

Analyse der Faserverteilung in Betonen mit Hilfe der Computer-Tomographie

Jürgen Schnell, Tetyana Sych, Frank Schuler

Für die Festbetoneigenschaften von Faserbetonen sind die Fasermenge, Faserorientierung und Faserverteilung ausschlaggebend. Dies macht eine Überwachung dieser Parameter notwendig, sei es zur Qualitätssicherung auf der Baustelle oder im Bereich der Forschung zur Weiterentwicklung solcher Betone. Gegenüber bisher angewandten Methoden zur Untersuchung dieser Einflussgrößen 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 numerisch zu analysieren.

1 Einleitung

Ziel des vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins finanzierten Forschungsprojektes [1] war es, Tomographiebilder von faserverstärkten Betonproben so erzeugen und auswerten zu können, dass eine Analyse der Faserverteilung, Faserausrichtung und des Faservolumens möglich wird. Hierzu wurden Probekörper unterschiedlicher Geometrie aus Faserbetonen (stahlfaserverstärkte ultrahochfeste Betone, Textilbetone, hochduktile Betone mit Polyvinylalkohol-Fasern, u. a.) hergestellt bzw. aus Bauteilen entnommen und tomographiert. Beispiele visualisierter 3D-Modelle von Fasern zeigen die Abbildungen 3 bis 5.

In zusätzliche Versuchen sollten die Ergebnisse der CT-Analyse mit dem an der TU Braunschweig in Zusammenarbeit mit der Firma Hertz-Messtechnik entwickelten Verfahren (Messgerät BSM 100) [2], das die ferromagnetischen Eigenschaften der Stahlfasern nutzt, verglichen werden.

2 Computer-Tomographie

Die 3D-Computertomographie ist ein schnittbildgebendes, zerstörungsfreies Röntgenprüfverfahren, bei dem das Objekt aus Durchstrahlungsaufnahmen rekonstruiert wird, die aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden. Bei der Durchstrahlung der Betonproben wird eine Projektion erzeugt, welche die Stärke der Absorption an verschiedenen Stellen abhängig von der Materialart und Materialstärke widerspiegelt. Zur Erzeugung eines tomographischen 3D-Bildes wird die Betonprobe schrittweise gedreht. Für jede Winkelposition wird dabei jeweils ein Projektionsbild erzeugt, bis ein Winkelbereich von 360° abgedeckt ist. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung einer solchen Tomographie-Aufnahme. Es entstehen über tausend Einzelbilder mit Datenmengen von vielen Gigabytes. Werden diese Querschnittsbilder im Computer „übereinander gestapelt“, so erhält man ein räumliches Bild des untersuchten Probekörperteils. Aus diesen dreidimensionalen Bildern können nun Bestandteile mit gleichen physikalischen Eigenschaften herausgefiltert werden.

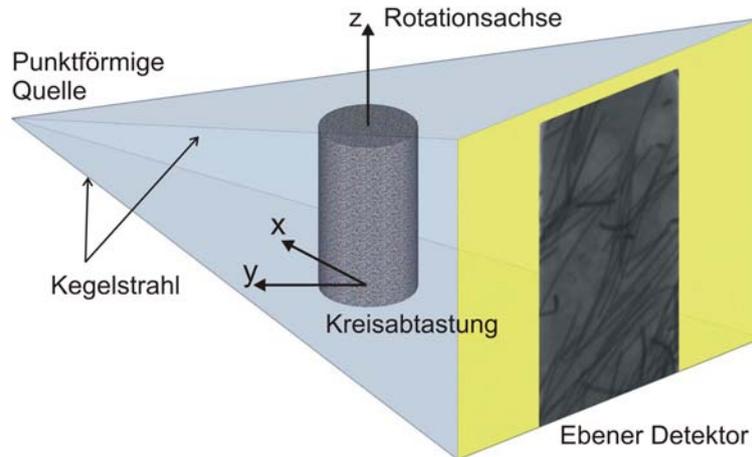


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer 3D-Computer-Tomographie-Aufnahme

Hinsichtlich des weitaus höheren Leistungsumfanges unterscheidet sich der „technische Tomograph“ von Anlagen, die für medizinische Zwecke genutzt werden. Insbesondere an die räumliche Auflösung - d. h. an die korrekte Vermessung und Charakterisierung der Mikrostruktur - werden höhere Anforderungen gestellt. Verschiedene Komponenten werden durch unterschiedlichen Absorptionskontrast auf entsprechend verschiedene Grauwerte abgebildet. Sind sich die Komponenten in Dichte und Elementenzusammensetzung ähnlich, ergibt sich zwischen diesen Komponenten nur noch ein sehr geringer Kontrast. Unter Zuhilfenahme geeigneter Analysesoftware kann die räumliche Mikrostruktur des Baustoffes ermittelt werden. Das bedeutet, dass sich innerhalb räumlicher Bilder mithilfe bildanalytischer Methoden eine Reihe geometrischer Kennzahlen ermitteln lassen. Die besonderen mathematischen Eigenschaften dieser an räumlichen Bilder bestimmten Basiskenngrößen ermöglichen die Ableitung vieler weiterer Kennwerte, aus denen sich beispielsweise die spezifische Faserlänge (mittlere Gesamtfaserlänge je Volumeneinheit) und die mittlere Faserdicke ableiten lassen [3,4,5].

2.1 Segmentierung der Faser

Die rekonstruierten mikrocomputertomographischen Bilder (μ CT) liegen in einem 8-bit bzw. 16-bit Graustufenformat in Abstufung von 0 (schwarz) bis 255 (weiß) vor. Für eine problemlose Analyse ist es hilfreich, die Bilder so zu beschneiden, dass der gesamte zur Auswertung genutzte Bildausschnitt ausschließlich von Faserbeton bedeckt ist.

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. Der Begriff Segmentierung entspricht hier dem Binarisieren des Bildes, da nur zwei Segmente übrig bleiben.

Zum Einsatz kommt bei der Segmentierung ein Schwellenwertverfahren, 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 [5]. Der Schwellenwert, der das Kriterium für das Trennen der Grauwerte in zwei Teilmengen angibt, wird interaktiv mit der am Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM) in Kaiserslautern entwickelten Software MAVI [6] bestimmt. Zu beachten ist, dass sich bei der Veränderung des Schwellenwertes die betrachtete Fläche des Fasersegmentes verändert. Pixel im Randbereich oder im Hintergrund decken schrittweise die Grauwerte von weiß nach schwarz ab. Im vorliegenden Fall werden bei steigendem Schwellenwert die gesuchten Fasern „kleiner“. Über den Vergleich des von MAVI angezeigten mittleren Faserdurchmessers mit dem tatsächlichen Faserdurchmesser wird der Schwellenwert stufenweise angepasst. In Abbildung 2 werden beispielhaft die Tomographie-Aufnahmen den Binärbildern gegenübergestellt.

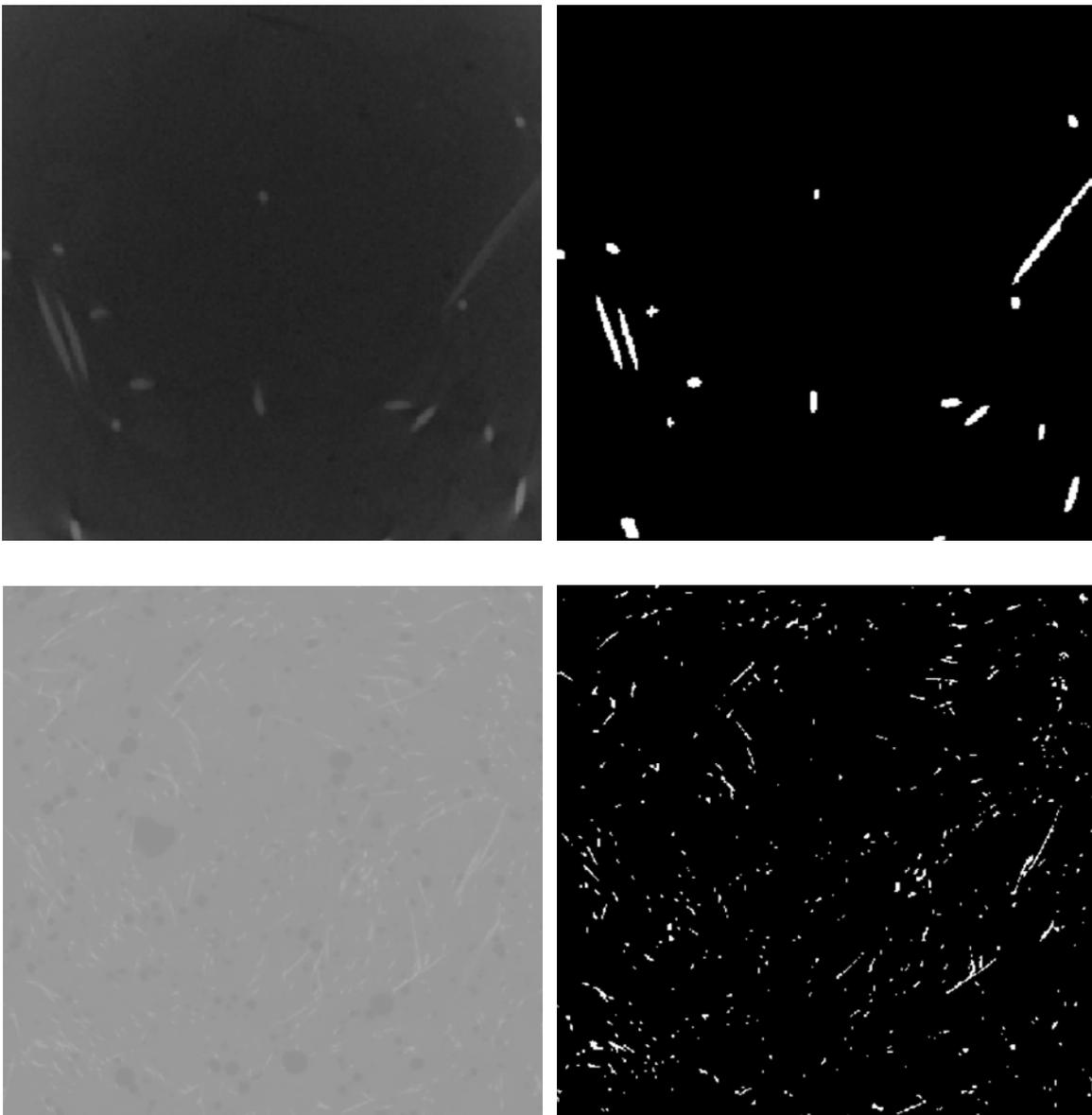


Abbildung 2: Zweidimensionale μ CT-Bilder vor und nach der Segmentation.
 Oben: Graustufenbild (links) und segmentiertes Bild (rechts) eines Stahlfaserbetons (Kantenlänge 68 mm).
 Unten: Graustufenbild (links) und segmentiertes Bild (rechts) eines UHPC (Kantenlänge 48 mm).

2.2 Faserorientierungsbeiwert

Der Faserorientierungsbeiwert beschreibt den Einfluss der Faserorientierung auf die Wirksamkeit der Faser in eine bestimmte Achsrichtung. Bisher wurde bei der experimentellen

Bestimmung des Faserorientierungsbeiwertes die Orientierung der Faser zum Beispiel an einer Schnittfläche oder Bruchfläche ermittelt. Einen Überblick über diese Analysemethoden gibt [1,7,8].

Im Gegensatz hierzu wird bei der Analyse der dreidimensionalen Bilder der Computertomographie das gesamte Volumen betrachtet. Der Faserorientierungsbeiwert η_φ beschreibt das Verhältnis der projizierten Gesamtfaserlänge $L_{p,\varphi}$ zur tatsächlichen Gesamtfaserlänge 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).

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

So ergeben sich beispielsweise für die in Abbildung 3 dargestellte Probe (UHPC mit Mikrostahtfasern $l = 0,6 \text{ mm}$, $d = 0,175 \text{ mm}$) folgende Faserorientierungsbeiwerte $x = 0,47$, $y = 0,47$ und $z = 0,57$. Die Abbildung 4 zeigt die Visualisierung von gekröpften Stahtfasern ($l = 60 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$) in einem „Normalbeton“ mit folgenden Faserorientierungsbeiwerten $x = 0,72$, $y = 0,47$ und $z = 0,25$.

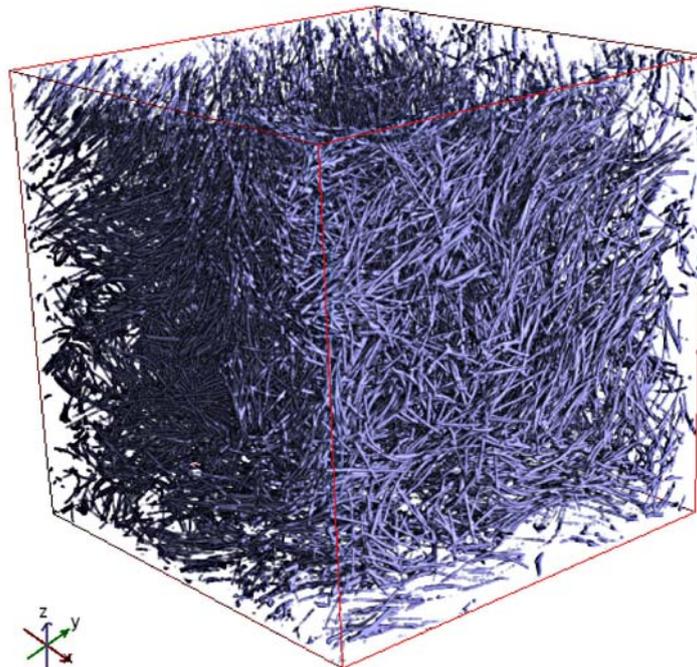


Abbildung 3: 3D-Modell der Mikrostahtfasern in UHPC, Probengröße 50 x 50 x 50 mm.

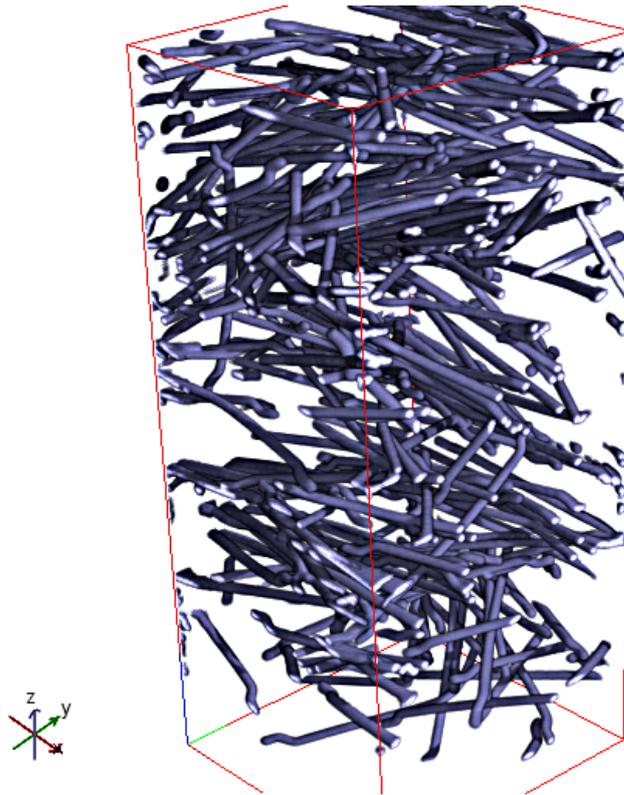


Abbildung 4: 3D-Modell der Stahlfasern in Beton, Probengröße 64 x 68 x155 mm.

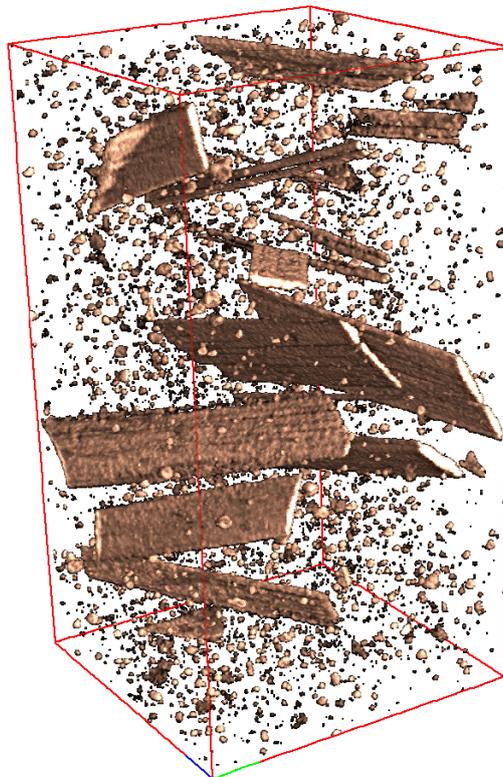


Abb. 5: 3D-Modell von Glasfasern in Beton, Probengröße 40 x 40 x 90 mm

3 Magnetische Induktionsprüfung

Am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) der Technischen Universität Braunschweig wurde ein Messverfahren zur Bestimmung von Stahlfasergehalt und -orientierung in Beton entwickelt, bei dem für die Detektierung der Fasern das Prinzip der ferromagnetischen Induktion genutzt wird. Da im Regelfall im Stahlfaserbeton nur die Stahlfasern ferromagnetische Eigenschaften aufweisen (eisenhaltige Gesteinskörnungen verfälschen die Ergebnisse [9]) übernehmen die Stahlfasern die Funktion eines Spulenkerns (Induktionsspule), der von zwei Spulen umschlossen wird: eine Erregerspule, die durch einen Generator (G) einen sinusförmigen Wechselstrom einspeist und eine Induktionsspule, an der die induzierte Spannung (U_i) gemessen wird (vgl. Abbildung 6). Eine senkrecht zur Spule stehende Faser liefert den größten Wert [2].

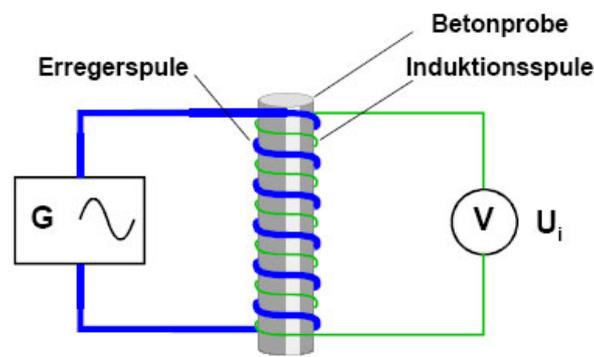


Abb. 6: Funktionsprinzip der induktiven Messung nach [2]

Für die Messung nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion ist eine möglichst homogene Faserverteilung erforderlich. Um eine gleichmäßige Verteilung der Fasern im Probekörper zu erreichen, wurde die Betonage lagenweise in Balkenschalungen der Abmessung 70 x 15 x 15 mm vorgenommen. Nach dem Ausschalen der Balken wurden diese jeweils in vier Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm geschnitten, die dann mit dem Induktionsverfahren geprüft wurden. Nach der ersten Induktionsmessung wurden jeweils aus dem zweiten Würfel eines Balkens Bohrkerns entnommen, die mithilfe der Computertomographie analysiert wurden.

Zur Herstellung der Probekörper aus (ultrahochfestem) Beton wurden verschiedene (Mikro-) Stahlfasern mit jeweils 1,83 Vol.-%, mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern, beigemischt.

Eine Bewertung der Vergleichsproben konnte nicht vor Abschluss des Forschungsvorhabens durchgeführt werden. Somit beschränkt sich der vorliegende Bericht auf die Auswertung der CT-Analyse der Stahlfaserbetone und die Beschreibung des magnetischen Induktionsverfahrens [1]. Zudem wurden mehrere Prüfserien zur Kalibrierung von unterschiedlichen Stahlfasertypen, den Einfluss der zeitabhängigen ferromagnetischen Stahlfasereigenschaften (Verhalten im alkalischen Milieu des Betons) und der Messung der Stahlfaserorientierung durchgeführt. Die erzielten Resultate bestätigen die in [9] veröffentlichten Ergebnisse.

4 Zusammenfassung

Die Auswertung der Computer-Tomographie-Aufnahmen ermöglicht im Vergleich zur anderen Methoden eine genauere Bestimmung des Faserorientierungsbeiwertes, da die Verteilung und Ausrichtung der Fasern im gesamten oder in verschiedenen Abschnitten des Probekörpervolumens betrachtet werden können.

Während sich bei der magnetischen Induktionsprüfung nur Stahlfasern detektieren lassen, können bei der CT-Analyse Bestandteile mit verschiedenen physikalischen Eigenschaften „herausgefiltert“ werden. Bei einer ausreichenden Strahlungsenergie sind auch bei Kunststoff- und Glasfasern Bilder mit genügend Kontrast zwischen Faser und Zementmatrix möglich.

Die Auswertung der Richtungsverteilung beschränkt sich bei der magnetischen Induktionsprüfung auf eine prozentuale Angabe in die drei Hauptachsenrichtungen, wobei hier keine Aussage über die Verteilung der Fasern im betrachteten Volumen getroffen werden kann.

Für die Bestimmung eines aussagekräftigen Faserorientierungsbeiwertes, bei dem der Einfluss der Faserverteilung besonders an geometrischen Zwangspunkten als weiterer Parameter eingehen soll, zeigt die CT-Analyse ihre Vorteile gegenüber anderen Analysemethoden.

So kann die Analyse der Faserverteilung und -orientierung mithilfe der Computer-Tomographie im Bereich der Weiterentwicklung von Faserbetonen einen entscheidenden Beitrag liefern.

Hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Ergebnisse und der Untersuchung der Wiederholstreuung müssen noch größere Messreihen durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Schnell, J., Sych, T., Schuler, F.: DBV 273 Schlussbericht, Analyse der Faserverteilung in Betonen mit Hilfe der Computer-Tomographie, DBV, 2009.
- [2] Hertz Messtechnik GmbH: Handbuch BSM 100, Delmenhorst 2008.
- [3] Schladitz, K., Ohser, J., Nagel, N.: Measurement of intrinsic volumes of sets observed on lattices, Discrete Geometry for Computer Imagery, 13th International Conference, DGCI 2006, Szeged 2006, S. 247–258.
- [4] Ohser, J., Schladitz, K.: Visualisation, processing and analysis of tomographic data, in: Banhart, John (Hrsg.), Advanced tomographic methods in materials research and engineering, Oxford 2008.
- [5] Steinbrecher, R.: Bildverarbeitung in der Praxis, Oldenbourg, München 1993.
- [6] MAVI - Modular Algorithms for Volume images V1.3.0, http://www.itwm.fhg.de/bv/projects/MAVI/index_de.php, Fraunhofer ITWM, Stand 16.06.2009

- [7] Lin, Y.-z.: Tragverhalten von Stahlfaserbeton, Beuth, Berlin 1999.
- [8] Tue, N. V., Henze, S., Küchler, M., Schenk, G., Wille, K.: Ein optoanalytisches Verfahren zur Bestimmung der Faserverteilung und -orientierung in stahlfaserverstärktem UHFB, in: Beton- und Stahlbetonbau, (2007), S. 674–680.
- [9] Breitenbücher, R., Rahm, H.: Zerstörungsfreie Bestimmung des Stahlfasergehalts und der Stahlfaserorientierung im Frisch- und Festbeton, in: Beton- und Stahlbetonbau, 3/2009, S. 88-93.