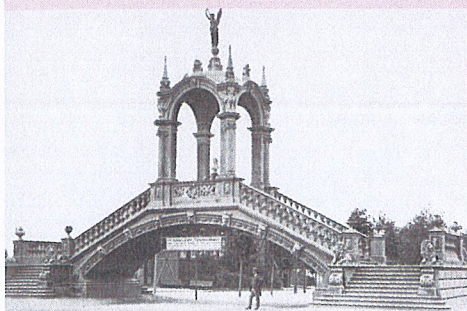




- Platten aus Faserbeton
- Computertomografische Untersuchung von Faserbeton
- Faserbewehrte Tunnelinnenschalen
- Biegetragfähigkeit textilbetonverstärkter Platten
- Schubkerven im Holz-Beton-Verbundbau
- Lebensdauerbemessung
- Innerstädtische Autobahnüberdeckung
- Der Stampfbetonpionier Eugen Dyckerhoff



Das Titelfoto aus dem Jahre 1880 zeigt eine Stampfbetonbrücke der Firma Dyckerhoff & Widmann, die für die Gewerbeausstellung in Düsseldorf im gleichen Jahr erstellt worden war. Die Brücke überspannte mit einem 12 m weiten Bogen einen der zentralen Ausstellungswege, und der Betonpavillon auf dem Scheitel des Bogens unterstrich dessen Tragfähigkeit. Mit dieser „prächtigen Cement-Architektur“ präsentierte sich die ehemalige Zementfabrik Dyckerhoff & Widmann als Betonbaunternehmen, dessen geschickte Öffentlichkeitsarbeit dazu beitrug, dass sich tragende Betonkonstruktionen in größerem Umfang im Bauwesen durchsetzten. Der außergewöhnliche Aufsatz auf S. 415 bis 424 zu den deutschen Anfängen des Bauens mit Beton präsentiert den Kaufmann Eugen Dyckerhoff als Protagonisten der damals neu entstehenden Bauindustrie und zeigt seine zentrale Rolle in der Entwicklung der Bautechnik, die sich unter anderem auf die von ihm initiierten systematischen Versuche nach wissenschaftlichen Vorbildern gründete, mit denen er maßgeblich zu den Wissensbildungsprozessen im Bereich der Betontechnologie beitrug. [Gewerbe- und Kunst-Ausstellung Düsseldorf 1880, Düsseldorf, 1881, S. 185]

Beton- und Stahlbetonbau

6

106. Jahrgang
Juni 2011, Heft 6
ISSN 0005-9900 (print)
ISSN 1437-1006 (online)

Wilhelm Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und technische
Wissenschaften GmbH & Co. KG
www.ernst-und-sohn.de

peer reviewed journal:

Beton- und Stahlbetonbau ist ab dem Jahrgang 2007 beim „Institute for Scientific Information“ (ISI) akkreditiert.

Impact-Faktor 2009: 0,222

Aus Wiley InterScience wird
Wiley OnlineLibrary



www.wileyonlinelibrary.com, die Plattform
für das Beton- und Stahlbetonbau Online-
Abonnement

Editorial

- 349 Manfred Keuser
Tunnelbau – high-tech im großen Maßstab

Fachthemen

- 350 Lars Göde und Peter Mark
Umlagerungsverhalten von Plattentragwerken aus Stahlfaserbeton
Numerische Berechnung und Bemessung
- 364 Gerhard Pittino, Georg Geier, Laura Fritz, Markus Hadwiger, Joerdis Rose und Tomas Pabel
Computertomografische Untersuchung von Stahlfaserspritzbeton mit mehrdimensionalen Transferfunktionen
- 371 Erich Sauer, Sebastian Höser und Bruno Mattle
Ein Bemessungskonzept für unbewehrte und faserbewehrte Tunnelinnenschalen
- 377 Frank Schladitz, Enrico Lorenz und Manfred Curbach
Biegetragfähigkeit von textilbetonverstärkten Stahlbetonplatten
- 385 Florian Schönborn, Michael Flach und Jürgen Feix
Bemessungsregeln und Ausführungshinweise für Schubkerven im Holz-Beton-Verbundbau
- 394 Harald S. Müller und Michael Vogel
Lebensdauerbemessung im Betonbau
Vom Schädigungsprozess auf Bauteilebene zur Sicherheitsanalyse der Gesamtkonstruktion

Berichte

- 403 Jörg Erdmann, Thilo Müller und Malte Holz
Überdeckelung der Autobahn A59 in Dinsburg
Planung und Ausführung unter besonderer Berücksichtigung baubetrieblicher und verkehrstechnischer Aspekte
- 415 Knut Stegmann
Zu den Anfängen des Bauens mit Beton
Der Stampfbetonpionier Eugen Dyckerhoff (1844–1924)

Rubriken

- 363 Aktuelles (s. a. S. 384, 414)
425 Tagungen
426 Nachrichten
429 Persönliches

Stellenmarkt

Produkte und Objekte

- A4 Industrieböden
A13 Bauteilverstärkung
A19 Verkehrswegebau
A24 aktuell
A30 Anbieterverzeichnis

Computertomografische Untersuchung von Stahlfaserspritzbeton mit mehrdimensionalen Transferfunktionen

Der Verbundwerkstoff Stahlfaserbeton bzw. Stahlfaserspritzbeton (SFRSpC) findet in der Geotechnik eine breite Anwendung. Für die Modellierung des mechanischen Verhaltens ist das Wissen über die Verteilung und Ausrichtung der Fasern im Beton von entscheidender Bedeutung. In einer Bachelorarbeit wurden die Stahlfasern in Bohrkernproben mit Hilfe der Computertomografie (CT) am Österreichischen Gießerei-Institut (ÖGI) sichtbar gemacht und die Orientierung jeder einzelnen Faser anhand der STL-Schnittstelle und weiterer Software berechnet, statistisch ausgewertet und grafisch, ähnlich dem *Schmidt'schen* Netz, dargestellt. Dieses zeitaufwändige Verfahren wurde von VRVis durch ein Postprocessing automatisiert. Die Stahlfasern können bezüglich ihrer zwei Hauptwinkel in Echtzeit exploriert, klassifiziert und dabei visuell überwacht werden. Es bieten sich verschiedene Möglichkeiten der statistischen Auswertung an. Ein Richtungskugelhistogramm, ebenfalls dem *Schmidt'schen* Netz ähnlich, ermöglicht dem Anwender, die Richtungsverteilung der selektierten Stahlfasern auf einen Blick zu erkennen. Die Farbkodierung der Richtungen wird auch für die 3D-Visualisierung der Stahlfasern übernommen, um die räumliche Erfassung der Richtungsverteilung im SFRSpC selbst zu erleichtern.

Computertomographic Investigation of Steel Fibre Reinforced Sprayed Concrete using Multi-Dimensional Transfer Functions

The composite material steel fibre reinforced concrete or steel fibre reinforced sprayed concrete (SFRS) is widely used in geotechnics. For the modelling of the mechanical behaviour the knowledge of the distribution and orientation of the fibres in the concrete is of particular importance. For a bachelor thesis the steel fibres in drill cores were investigated by computed tomography (CT) at the Austrian Foundry Research Institute (ÖGI). The orientation of each fibre was calculated using a STL-interface and further software tools. The results were statistically evaluated and graphically represented using Schmidt's net. This time consuming (expensive) method was automated by a post-processing of VRVis. With that tool the steel fibres in the sample can be explored, classified and visually examined in real-time regarding their orientation in two angles. Different possibilities of statistical evaluation can be implemented. A real-time direction sphere histogram (DSH), comparable to Schmidt's net in 3D allows the user to recognise the distribution of orientations of the selected fibres at a glance. The colour-coding of the different orientations is also used for the 3D-volume-view of the fibres, to easily identify the spatial distribution of orientations in the SFRS sample.

1 Einleitung

In der Geotechnik wird stahlfaserbewehrter Beton z. B. beim Tunnelvortrieb im Vollquerschnitt mit einer Tunnelvortriebsmaschine (TVM) als Auskleidung mit Fertigteilen, den so genannten Tübbingungen eingesetzt. Stahlfaserspritzbeton wird z. B. als Alternative zu Spritzbeton mit Mattenbewehrung als Hangsicherung oder bei der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NATM) verwendet [1]. Die Orientierung der Stahlfasern ist im Wesentlichen räumlich verteilt, wird jedoch durch das Einbringen, Verdichten bzw. Applizieren beeinflusst. Durch die Zugabe von Stahlfasern ($>30 \text{ kg/m}^3$) wird das Nachrissverhalten bzw. das Energieabsorptionsvermögen von Spritzbeton entscheidend verbessert. Durch Plattenversuche kann die Energieabsorptionsklasse [2], z. B. EV 500–700 Joule, eines Spritzbetons an Prüfkörpern der Größe 60 cm/60 cm/10 cm bestimmt werden.

Die Verteilung und Ausrichtung der Fasern im Beton bzw. Spritzbeton ist für das mechanische Verhalten und dessen Modellierung von entscheidender Bedeutung. Die Computertomografie (CT) mit der Möglichkeit der zerstörungsfreien Prüfung und überlagerungsfreien Darstellung von dreidimensionalen Objekten bietet für die Bewertung der Faserorientierungen gute Voraussetzungen. *Illerhaus* [3] stellte ein Verfahren zur Auswertung von CT-Datensätzen von faserhaltigen Materialien vor, das auf einer gewichteten Summation der einzelnen, segmentierten Fasern entlang diskreter Orientierungen beruht. Für die Segmentierung benutzte er ein Schwellwertverfahren mit zusätzlichen Kriterien zur Form und Größe der gesuchten Faserobjekte. Bei dieser rechenaufwändigen Methode werden die einzelnen Fasern nicht als solche erfasst, sondern nur die einzelnen segmentierten Datenpunkte. Eine weiterführende Auswertung der Faserorientierungen ist daher nicht möglich. Eine andere Methode auf Basis der Computertomografie wurde von *Schnell, Schladitz und Schuler* [4] vorgestellt. Sie segmentieren die einzelnen Fasern über ein Schwellwertverfahren und werten diese dann bezüglich des Faserorientierungsbeiwerts in Abhängigkeit von unterschiedlichen Richtungen aus. Auch weitere Analysen der Fasereigenschaften können vorgenommen werden.

Am Österreichischen Gießerei-Institut (ÖGI) wurden für eine Bachelorarbeit [5] die STL-Datensätze der Stahlfasern zweier Bohrkernproben (Bild 1a), mit 10 cm

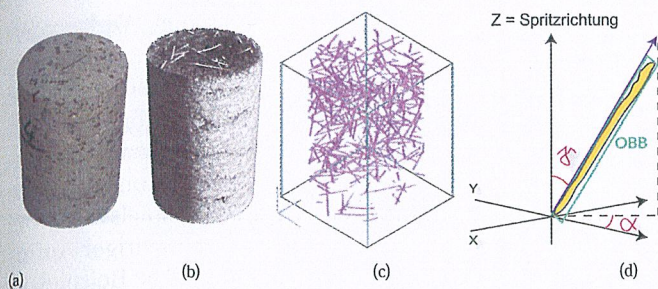


Bild 1. (a) Bohrkern mit 10 cm Durchmesser und 20 cm Höhe, (b) Voxelmodell, (c) STL-Datei in ViewExpert, (d) Definition der Lage der Stahlfaser (OBB) im Raum durch die Winkel α (Lage in der x - y -Ebene) und Winkel γ (Lage bezüglich z -Achse, Spritzrichtung)

Fig. 1. (a) drill core sample with 10 cm diameter and 20 cm height, (b) Voxel model, (c) STL-data in ViewExpert, (d) definition of the steel fibre orientation (OBB) by means of angle α (orientation in the plane x - y) and γ (orientation in relation to the z -axis, application direction)

Durchmesser und 20 cm Höhe, mittels des adaptiven Schwellwertverfahrens kreiert. Diese Daten wurden mit dem Programm „View Expert“ von DeskArt sichtbar gemacht (Bild 1,c) und die Orientierung jeder einzelnen Faser mittel MS-Excel berechnet, statistisch ausgewertet und grafisch, ähnlich dem Schmidt'schen Netz, dargestellt. Dieses zeitaufwändige Verfahren – ca. 50 Arbeitsstunden je Bohrkern – wurde von VRVis durch ein Postprocessing automatisiert.

2 Einführung in die Computertomografie

2.1 Aufnahme und Rekonstruktion

Die Computertomografie (CT) ist in der Medizin seit mehr als 30 Jahren eine anerkannte Methode in der bildgebenden Diagnostik und nicht mehr wegzudenken. Die Fortschritte in der Anlagentechnik sowie in der Verfügbarkeit von Rechenleistung ermöglichten es, in den letzten Jahren diese Technologie vermehrt für technische Anwendungen zu nutzen.

Die CT erzeugt ein dreidimensionales Modell des untersuchten Volumens. Dabei entspricht der Wert jedes Punktes im Modell dem Röntgenschwächungskoeffizienten an derselben Stelle im untersuchten Volumen. Der Röntgenschwächungskoeffizient ist in erster Linie von der Dichte und des Weiteren von der Atomsorte der Materie sowie von der Energie der zur Untersuchung verwendeten Röntgenstrahlung abhängig. Somit kann, näherungsweise betrachtet, das Modell als Dichteabbild des untersuchten Volumens dargestellt werden. Dadurch ist es möglich, geometrische Eigenschaften des untersuchten Objekts, beispielsweise innen liegende Geometrien, zu untersuchen. Aber auch Poren und Porennetzwerke können so sichtbar gemacht werden. Des Weiteren können Dichteunterschiede wie Einschlüsse oder ein mehrphasiger Objektaufbau detektiert werden. Dadurch steht mit der CT eine Untersuchungsmöglichkeit zur Verfügung, die dreidimensionale, überlagerungsfreie Informationen über den Materialaufbau zerstörungsfrei liefert.

Um diese Ergebnisse erzeugen zu können, wird das zu untersuchende Volumen mittels Röntgenstrahlen ge-

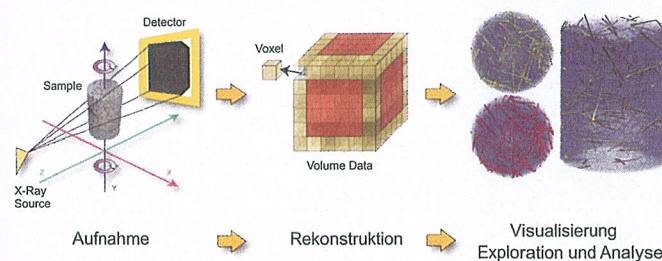


Bild 2. Schematische Darstellung des Ablaufs einer CT-Untersuchung

Fig. 2. Schematic workflow of a CT examination

scannt. Dazu wird die Probe zwischen einer Röntgenquelle und einem Detektor um 360° gedreht, während eine Vielzahl von Projektionsaufnahmen (üblicherweise mehrere hundert Bilder) der Probe erzeugt werden. Die einzelnen Durchstrahlungsbilder werden mittels eines Rekonstruktionsalgorithmus in ein Voxelmodell umgerechnet. Ein Voxel (Volumenpixel) ist das kleinste Element der Rekonstruktionsmatrix, und seine Größe wird daher als ein Maß für die Detaillierbarkeit im Modell herangezogen. Das Modell kann nach der Rekonstruktion visualisiert und beliebig virtuell manipuliert werden, um die entsprechenden Eigenschaften bzw. interessierenden Teile des untersuchten Volumens sichtbar zu machen und auszuwerten (Bild 2).

2.2 Visualisierung und Datenanalyse

Der aus der Rekonstruktion erhaltene Datensatz besteht aus einer dreidimensionalen Matrix, in der jedes Element einen Grauwert enthält, welcher der mittleren Röntgenabsorption entspricht. Die Visualisierung der Daten kann prinzipiell in zweidimensionalen Schnittbildern – was an einem zweidimensionalen Bildschirm ohne Überlagerungen möglich ist – oder als dreidimensionales Objekt erfolgen. Zur Darstellung wird jeder Position im Volumen ein Quadruple (r, g, b, a) zugewiesen, wobei a die Opazität und r, g, b den Farbwert eines Voxels wiedergibt. Zumeist werden mit Hilfe einer eindimensionalen Transferfunktion die Farbe und Opazität in Abhängigkeit vom Grauwert des Modells definiert. Bei diesem Ansatz werden alle Positionen im Volumen mit demselben Grauwert in gleicher Weise dargestellt. Sollen nun Fasern oder andere Einschlüsse einer Bewertung zugeführt werden, müssen diese zuerst aus der Matrix segmentiert werden. Das heißt, es werden Bereiche mit einer gewissen Eigenschaft markiert. Eine Möglichkeit dazu ist das so genannte Schwellwertverfahren. Dazu muss ein Grauwertbereich im Datensatz gefunden werden, in dem nur die gesuchten Fasern repräsentiert werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass aufgrund der endlichen Abmessungen der Voxel (partial volume effect) und der Strahlaufhärtung (beam hardening) beim Durchgang der Röntgenstrahlung durch die Materie sowie von Rauschen die Grauwerte in Fasern nicht homogen sind. Die Anwendung eines solchen Verfahrens wird also umso schwieriger, je näher die Grauwerte von gesuchten Objekten (Fasern) und dem übrigen Probenvolumen (Matrix) beieinander liegen. Ein solches Vorgehen für Fasern in Beton wurde in [4] vorgeschlagen.

Ein weiteres Verfahren zur Detektion von Objekten wie Einschlüssen, Fasern, etc., das üblicherweise eingesetzt wird, ist die Segmentierung mittels Region-growing und Filteroperationen wie morphologische Operatoren [6]. Beim Region-growing wird von unterschiedlichen Startpunkten (seed points) aus versucht, nach definierten Kriterien homogene Bereiche zu finden. Je nach Wahl der Parameter für das Region-growing kann die Ergebnissen-sibilität gesteuert werden. Somit können über eine geeignete Parameterwahl auch Einschlüsse gefunden werden, deren Grauwerte relativ nah an denen der Matrix sind, solange die Bereiche der Einschlüsse im Modell entsprechend homogen wiedergegeben werden. Insbesondere können über ein solches Region-growing Verfahren auch Einschlüsse segmentiert werden, die einen ähnlichen Grauwertbereich im Modell belegen, wie eine andere Einschlusskomponente (Stahlfasern und Schwerminerale), solange sich diese nicht örtlich direkt aneinander anlagern.

Die Ergebnisse der Segmentierung sind eine oder mehrere feste Segmentierungsmasken, die als Teil des 3D-Volumens visualisiert werden oder als Grundlage einer Quantifizierung dienen können. Die Segmentierungsergebnisse können ohne neuerliche Berechnungen nicht verändert werden. Dadurch wird die Detektion der Objekte von deren Visualisierung und Quantifizierung entkoppelt. Ein interaktiver Arbeitsprozess ist daher nicht gegeben. Dies ist vor allem dann problematisch, wenn der Aufbau und die Zusammensetzung des Probenvolumens nicht a-priori bekannt sind. Somit muss der Benutzer immer dann, wenn die Segmentierungsergebnisse nicht seinen Bedürfnissen entsprechen, die Parameter zur Segmentierung neu bestimmen und eine erneute Berechnung starten. So kann die Visualisierung und Analyse der Daten sehr zeitaufwändig werden, bis geeignete Parametersätze für die Segmentierung gefunden sind. Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag eine voll interaktive, visualisierungsbasierte Methode zur Objektdetektion von Stahlfasern vorgestellt, die keine Neuberechnung der Segmentierung benötigt [7].

3 Visualisierungsbasierte Exploration und Analyse für Stahlfaserspritzbeton

3.1 Grundsätzliche Überlegungen

Die visualisierungsbasierte Exploration und Analyse fußt auf dem WYSIWYG-Prinzip („What you see is what you get“). Das heißt, es ist eine Methode, die sich an einen fachkundigen Nutzer wendet, der die zu bewertenden

Merkmale (Fasern) mit den entsprechenden Werkzeugen auswählt und somit in die Analyse einbezieht. Dazu muss ein segmentierbarer CT-Datensatz vorhanden sein. Die eingeschlossenen Fasern müssen sich bezüglich ihres Grauwerts von der Matrix unterscheiden lassen. Bei deutlichen Unterschieden in der Röntgenabsorption zwischen mineralischer Matrix und Bewehrung, beispielsweise bei Stahlfasern, kann dies bereits bei relativ niedriger Auflösung des CT-Modells gegeben sein, wie das Beispiel in Abschn. 4 zeigt. Bei geringeren Unterschieden in der Absorption kann es notwendig sein, höhere Auflösungen für die CT-Aufnahme zu verwenden. In Abhängigkeit von der anzuwendenden Auflösung können, je nach CT-Anlage, unterschiedliche Probenvolumina untersucht werden. So kann bei einer geringeren Auflösung das untersuchte Probenvolumen steigen, sofern eine Durchstrahlung weiterhin gegeben ist.

Zur Auswertung der Fasern wurde das Orientierungshistogramm (DSH = Direction Sphere Histogram) entwickelt. Es nutzt die Möglichkeiten der dreidimensionalen Visualisierung aus, indem die Faserorientierungen bezüglich ihrer Häufigkeit farbkodiert auf einer Kugeloberfläche dargestellt werden. Diese Kugeloberfläche ist dabei als dreidimensionales Objekt bezüglich der Betrachtungspositionen manipulierbar und erlaubt eine Analyse bevorzugt vorliegender Orientierungen. Da die Richtungen aller Fasern einzeln vorliegen, können auch weitere Parameter zu den Faserorientierungen jederzeit berechnet werden

3.2 Prozess

Das Konzept zur interaktiven Datenexploration und -analyse, auf dem die Bewertung von Stahlfaserspritzbeton mittels applikationsspezifischen Transferfunktionen fußt, ist in [7] detailliert beschrieben. Dabei wird in einem unabhängigen Berechnungsschritt eine Schar an Segmentierungsmasken in einem Parameterbereich anstelle fester Parameterwerte berechnet (Bild 3, links). Als Segmentierungsverfahren kommt ein seeded region-growing-Verfahren zum Einsatz, bei dem in den einzelnen Berechnungsdurchgängen die Grauwertvarianz in einem einzelnen Objekt als zentraler Parameter schrittweise erhöht wird. Die so segmentierten Objekte und deren Änderung in Abhängigkeit vom Region-growing-Parameter werden in einem zusätzlichen Objektvolumen und in Objektgrößentabellen gespeichert (Bild 3, Mitte). Der Berechnungsschritt muss somit nur einmal für ein Volumen ausgeführt werden. Er ist Basis für alle weiteren Visualisierungen und Analysen. Diese können dann interaktiv durchgeführt

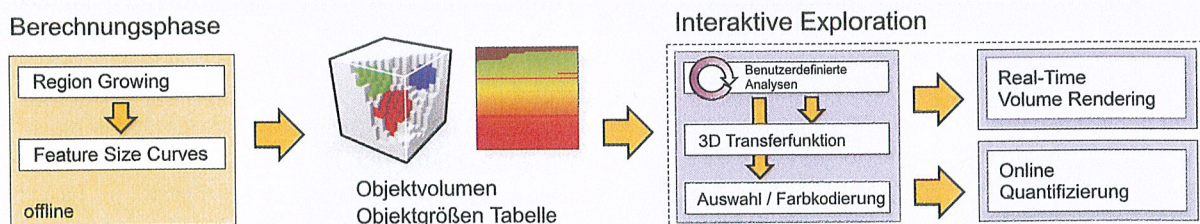
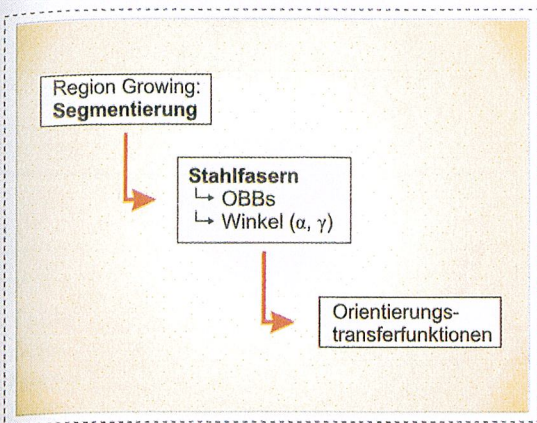


Bild 3. Ablauf der interaktiven, visualisierungsbasierten Datenanalyse mit Berechnungs- und nachfolgendem Explorations-schritt

Fig. 3. Overview of the system-pipeline. The unattended pre-computation stage calculates and stores all data needed for the subsequent interactive exploration stage

Berechnungsphase



Exploration und Quantifizierung

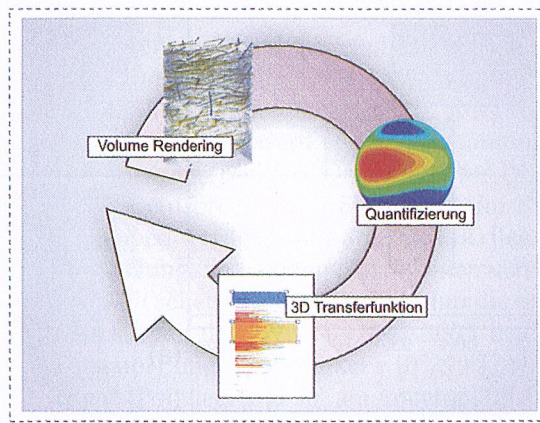


Bild 4. Ablauf der interaktiven, visualisierungsbasierten Datenanalyse der Faserorientierungen: Faserorientierungswinkelberechnung während der Berechnungsphase zur Definition von Orientierungs-Transferfunktionen (links); Exploration und Quantifizierung mit 3D-Transferfunktionen und Visualisierung des Datensatzes und des Orientierungshistogramms (rechts).
 Fig. 4. The pipeline modified for the two application scenarios. During the automatic pre-computation phase, the specific calculations required for the two applications are performed (left). The TFs for the exploration phase are also generated. The user explores the features using the TFs in the specific parameter domains and controls the selection in the volume rendering view, the appropriate visualizations and quantification results

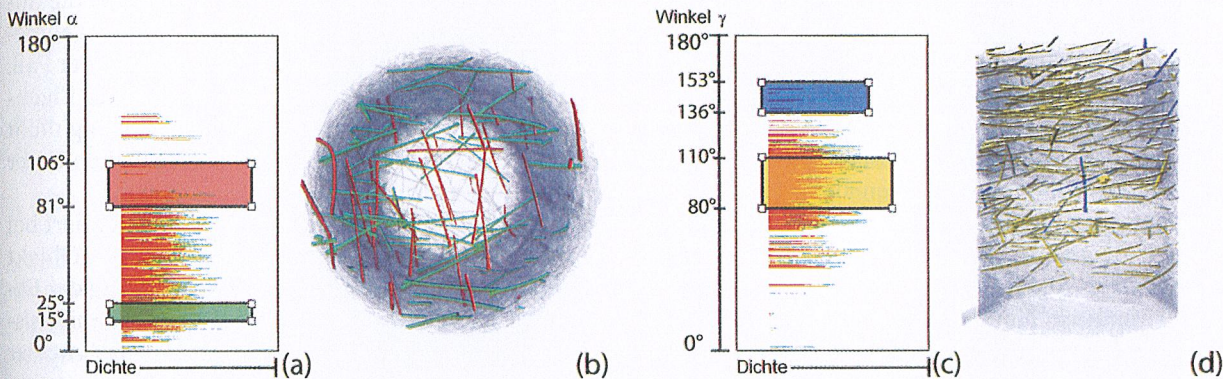


Bild 5. Orientierungs-Transferfunktionen mit platzierten Widgets für (a) Winkel α und (c) Winkel γ sowie 3D-Volume-View für (b) Winkel α und (d) Winkel γ

Fig. 5. DTFs for (a) α and (c) γ , where the x-axis shows the density and the y-axis shows the angular distribution of the fibres. The 3D volume views show the fibres selected by the widgets in the DTFs for (b) α and (d) γ

werden (Bild 3, rechts). Im ursprünglichen Ansatz basierte dieser Schritt auf einer dreidimensionalen Transferfunktion in den Parametern Grauwert, Objektgröße und Region-growing-Parameter. Für die bessere Handhabung bestimmter Untersuchungen wurde dieses Konzept bezüglich anwendungsspezifischer Transferfunktionen adaptiert [8]. Im gegenständlichen Fall wurde der Parameter Objektgröße durch den Parameter Faserorientierung ersetzt (Bild 4). Dabei bestimmt die Transferfunktion nicht nur die Visualisierung der Objekte, sondern allgemein die Art, nach welchen Kriterien Objekte für die Exploration und Analyse ausgewählt und definiert werden können. In der Exploration werden die Ergebnisse der Klassifizierung auf Basis der Transferfunktion mittels Real-Time Volume Rendering wiedergegeben. Die Klassifizierung wird automatisch zur Quantifizierung der Ergebnisse benutzt. Durch neu entwickelte Visualisierungen werden die Ergebnisse dargestellt (Bild 4, rechts). Somit erfolgt die Quantifizierung visualisierungsbasiert. Die Auswahl des fachkundigen Benutzers ist Grundlage der Bewertung. Dabei können unterschiedliche Visualisierungen und Be-

wertungen durchgeführt werden, ohne dass eine Neuberechnung der Segmentierung notwendig wird.

Im Berechnungsschritt werden die einzelnen Stahlfasern segmentiert und für jede Faser eine einhüllende Box (OBB, Bild 1d) auf Basis der Principal Component Analysis (PCA) bestimmt [9]. Daraus können die drei Eigenvektoren der Faser gewonnen werden, da die OBB die Faserichtung über die Richtung mit dem größten Eigenwert approximiert. Diese Richtung wird für die Zerlegung in die Winkel α und γ verwendet, die beide in einem Intervall $[0^\circ, 180^\circ]$ definiert sind und so alle Orientierungen abdecken.

Aus diesen Ergebnissen werden dann 3D-Histogramme für die Winkel α und γ über der Dichte (Grauwerte) der Fasern und dem Region-Growing-Parameter erstellt. In diesen Histogrammen können Orientierungs-Transferfunktionen bezüglich Farbe und Opazität der Fasern eingestellt werden, die zur interaktiven Exploration und zur sofortigen Quantifizierung verwendet werden (Bild 5). Zur Angabe spezieller Orientierungsbereiche können Orientierungs-Transferfunktionen auch in einer Auftragung

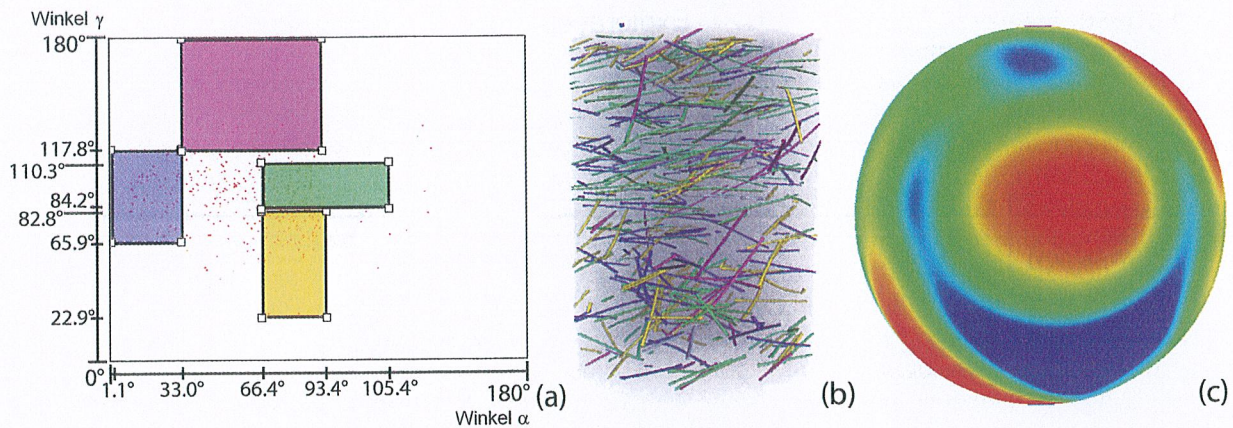


Bild 6. Orientierungs-Transferfunktion definiert im Raum γ über α (a) mit der zugehörigen 3D-Volume-View (b). Die so ausgewählten Faserorientierungen werden im DSH (c) dargestellt

Fig. 6. DTF for γ versus α (a) with the corresponding 3D volume view (b) showing the fibres in the respective colours selected by the DTF widgets. DSH (c) giving the distribution of the selected fibres

von γ über α erfolgen (Bild 6). Die Orientierungen der gewählten Fasern werden bezüglich ihrer Häufigkeit auch auf einer Kugeloberfläche, dem Orientierungshistogramm (DSH = Direction Sphere Histogram) farbkodiert dargestellt, das als dreidimensionales Objekt bezüglich der Betrachtungsposition entsprechend manipuliert werden kann (Bild 6c und Bild 8a). In diesem können bevorzugte Faserorientierungen leicht identifiziert werden.

Mit den so geschaffenen Werkzeugen der Orientierungs-Transferfunktionen und dem Orientierungshistogramm lassen sich detaillierte Analysen der zu untersuchenden Datensätze des Stahlfaserspritzbetons durchführen. Bei der Verwendung einer Orientierungs-Transferfunktion für alle Fasern kann ein Überblick über den gesamten Datensatz erfolgen. Bei Definition von unterschiedlichen Orientierungs-Transferfunktionen können weitergehende Analysen der Orientierungsverteilung im Datensatz angestellt werden. Die Visualisierung des Datensatzes und das Orientierungshistogramm werden dabei voll interaktiv an die Auswahl angepasst und können aus beliebigen Richtungen betrachtet werden, auch wenn die Auswahl während der Exploration verändert wird.

3.3 Anwendungsgrenzen

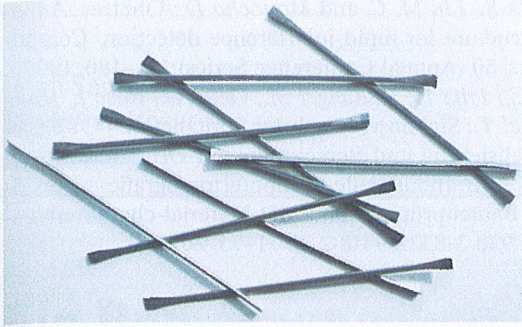
Die aufgezeigte Vorgehensweise zur Analyse von Faserorientierungen in Stahlfaserspritzbeton beruht auf der Untersuchungsmethode der Computertomografie. Die zu untersuchenden Fasern müssen sich daher in ihrer Röntgenabsorption von der Betonmatrix soweit unterscheiden, dass eine Segmentierung mittels Region-growing Verfahren möglich ist. Aufgrund der Definition der Transferfunktion in Abhängigkeit vom Region-growing Parameter ist es jedoch möglich, jeweils die optimale Segmentierungsvariante für den Anwendungsfall interaktiv und ohne Neuberechnung während der Datenexploration zu wählen. Es muss aber darauf geachtet werden, dass einzelne Fasern nicht als Fragmente erfasst werden, wodurch das Analyseergebnis, insbesondere das Orientierungshistogramm, verfälscht würde. Somit sind bei dünneren Fasern und Fasern mit geringerer Röntgenabsorption höhere Auflösungen bei der Aufnahme in der CT erforderlich.

Die Auswertung der Faserorientierungen über eine einhüllende Box und die Analyse deren Eigenvektoren bedingt, dass ein Eigenwert wesentlich größer ist, als die anderen beiden. Dies ist bei allen gestreckten Fasergeometrien auch bei leichter Krüpfung an beiden Enden der Fall. Bei gebogenen Fasern, bei denen zumindest zwei Eigenwerte ungefähr gleich groß sind, ist diese Bedingung nicht erfüllt. Eine Analyse der Orientierung einer solchen Faser ist dann nicht möglich, aber auch wenig sinnvoll.

Ein ähnliches Problem in der Auswertung existiert bei sich berührenden Fasern. Werden diese als ein Objekt segmentiert, so würde eine gemittelte Orientierung der Fasern ausgewertet werden. Liegen die Ergebnisse mit ausreichender Auflösung bezogen auf den Faserdurchmesser vor, so kann durch Wahl eines geeigneten Region-growing Parameters nur das Innere der Fasern segmentiert werden und die sich berührenden Fasern würden dabei vereinzelt. Solange es zu keiner Fragmentierung der Fasern bei der Segmentierung kommt, wird dadurch das Ergebnis der Orientierungsanalyse nicht verändert. Um derartige Fälle in Zukunft leichter von der Auswertung ausschließen zu können, wäre eine Definition der Transferfunktionen über den Parameter Merkmalsgröße (Volumen) anstelle des Grauwerts denkbar. Dadurch könnten Objekte mit von der Fasergröße abweichenden Abmessungen effizient von der Auswertung ausgeschlossen werden. Mit zunehmendem Fasergehalt in der Matrix wird die Menge an sich berührenden Fasern zunehmen, sodass, falls sie nicht wie oben beschrieben bei der Segmentierung vereinzelt werden können, eine Auswertung nicht mehr sinnvoll möglich ist.

4 Beispiel

Für die Gewinnung von Stahlfaserspritzbetonproben wurden zwei normal auf die Tunnellaubung (Ulme) gerichtete Kernbohrungen durchgeführt. Es konnte davon ausgegangen werden, dass diese Richtung der Spritzrichtung bei der Spritzbetonapplikation entsprach. Im Spritzbeton kam eine Stahlfaser mit 0,65 mm Drahtdurchmesser und 35 mm Länge (Bild 7) zum Einsatz. Die x- und y-Achsen der Kerne wurden entsprechend der Achsen des CT-Datensatzes



Technische Daten:

Drahtdurchmesser	d	0.65	mm	± 0.04	mm
Faserdurchmesser	d1	> 0.5	mm		
Faserdurchmesser	d2	< 0.9	mm		
Faserlänge	L	35	mm	± 1.5	mm
Flachendbreite	B	> 1.3	mm		
Flachendlänge	e1, e2	1.5	mm		
L / d - Verhältnis		55		± 5	
Zugfestigkeit des Drahtes	mind.	1000	N/mm ²		

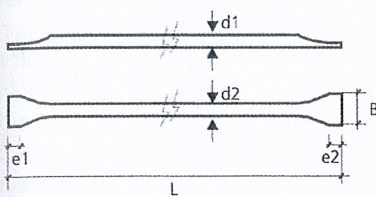


Bild 7. Verwendete Stahlfaser
Fig. 7. Used steel fibre

gewählt. Die beiden Proben wurden auf einem x|argos Computertomografen mit einer 320 kV Röntgenröhre und einem Zeilendetektor mit 5566 Pixel und 12 bit Dynamik aufgenommen. Bei der Aufnahme musste sichergestellt werden, dass die Auflösung des CT-Modells genügend hoch ist, um die einzelnen Stahlfasern gut zu erkennen und zu verhindern, dass keine einzelnen Faserfragmente ausgewertet werden. Die Aufnahme mit einer Voxelgröße von $(259 \mu\text{m})^3$ genügt diesen Anforderungen. Die Rekonstruktion wurde mit einem modifizierten Feldkamp-Algorithmus und einer Software der Firma Phoenix|x-ray Systems and Services durchgeführt.

Die beiden untersuchten Proben zeigten eine hohe Faserkonzentration bei einem Winkel γ von rund 90° und damit senkrecht auf die Applikationsrichtung. Dies ist im DSH zu sehen, in dem die Richtungsverteilung der selektierten Stahlfasern farbkodiert ist. Rot bedeutet eine hohe Anzahl an Stahlfasern in eine bestimmte Richtung, Blau eine niedrige (Bild 8a). Die Farben des DSH können auch auf die entsprechenden Stahlfasern im 3D-Volume-View gemapped werden (Bild 8b). Bild 8c liefert die grafische Darstellung der „manuellen“ Untersuchung [5] mittels Schmidt'schen Netzes. Hier wird nur die untere Halbkugel dargestellt mit dem Winkel α [$0^\circ, 360^\circ$] in Umfangsrichtung (Äquator) und dem Winkel γ [$0^\circ, 90^\circ$], wobei 0° im „Zentrum“ (Pol) liegt und 90° am Äquator [10].

Den Winkel α betrachtet, ist eine Faseransammlung in einem Winkelbereich von rund 10° bis 90° auszumachen (Bild 5a und Bild 8a,c). Die Fasern sind also bezüglich der Ebene parallel zur Tunnelwand nicht zufällig verteilt, wie dies im Sinne gleichmäßiger, mechanischer Eigenschaften wünschenswert wäre. Es wird daraus geschlossen, dass die Spritzrichtung nicht exakt orthogonal zur Tunnelwand erfolgte und dies zu einer teilweisen Ausrichtung der Fasern führte.

Die Analyse der beiden CT-Datensätze sowohl mit der visualisierungsbasierten, interaktiven Methode, als auch mit der manuellen Auswertung lieferten idente Ergebnisse. Die Darstellung im Orientierungshistogramm und im Schmidt'schen Netz ist gleichwertig. Die manuelle Auswertung benötigte für eine Probe eine Zeit von 50 Arbeitsstunden. Die Auswertung mittels der visuellen, interaktiven Methode benötigte auf einer Standardworkstation nur zwei Minuten. Daraus ist das hohe Potential zur Echtzeitdatenanalyse mit dem vorgestellten Tool ersichtlich.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ein auf der Untersuchung mittels Computertomografie basierender Auswerteprozess für die Faserorientierung des Stahlfaserspritzbetons wurde vorgestellt. Die Auswertung der CT-Daten erfolgt mit einem interaktiven, visualisierungsbasierten Verfahren mit mehrdimensionalen Transferfunktionen. Dadurch ist der Fachexperte in der Lage,

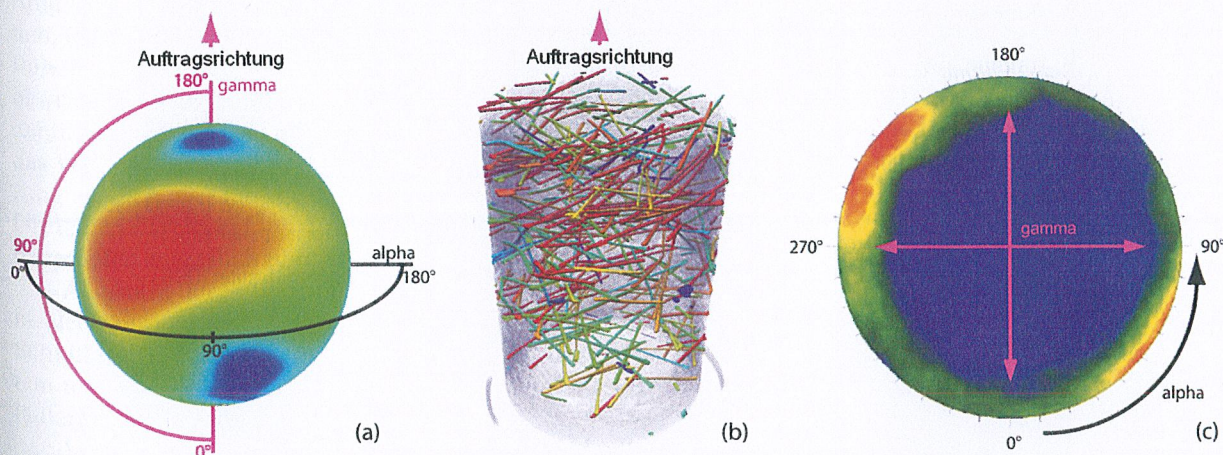


Bild 8. Fasern mit Farbkodierung entsprechend ihrer Häufigkeit im (a) DSH, (b) 3D-Volume-View und (c) Schmidt'schen Netz.

Fig. 8. (a) DSH showing the frequency of occurrence of directions on a hemisphere, (b) 3D volume view with the steel fibres coloured according to the DSH colour-coding, (c) Schmidt net.

gezielte Analysen der Faserorientierungen einer Probe in kurzer Zeit durchzuführen.

Die Aufnahme mittels CT-Scan ermöglicht die rasche Erfassung aller Stahlfasern in einem Probekörper, ohne dass dieser zerstört werden muss. Die Analyse erfolgt mit Orientierungs-Transferfunktionen über den Parametern der Orientierungswinkel α und γ , der Dichte (Grauwerte) im Datensatz und des Region-Growing-Parameters. Die Visualisierung der Orientierungsverteilung bedient sich einer Kugeloberfläche, dem Orientierungshistogramm. Dieses zeigt rasch Orientierungen mit erhöhter bzw. geringerer Häufigkeit unter den ausgewählten Fasern.

Der vorgestellte Auswerteprozess stellt somit ein großartiges Werkzeug dar, mit dem in kürzester Zeit die vollständige Bewertung und Analyse der Faserorientierungen einer Stahlfaserspritzbetonprobe vorgenommen werden kann.

Danksagung

Die Autoren danken *Daniel Habe* vom Österreichischen Gießerei-Institut, sowie *Thomas Höllt* und *Johanna Beyer* vom VRVis für ihre wertvollen Beiträge zur vorliegenden Arbeit. Des Weiteren gilt der Dank der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) für die finanzielle Unterstützung des Projekts.

Literatur

- [1] Pittino G., Gharehkhani G., Krenn F., Stelzer G. und Golser J.: Spritzbeton – der etwas andere Beton. Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004), Heft 2, S. 97–102.
- [2] Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik (ÖVBB), Richtlinie Spritzbeton, 2009.
- [3] Illerhaus, B.: Eine einfache aber langsame Art, die Orientierung von segmentierbaren Fasern in 3D Voxelbildern zu ermitteln, DGZfP-Jahrestagung 2007, Zerörungsfreie Materialprüfung, „ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung“, 14.–16. Mai 2007, Fürth, BB104-CD.
- [4] Schnell J., Schladitz K. und Schuler F.: Richtungsanalyse von Fasern in Betonen auf Basis der Computer-Tomographie. Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), Heft 2, S. 72–77.
- [5] Blasch C.: Orientierung von Stahlfasern im Stahlfaserspritzbeton. Bachelorarbeit, Lehrstuhl Subsurface Engineering, Montanuniversität Leoben, 2007.
- [6] Engel K., Hadwiger M., Kniss J. M., Rezk-Salama C. and Weiskopf D.: Real-Time Volume Graphics, Wellesley, A. K. Peters, 2006.
- [7] Hadwiger M., Fritz L., Rezk-Salama C., Höllt T., Geier G. and Pabel T.: Interactive Volume Exploration for Feature Detection and Quantification in Industrial CT Data, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 14 (6), pp. 1507–1514, 2008.
- [8] Fritz L., Hadwiger M., Geier G., Pittino G. and Gröller M.E.: A Visual Approach to Efficient Analysis and Quantification of Ductile Iron and Reinforced Sprayed Concrete, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 15 (6), 1343–1350, October 2009.

- [9] Gottschalk S., Lin M. C. and Manocha D.: Obbtree: A hierarchical structure for rapid interference detection. Computer Graphics, 30 (Annual Conference Series):171–180, 1996.
- [10] Pittino G., Fritz L., Hadwiger M., Geier G., Rosc J., Habe D. und Pabel T.: Stahlfaserbewehrter Spritzbeton – CT basierende Visualisierung und Berechnung der Orientierung von Stahlfasern. – in: Industrielle Computertomografie – Zerörungsfreie Bauteilprüfung und 3D-Material-charakterisierung. ISBN 978-3-8322-9418-2. S. 71–75, 2010.



Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Pittino
Montanuniversität Leoben
Lehrstuhl für Subsurface Engineering
Erzherzog-Johann-Straße 3
8700 Leoben, Österreich
gerhard.pittino@unileoben.ac.at



Dipl.-Ing. Dr. Georg Geier
Siempelkamp Gießerei GmbH
Siempelkampstraße 45
47803 Krefeld
georg.geier@siempelkamp.com



Dipl.-Ing. Laura Fritz
VRVis Zentrum für Virtual Reality und
Visualisierung Forschungs-GmbH
Donau City Straße 1
1220 Wien
fritz@vrvis.at



Prof. Dipl.-Ing. Dr. Markus Hadwiger
King Abdullah University of Science
and Technology Thuwal
Thuwal 23955-6900
Kingdom of Saudi Arabia
markus.hadwiger@kaust.edu.sa



Dipl.-Ing. Joerdis Rosc
joerdis.rosc@ogi.at



Dipl.-Ing. Dr. Thomas Pabel
tomas.pabel@ogi.at

Österreichisches Gießerei-Institut (ÖGI)
Parkstraße 21
8700 Leoben, Österreich