Ausrichtung und Verteilung der Fasern zu untersuchen.

Der in Fig. 5 dargestellte Probekörper, zeigt einen Mix von geraden Fasern mit gekrümmten ①, abgeplatteten ②

und als Köpfchen ③ ausgebildeten Enden, sowie gewellten Fasern ④.

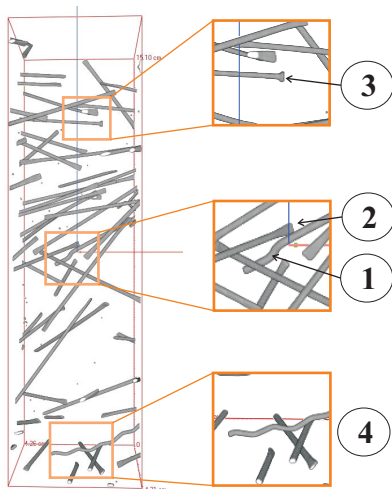


Fig. 5. Visualisierung eines Bohrkerns, Fasermix, betrachteter Probereich $40 \times 40 \times 150$ mm

B. Untersuchung des Nachbruchverhaltens

1) *Zugversuche im Computer-Tomographen:* Zur experimentellen Untersuchung der lokalen Faserverbundeigenschaften und der Mikrorissbildung von faserverstärkten Hochleistungsbetonen unter Last wurde ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, Computer-Tomographie-Aufnahmen während der Belastung des Probekörpers durchzuführen.

Die Aufnahme der CT-Bilder wird bei unterschiedlichen Laststufen durchgeführt, so dass zwischen den dreidimensionalen Bildern der einzelnen Laststufen Differenzbilder erstellt werden können. Unter einem Differenzbild versteht man ein Bild, das genau die Unterschiede zweier Bilder enthält. So kann man in dreidimensionalen Bildern die Veränderung der Mikrostruktur sichtbar machen.

Mit dem Versuchsaufbau (vgl. Fig. 6) werden zur Zeit CT-Aufnahmen mit Pixelgrößen kleiner $15 \mu\text{m}$ erreicht. Aufgrund dieser hohen Auflösung darf sich zur „verwacklungsfreien“ Aufnahme der aufzunehmende Bereich nicht bewegen. Gerade dies macht die in-situ Beobachtung schwierig, da der Probekörper beim Halten einer konstanten Spannung kriecht. Daher muss das Aufnahmeverfahren dem Kriechverhalten des Baustoffes angepasst werden. Dies lässt sich nur über eine Verkürzung der Aufnahmedauer erreichen.

Um trotz einer verkürzten Aufnahmezeit Bilder mit möglichst hoher Auflösung und gutem Kontrast zu erhalten, können bei der Tomographie verschiedene Einstellungen verändert werden. Beispielsweise können die Winkelpositionen und die zu mitteln Bilder (je Winkelposition werden mehrere Bilder aufgenommen und gemittelt) reduziert werden, was bei einer zu starken Reduzierung zum Rauschen des Bildes und einem schlechteren Kontrast führt. Eine Verkürzung der Belichtungszeit pro Bild führt zu dunkleren Bildern, da weniger Energie am Detektor ankommt. Bei den momentan

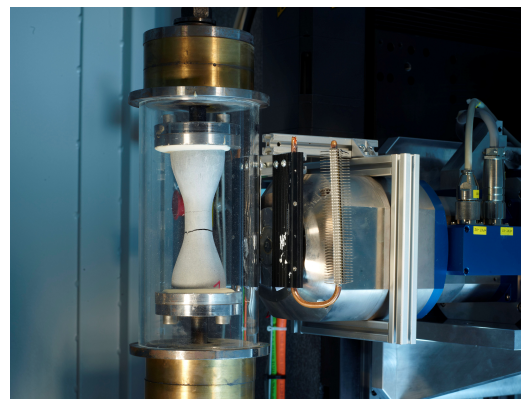


Fig. 6. Lastzelle im Computer-Tomographen

stattfindenden Versuchen werden diese und weitere Parameter aufeinander abgestimmt. So konnte die Aufnahmedauer je Laststufe auf ca. 20 Minuten reduziert werden.

Entgegen der üblichen „Knochen“-Form eines Probekörpers für zentrische Zugversuche, werden zylindrische Probekörper verwendet. Bei jeder Winkelposition wird die gleiche Materialstärke durchstrahlt. Diese Probeform reduziert Strahlungsschatten und verbessert den Grauwertverlauf.

Die Verwendung von eingeschnürten Zylindern ermöglicht die Beobachtung der Mehrfachrissbildung, die typisch für die angestrebte Duktilität von faserverstärkten ultrahochfesten Betonen ist. Für gekerbte Probekörper spricht die Möglichkeit, Untersuchungen an einem definierten Einzerriss durchzuführen. Der vorgegebene Entstehungsort des Risses ermöglicht eine nähere Positionierung der Röntgenröhre am Probekörper, so dass Aufnahmen mit höherer Auflösung (ca. $8 \mu\text{m}/\text{Pixel}$) erreicht werden können.

Zur Zeit finden Vorversuche statt, um trotz der angesprochenen „Probleme“ wie das Kriechen der Probekörper, CT-Aufnahmen mit ausreichender Schärfe und Kontrast für eine Analyse zu erhalten. Die dann folgenden experimentellen Untersuchungen konzentrieren sich sowohl auf die Beobachtung und Beschreibung des Faserauszugverhaltens von Einzelfasern und Fasergruppen als auch die topographische Beschreibung und Vermessung der (Mikro-) Rissbildung.

2) *Nachrissbiegezugfestigkeit an miniaturisierten Balken:* In Anlehnung an die Nachrissbiegezugprüfung nach Vorgabe des DFG Schwerpunktprogramms SPP 1182 „Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem Beton“ werden zurzeit verformungsgesteuerte Biegezugprüfungen an miniaturisierten Balken (Prismen) durchgeführt.

Fig. 7 zeigt beispielhaft die Auswertung der Nachrissbiegezugprüfung zweier Prismen der gleichen Herstellungsladung. Die Grafik zeigt in der Last-Verformungs-Kurve bei Probe „UHPC 1“ ein etwas duktileres Entfestigungsverhalten als bei Probe „UHPC 2“. Dies lässt sich durch die unterschiedliche Orientierung und Verteilung der Fasern im Probekörper begründen.

Aufgrund der Probekörperabmessungen kann der gesamte Probekörper nach der Ermittlung der Nachrissbiegezugfestig-

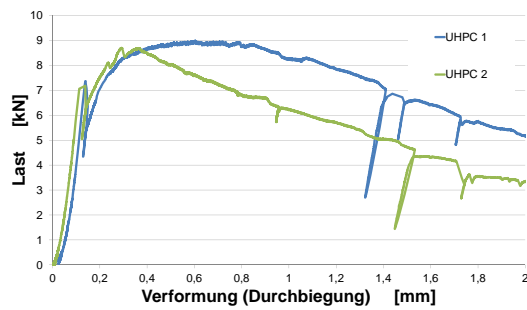


Fig. 7. Last-Verformungs-Kurve, Einfluss der Faserorientierung, -verteilung und -menge

tigkeit tomographiert werden. So ist es möglich, nicht nur einen einzelnen Rissbereich zu untersuchen, sondern es wird die Möglichkeit geboten bei einer Mehrfachrissbildung die gesamte Zugzone bezüglich Faserorientierung, Faserverteilung und Rissausbildung zu analysieren und zu bewerten.

Das für die Analyse zur Verfügung stehende Programm betrachtet für die Bestimmung der Faserorientierung und der Fasermenge die Fasergesamtheit. Schon rein visuell kann hier die Verteilung der Fasern in rekonstruierten 3D-Modellen betrachtet und bewertet werden.

Mit einem in der Entwicklung befindlichen Analysetool können zukünftig Fasern einzeln betrachtet werden (vgl. Abschnitt II-D). So wird es unter anderem möglich sein, die genauen Winkel zu ermitteln, unter denen eine Faser die Rissufer schneidet. Entstehende Faserauszugskanäle und Verformungen von Fasern können ebenfalls analysiert werden.

Gegenüber anderen Methoden, wie z. B. dem Aufbrechen des Risses, bleibt der zu untersuchende Bereich unbeschädigt, so dass auch eventuell gerissene Fasern detektiert werden können.

3) *Nachrissbiegezugfestigkeit von Stahlfaserbeton:* Zur Klassifizierung von Stahlfaserbetonen werden nach der Richtlinie „Stahlfaserbeton“ des DAfStb [9] diese über die Nachrisszugfestigkeit, also die Leistungsfähigkeit im Nachrissbereich, in Leistungsklassen eingestuft.

Die Nachrisszugfestigkeit lässt sich unter zu Hilfenahme von Umrechnungsfaktoren aus der Nachrissbiegezugfestigkeit bestimmen. Diese Nachrissbiegezugfestigkeit wird in einem verformungsgesteuerten 4-Punkt-Biegeversuch an einer Serie aus mindestens 6 Balken der Abmessung $150 \times 150 \times 700$ mm ermittelt. Die Eingangswerte für die Berechnung der Nachrissbiegezugfestigkeit bilden die zu den Durchbiegungen 0,5 mm und 3,5 mm zugehörigen Lasten. Bei der Bestimmung der Nachrissbiegezugfestigkeit werden in der Praxis starke Streuungen innerhalb von Prüfserien mit Variationskoeffizienten von über 25 % beobachtet.

In [10] wird die große Streuung zwischen den Messkurven der gleichen Betonzusammensetzung auf den großen Einfluss einzelner Fasern auf das Tragverhalten bei den vorliegenden kleinen Querschnittsabmessungen der Balken (150×150 mm) zurückgeführt. Auch in [11] wird darauf hingewiesen, dass die großen Abweichungen auf eine inhomogene Verteilung

TABLE I

AUSWERTUNG, NACHRISSBIEGEZUGFESTIGKEIT VON STAHLFASERBETON

	Fasermenge [kg/m ³]	Faserorientierungsbeiwert η_φ			$f_{cf,LL1}^f$ [N/mm ²]	$f_{cf,LL2}^f$ [N/mm ²]
		x	y	z		
Probe 1	21,4	0,57	0,31	0,60	2,20	0,84
Probe 2	18,1	0,71	0,29	0,45	3,41	2,13

der Fasern im Probequerschnitt beruhen, wodurch sich eine unterschiedliche Anzahl von Fasern im Betonquerschnitt des gerissenen Bereichs befinden. Jedoch ist nicht nur die Anzahl der Fasern im entstehenden Rissbereich ausschlaggebend für das Nachrissverhalten, sondern auch die Orientierung und Verteilung der Fasern im Querschnitt.

Um die Einflüsse der Orientierung und der Menge der Fasern im Bereich des Risses auf die beschriebene Streuung der Nachrissbiegezugfestigkeiten innerhalb einer Serie zu untersuchen, wurden Vorversuche an 6 Stahlfaserbetonbalken mit einem Fasergehalt von 20 kg/m^3 durchgeführt. Diese Vorversuche unterstützen zudem die Entwicklungsarbeit des neuen Analysetools.

Nach der Ermittlung der Nachrissbiegezugfestigkeit wurden die Rissbereiche (ca. $100 \times 150 \times 150$ mm) herausgesägt und tomographiert. Dabei ergibt sich eine zu durchstrahlende Diagonale von mindestens 180 mm. Daher wurden die Probekörper nochmals mittig geteilt, um optimale CT-Aufnahmen zu garantieren.

Tab. I zeigt anhand des Beispiels der beiden am stärksten von einander abweichenden Einzelprüfergebnisse einer Serie die Abhängigkeit des Nachrissverhaltens von der Faserorientierung. Trotz höherer Fasermenge in Probe 1 (Fig. 8) werden wesentlich geringere Nachrissbiegezugfestigkeiten gegenüber Probe 2 (Fig. 9) gemessen. Es zeigt sich, dass durch die stärkere Ausrichtung der Fasern in Zugkraftrichtung ($\varphi = x$) bei Probe 2 höhere Nachrisszugfestigkeiten erreicht werden können.

Neben der automatischen Analyse der Faserorientierung und der Fasermenge, besteht die Möglichkeit aus den visualisierten Daten Parameter wie die Anzahl der gerissenen Fasern, der Einbindelänge der Fasern und der Verformung der Fasern zu bestimmen.

Für eine genauere Bewertung können die zuvor genannten Parameter mit einbezogen werden. So sind in Fig. 8 (Probe 1) Faseransammlungen und „stehende“ Fasern zu erkennen, die eine optimale Kraftübertragung über den Riss hinweg behindern.

Weitere Arbeiten beschäftigen sich mit der Entwicklung von Methoden für die genaue Darstellung der Topographie von Rissen und deren Vermessung. Diese sollen dann im Bereich der stahlfaserverstärkten Ultrahochfesten Betone zur Untersuchung der Mikrorissbildung eingesetzt werden.

IV. FAZIT

Gerade bei steigender Druckfestigkeit der Betone ist das Nachbruchverhalten, sprich die Duktilität des Baustoffes nicht

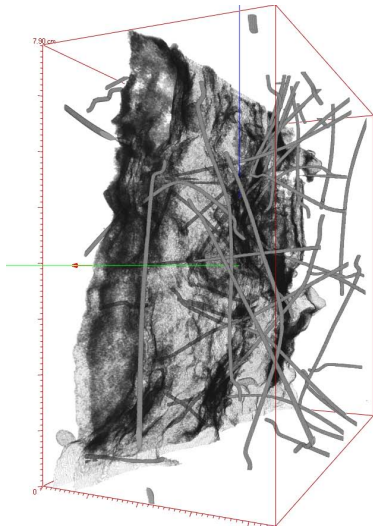


Fig. 8. Probe 1, gekröpfte Fasern, betrachteter Probereich: $30 \times 70 \times 70$ mm

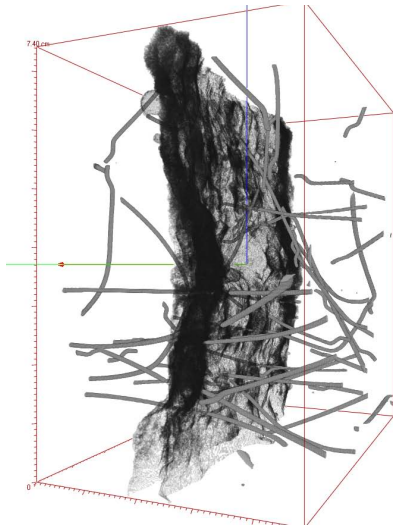


Fig. 9. Probe 2, gekröpfte Fasern, betrachteter Probereich: $30 \times 70 \times 70$ mm

zufriedenstellend. Um diese geforderte Duktilität bei ultrahochfesten Betonen (UHPC) zu erreichen, werden diesen Betonen zumeist Stahlfasern beigemischt.

Die Fähigkeit eines stahlfaserverstärkten Betons, Zugkräfte über einen Riss hinweg übertragen zu können, ist u.a. abhängig von der Orientierung, der Verteilung und der Anzahl der „rissüberbrückenden“ Fasern im Bereich der sich ausbildenden Zugzone bzw. des sich einstellenden Risses bei Belastung.

Um weitere, das Nachbruchverhalten bestimmenden Parameter, wie die Verbundeigenschaften der Fasern mit der Matrix genauer bestimmen zu können, wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der die in-situ Beobachtung der Betonmikrostruktur und des Faserhaltens bei Zugbeanspruchung des Probekörpers mithilfe der Computer-Tomographie ermöglicht. Die Ergebnisse dieser Versuche sollen neue Erkenntnisse über das Faserverbundverhalten und die (Mikro-) Rissbildung liefern,

um bestehende Bemessungsmodelle für aus diesen Betonen hergestellte Bauteile anzupassen bzw. erweitern zu können.

V. DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Forschungsinitiative „Center for Mathematical and Computational Modelling“ CM² für die Förderung des Forschungsschwerpunktes „Bildverarbeitung im Bauwesen“ (BiBau) und dem Deutschen Beton- und Bau-technik Verein DBV für die finanzielle Unterstützung der Machbarkeitsstudie (vgl. [1]).

REFERENCES

- [1] F. Schuler and T. Sych, *Analyse der Faserorientierung in Betonen mit Hilfe der Computer-Tomographie*. Fraunhofer IRB Verlag, 2009.
- [2] J. Schnell, K. Schladitz, and F. Schuler, *Richtungsanalyse von Fasern in Betonen auf Basis der Computer-Tomographie*, 2010, vol. 105, no. 2.
- [3] R. Steinbrecher, *Bildverarbeitung in der Praxis*. München: Oldenbourg, 1993.
- [4] Y.-Z. Lin, *Tragverhalten von Stahlfaserbeton*, ser. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin: Beuth, 1999, vol. 494.
- [5] N. V. Tue, S. Henze, M. Küchler, G. Schenk, and K. Wille, *Ein optoanalytisches Verfahren zur Bestimmung der Faserverteilung und -orientierung in stahlfaserverstärktem UHFB*, 2007, vol. 102, no. 10.
- [6] J. Ohser and K. Schladitz, *3d Images of Materials Structures – Processing and Analysis*. Wiley VCH, 2009.
- [7] Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, *MAVI-Modular Algorithms for Volume Images*, 2005.
- [8] H. Altendorf and D. Jeulin, *3d Directional Mathematical Morphology for Analysis of Fiber Orientations*, 2009, vol. 28, no. 3.
- [9] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton-DAfStb, *Stahlfaserbeton, Ergänzungen und Änderungen zu DIN 1045, Teile 1 bis 3 und DIN EN 206-1*. Berlin: Beuth, März 2010.
- [10] M. Strack, *Modellbildung zum rissbreitenabhängigen Tragverhalten von Stahlfaserbeton unter Biegebeanspruchung: Univ., Diss.–Bochum, 2007.*, ser. Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum. Aachen: Shaker, 2007, vol. 2007,5.
- [11] M. Teutsch, U. Wiens, and C. Alfes, *Stahlfaserbeton nach DAfStb-Richtlinie "Stahlfaserbeton"*, 2010, vol. 105, no. 8.