

Quantitative räumliche Auswertung der Mikrostruktur eines in Beton eingebetteten Multifilamentgarns*

Bong-Gu Kang¹, Inga Focke², Wolfgang Brameshuber³, Wilhelm Benning⁴

Zusammenfassung: Zur detaillierten Beschreibung des Lastabtragverhaltens textiler Bewehrung im Beton ist es erforderlich, das Penetrationsverhalten der Betonmatrix in die stark heterogene Garnstruktur zu beschreiben. Zur Charakterisierung der Mikrostruktur im Querschnitt wurde eine Bildanalysemethode entwickelt, um die Verbundsituation der einzelnen Filamente quantitativ auswerten zu können. Um eine räumliche Beschreibung der Verbundsituation zu erreichen, wurde die Strategie verfolgt, aus aufeinander folgenden Schichtaufnahmen mittels Rasterelektronenmikroskopie eine räumliche Struktur abzuleiten. Hierzu wurden zum einen die experimentelle Vorgehensweise erarbeitet und zum anderen ein Ansatz für die Zuordnung der Filamente zwischen den einzelnen Querschnitten entwickelt.

Summary: In order to describe the load bearing behaviour of textile reinforcement in concrete in detail, it is necessary to characterise the penetration behaviour of the concrete matrix into the strongly heterogeneous yarn cross-section. For the characterisation of the microstructure in the cross-section, an image analysing method was developed to allow an evaluation of the bond states of the individual filaments quantitatively. For a spatial description of the bond states, the strategy is followed to take images of successive layers with the aid of scanning electron microscopy in order to derive a spatial structure. Therefore, first the experimental procedure was worked out and second an approach for the allocation of the filaments between the cross sections was developed.

* Dies ist eine begutachtete Veröffentlichung./This is a peer-reviewed paper.

Online verfügbar/Online available: [urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244046141163-19660](http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244046141163-19660)

¹ Dipl.-Ing., Institut für Bauforschung, RWTH Aachen

² Dipl.-Ing., Geodätisches Institut, RWTH Aachen

³ Prof. Dr.-Ing., Institut für Bauforschung, RWTH Aachen

⁴ Prof. Dr.-Ing., Geodätisches Institut, RWTH Aachen

1 Einleitung

Um den Lastabtrag zwischen textiler Bewehrung aus AR-Glas und Betonmatrix zu untersuchen, werden Ausziehversuche einzelner Multifilamentgarne aus dem Beton durchgeführt. Aufgrund einer unvollständigen Penetration des Betons in die heterogene Struktur des Multifilamentgarns, liegen unterschiedliche Verbundzustände und somit unterschiedliche Belastungen der Filamente vor, die zu einem sukzessiven Versagen der Filamente führen (BANHOLZER [1]). Verschiedene bestehende Modelle wie das analytische Modell (BANHOLZER [1]), das Verbundschichtenmodell (KONRAD ET AL. [2]) und das Haftbrückenmodell (SCHORN [3]) berücksichtigen die Inhomogenität der Mikrostruktur durch die Einführung von Modellparametern wie „verbundfreie Länge“ und „Verbundqualität“. Da diese Parameter nicht bekannt sind, werden sie invers bestimmt.

In KANG ET AL. [4] wurde eine quantitative, statistische Auswertung der Querschnitte der Mikrostruktur auf der Grundlage von REM-Aufnahmen durchgeführt, um die genannten Modellparameter direkt zu ermitteln. Dazu wurde zunächst eine Bildanalysemethode entwickelt, um die drei wesentlichen Phasen, nämlich Filament, Beton und Hohlräume zu identifizieren und zu trennen. Es konnte gezeigt werden, dass die Auswertung eines einzelnen Querschnitts nicht ausreichend ist, um das Lastabtragverhalten zu begründen. Folglich wird in diesem Beitrag ein Ansatz zur räumlichen Auswertung der Mikrostruktur (Verbundzustand der einzelnen Filamente, Welligkeit der Filamente) vorgestellt. Auf der Grundlage von REM-Aufnahmen aufeinander folgender Schichten der Mikrostruktur erfolgt eine Zuordnung der einzelnen Filamente zwischen diesen. Der Abstand der Schichten wird abhängig von den Erfordernissen der Zuordnung im Bereich von 0,1 und 0,5 mm variiert. Für die erste Zuordnung zwischen dem ersten und dem zweiten Querschnitt wird das ICP-Verfahren (iterative closest pointset) angewendet (BESL ET AL. [5]). In den Zuordnungen weiterer folgender Querschnitte kann die Filamentrichtung aus der vorherigen Zuordnung verwendet werden, um die neue Position der einzelnen Filamente im nächsten Querschnitt zu schätzen. Abhängig von der Abweichung zwischen geschätzter und tatsächlicher Position eines Filaments wird der Suchradius des Filaments in dem folgenden Querschnitt mit Hilfe des Kalman-Filters angepasst.

2 Experimentelle Untersuchung

Zur Charakterisierung der realen Mikrostruktur ist ihre räumliche Darstellung erforderlich. Mit Hilfe der Röntgen Computertomographie, mit der grundsätzlich räumliche Strukturen aufgenommen werden können, konnte für die vorliegende Mikrostruktur die erforderliche Qualität nicht erzielt werden. Zum einen besteht das Problem, dass für eine erforderliche Auflösung von 1 μm nur ein maximaler Probendurchmesser von 1 mm untersucht werden kann, wobei jedoch die zu untersuchenden Garne wesentlich größere Abmessungen errei-

chen. Zum anderen zeigen Untersuchungen an kleinen Bruchstücken (kleiner als 1 mm), dass wegen der sehr ähnlichen Dichte von Zementstein und Glas kein ausreichender Kontrast zwischen Beton und Filamenten vorliegt BANHOLZER [1].

In dieser Arbeit wird die Strategie verfolgt, mit kleinen Abständen (zwischen 0,1 und 0,5 mm) aufeinander folgende Schichten mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) aufzunehmen, auf deren Basis dann die räumliche Struktur abgeleitet werden kann. Die Schichtaufnahmen werden durch sukzessives Abtragen der Oberflächenschichten und Querschnittsaufnahmen erzeugt. Hierbei ist ein eindeutiges, globales Bezugssystem für eine Orientierung der Schichtaufnahmen bei der Auswertung notwendig.

Da die Qualität der Aufnahme entscheidend für eine akkurate Separierung der 3 wesentlichen Phasen Filamente, Beton und Hohlraum in der Bildanalyse ist, kommt der qualitativen Probenpräparation hohe Bedeutung zu.

2.1 Verwendete Materialien

In Bild 1a ist das verwendete Textil 2D-10-07 bestehend aus Rovings mit 2400 tex dargestellt. Durch die textile Verarbeitung wird das in Hauptlastrichtung liegende Garn (0° Richtung) mit Wirkfäden umwickelt, so dass die Form des ursprünglichen Rovings (siehe Bild 1b) und somit auch die Betonpenetrationseigenschaft wesentlich verändert werden. Für die Untersuchung des Tragverhaltens der Garne im Textil, wurden hier extrahierte Garne aus dem Textil 2D-10-07 für die vorliegende Untersuchung verwendet.

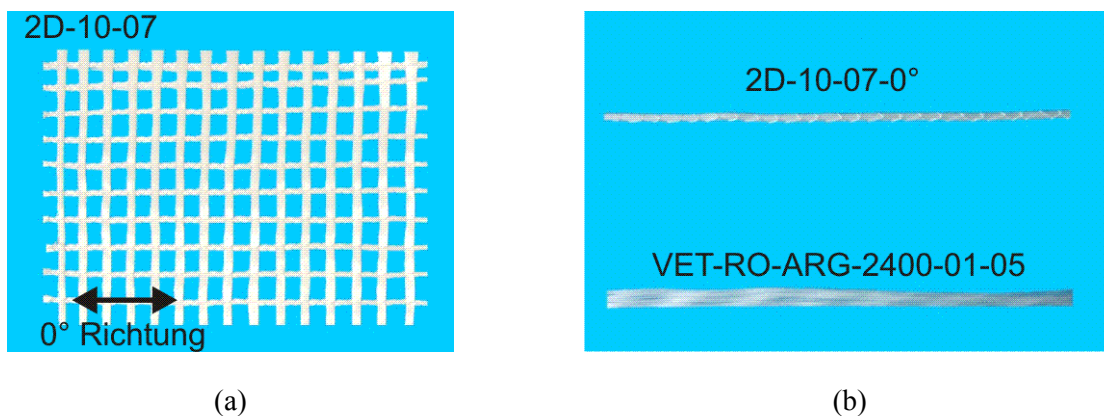


Bild 1: a) Textil 2D-10-07, b) Extrahiertes Garn aus Textil und Roving von der Spule

Fig. 1: Textile 2D-10-07, b) Extracted yarn from textile and roving from the spool

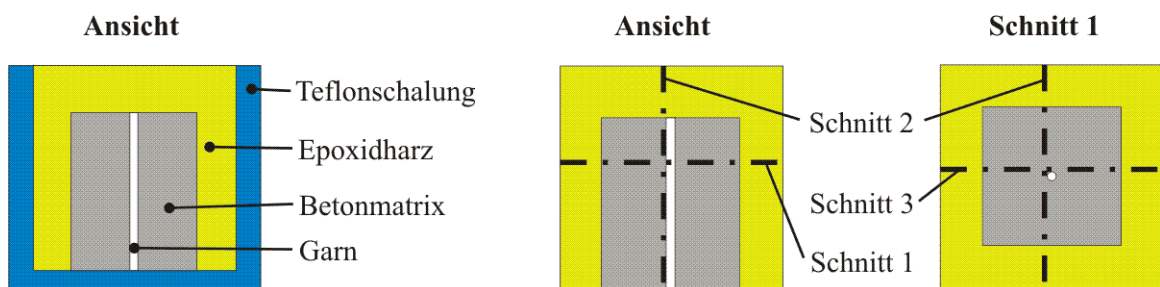
In Tabelle 1 ist die Zusammensetzung des verwendeten Feinbetons PZ-0899-01 (BROCKMANN [7]) angegeben. Das Größtkorn des Zuschlaggemisches beträgt 0,6 mm.

Tabelle 1: Zusammensetzung des Feinbeton**Table 1:** Constituents of the fine-grained concrete

Bestandteil	CEM I 52,5 N	Flugasche	Silikastaub	Fließmittel	Quarzmehl	Quarzand	Wasser
Inhalt in kg/m ³	490	175	35	7	500	714	245

2.2 Probenpräparation

Die zu untersuchenden Garne werden in Beton eingebettet. Nach einem Tag in der Schalung werden die Probekörper für weitere 27 d bei 20 °C und 100 % r.F. gelagert. Um Verschiebungen sowie ein Abknicken der Filamente während des Schleifprozesses zu vermeiden, werden die Filamente fixiert. Hierzu werden die Probekörper zunächst in einem Trockenofen bei 60 °C 5 Tage gelagert, um den Hohlraum zwischen den Filamenten zu trocknen. Anschließend werden die Probekörper mit einem niedrigviskosen Epoxidharz der Fa. Struers (EpoFix-Harz, EpoFix-Härter) vergossen (siehe Bild 2 links). Da der Beton sehr dicht ist, dringt das Harz kaum in den Beton ein. Jedoch penetriert das Harz in die Zwischenräume des Garns über das freie Ende entlang der Garnlängsachse. Da das verwendete Harz eine niedrige Viskosität aufweist und sehr gut in die Zwischenräume des Garns eindringt, wird auf die übliche Aufbringung eines Unterdrucks zur Verbesserung der Harzpenetration verzichtet, um Positionsänderungen der Filamente weitestgehend zu vermeiden. Zur Bestimmung der Positionsänderung des Garns im Beton ist ein globales Bezugssystem notwendig, an dem die Schichtbilder ausgerichtet werden können. Als globales Bezugssystem werden zwei Schnittflächen erzeugt. Die Probe wird auf die Starthöhe von 25 mm planparallel zur Unterseite des Probekörpers geschnitten (siehe Bild 2 Mitte, Schnitt 1).

**Bild 2:** Präzisionschnitte zur Erzeugung von Bezugsflächen**Fig. 2:** Precision cuts to create reference surfaces

Anschließend werden zwei senkrechte Schnitte entlang des Garns mit Hilfe einer Präzisionsdiamantsäge der Fa. Struers (Accutom 2) erzeugt (Schnitt 2 und 3). Hierbei muss beachtet werden, dass der Schnitt nicht zu weit vom Garn entfernt ist, da sonst die Schnittkante außerhalb des Aufnahmebereichs liegt. Es darf aber auch nicht zu nah sein, um zu gewährleisten,

dass das Garn an keiner Stelle angeschnitten wird. Zum sukzessiven Abtragen der Oberfläche der Probe wird eine Planschleifmaschine der Fa. G &N (MPS 300) eingesetzt. Die Probe wird nochmals in Epoxidharz (Araldit der Fa. Ciba-Geigy) eingebettet, um die exakte Form für die spezielle Halterung der Schleifmaschine zu erreichen (siehe Bild 3).

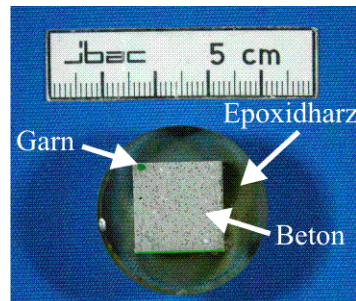


Bild 3: Präparierter Probekörper

Fig. 3: Prepared specimen

Die spezielle Halterung und die definierte Zustellung der Proben mit einer Geschwindigkeit von 10 $\mu\text{m}/\text{min}$ gewährleisten ein planparalleles und gleichmäßiges Schleifen der Probe. Um optimale REM-Aufnahmen zu erzielen, ist eine hohe Anschliffqualität der Probe unerlässlich. Aus diesem Grund wird in mehreren Arbeitsgängen die nächste aufzunehmende Schicht vorbereitet. Mit einer Diamanttopfschleifscheibe mit einer mittleren Körnung von 46 μm (D46) wird der Großteil des abzutragenden Materials entfernt. Anschließend werden mit einer Diamanttopfschleifscheibe mit einer kleineren mittleren Körnung von 20 μm die Unebenheiten resultierend aus der größeren Körnung entfernt. Als letzter Arbeitsschritt wird die Probe mit einer halbautomatischen Poliermaschine der Fa. Wirtz (Phönix 4000) bei einem Anpressdruck von 2 bar nacheinander mit einem Poliertuch und einer Diamantsuspension mit einer mittleren Körnung von 15 μm , 6 μm und 1 μm poliert.

Nach der REM-Aufnahme wird die Dicke der abgetragenen Schicht mit Hilfe eines Messtasters mit einer Messauflösung von 1 μm gemessen.

2.3 Schichtaufnahmen mittels Rasterelektronenmikroskopie

Zur Aufnahme der Schichtbilder kommt ein Rasterelektronenmikroskop der Fa. Leo (Leo 1450 VP) zum Einsatz. Die Bildeinstellungen werden dahingehend optimiert, dass ein maximaler Kontrast zwischen den einzelnen Phasen erreicht wird. Aufgrund der Abnutzung der Kathode (Wolframdraht) verändert sich die Intensität des Elektronenstrahls, so dass Helligkeit und Kontrast bei jeder Aufnahme manuell eingestellt werden müssen. Es wurde eine 50-fache Vergrößerung gewählt. Eine kleinere Vergrößerung führt zu einer unzureichenden Auflösung der einzelnen Phasen im Bild. Die Bildauflösung beträgt 1260 Pixel pro mm.

3 Zweidimensionale Auswertung

In Bild 4a ist eine REM-Aufnahme dargestellt. Die Schnittkanten dienen als Bezugslinien zur globalen Positionierung und Orientierung der Aufnahmen (vgl. Abschnitt 2.2). Zur quantitativen Auswertung des Verbundzustands der einzelnen Filamente werden die wesentlichen Phasen Filamente, Betonmatrix und Hohlraum bildanalytisch getrennt. Für eine detaillierte Beschreibung der Bildanalyse wird auf LANGE [6], KANG ET AL. [4] verwiesen. In Bild 4b ist das Ergebnis in Form einer 3-Phasen-Idealisierung der REM-Aufnahme dargestellt. Die Penetrationscharakteristik wird abhängig vom Abstand zum Garnrand beschrieben. Für jedes Filament wird der Verbundanteil (Kontaktfläche zwischen Filament und Beton) bestimmt.

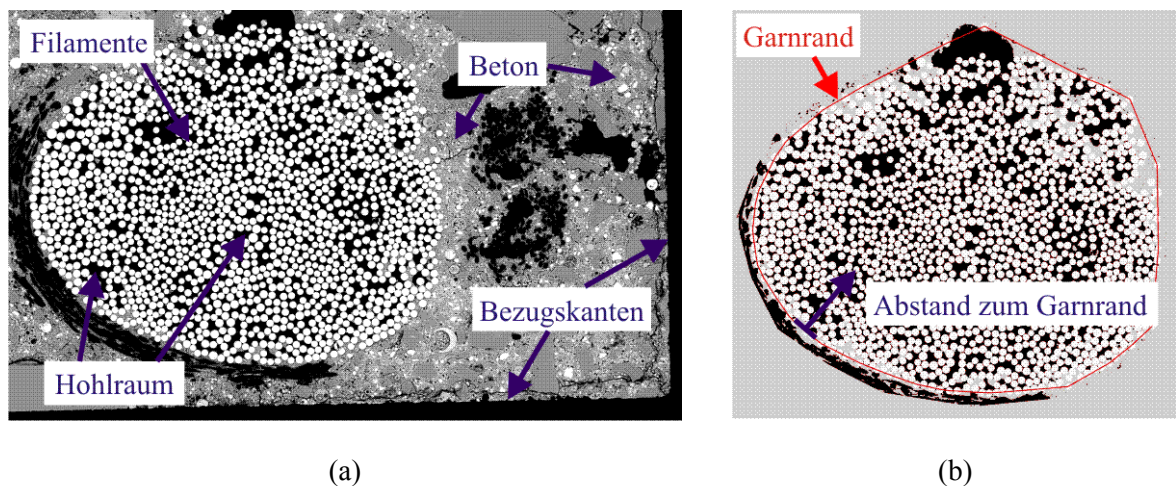


Bild 4: a) REM-Aufnahme, b) Drei-Phasen-Idealisierung eines in Beton eingebetteten Garns

Fig. 4: a) SEM image, b) Three phase idealisation of a yarn embedded in concrete

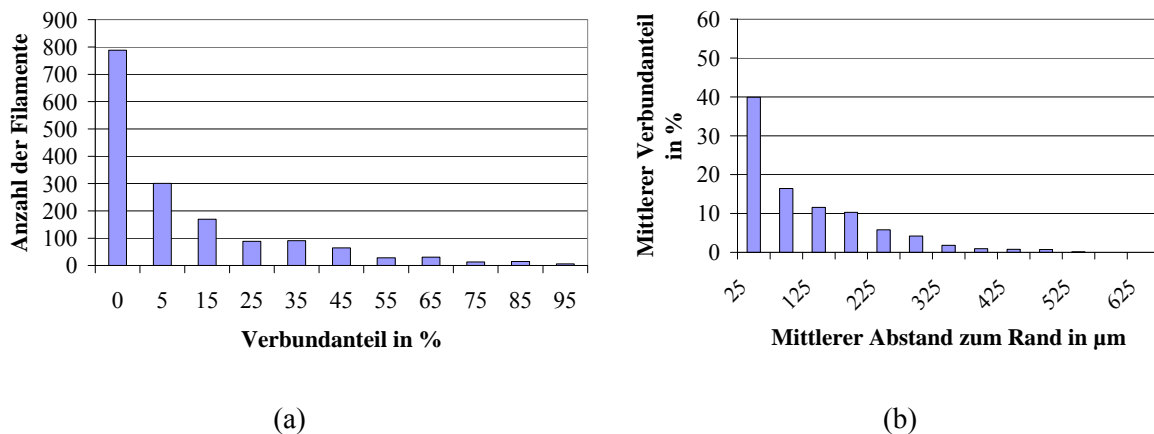


Bild 5: a) Verteilung der Filamente nach dem Verbundanteil, b) Verteilung der Filamente nach dem Abstand zum Garnrand

Fig. 5: a) Filament distribution acc. to the bond fraction, b) Filament distribution acc. to the distance from the boundary of the yarn

Für eine statistische Auswertung, werden die Filamente in 11 Verbundanteilklassen unterteilt. Die erste Klasse beinhaltet Filamente mit einem Verbundanteil von 0 %. Die übrigen zehn äquidistanten Klassen besitzen jeweils eine Klassenbreite von 10 % Verbundanteil, welche von größer als 0 % und kleiner oder gleich 100 % Verbundanteil reichen. In Bild 5a ist die absolute Häufigkeit der Filamente in den Verbundanteilklassen dargestellt. Hierbei sind die Klassenmitten auf der x-Achse aufgetragen. Wegen der kompakten Form des Garns dringt nur wenig Beton ins Garninnere ein. Nahezu die Hälfte der Filamente im Garn hat einen Verbundanteil von 0 %.

Um den Zusammenhang zwischen dem Verbundanteil und dem Abstand zum Garnrand zu untersuchen, wird eine Klassifizierung der Filamente in Abstandsklassen mit einer konstanten Klassenbreite von 50 μm durchgeführt. Aufgrund der konstanten Klassenbreite nimmt die Klassenhäufigkeit mit zunehmendem Abstand zum Garnrand ab. Für jede Abstandsklasse (Klassenmitten sind auf der x-Achse aufgetragen) ist der mittlere Verbundanteil der Filamente der jeweiligen Abstandsklasse in Bild 5b dargestellt. Erwartungsgemäß sinkt der Verbundanteil mit zunehmendem Abstand.

4 Dreidimensionale Auswertung

Für eine räumliche Charakterisierung des Verbundzustands der einzelnen Filamente im Garn müssen die Filamente zwischen den Querschnitten zugeordnet werden. Hierbei sind die verschiedenen Filamentradien hilfreich, weil sie einer großen Streuung unterliegen (zwischen 10 und 20 μm). Aufgrund der hohen Filamentanzahl (ca. 1600 Stück pro Roving) wird die Radi-

usübereinstimmung als Zusatzkriterium bei den Zuordnungen verwendet, worauf im Folgenden nicht weiter eingegangen wird.

Die Zuordnung der Filamente zwischen den ersten beiden Schnitten ist am Unsichersten, weil keine Vorinformation vorliegt. Lediglich die globale Translation und Rotation der Schichtaufnahmen, welche anhand der Bezugskanten bestimmt wurden, können auf alle Lagekoordinaten angewendet werden.

Um die Unsicherheiten einer globalen Transformation für die Filamentbewegungen zwischen den ersten beiden Schichtaufnahmen zu verteilen, wird der erste Querschnitt in vier gleich große Bereiche geteilt, die separat in die folgende Zuordnung eingehen. Zunächst werden einzelne Filamente manuell zugeordnet und für jeden Bildteil die Parameter einer Affintransformation geschätzt. Diese Parameter werden dann im zweiten Schritt durch das ICP-Verfahren über alle Filamente verbessert.

4.1 ICP-Verfahren

Das ICP-Verfahren (iterative closest pointset) nach BESL UND MCKAY [5] ist ein iteratives Verfahren zur Zuordnung von Objekten zu zwei verschiedenen Zuständen. Hierfür werden, wie in Bild 6 schematisch dargestellt, im Fall der Filamentzuordnungen zwischen den ersten beiden Querschnitten Affintransformationsparameter geschätzt, mit deren Hilfe aus den Filamentpositionen des ersten Querschnitts die Filamentpositionen im zweiten Querschnitt prognostiziert werden. Für diese Positionen werden nächste Nachbarn aus den bekannten Filamenten des zweiten Querschnitts bestimmt. Die Abstände von den Prognosekoordinaten zu diesen nächsten Nachbarn werden aufsummiert. Aus den gefundenen Filamentpaaren wird eine neue Transformation bestimmt, mit der wieder Filamentpositionen aus den bekannten Filamenten des ersten Querschnitts für den zweiten geschätzt werden.

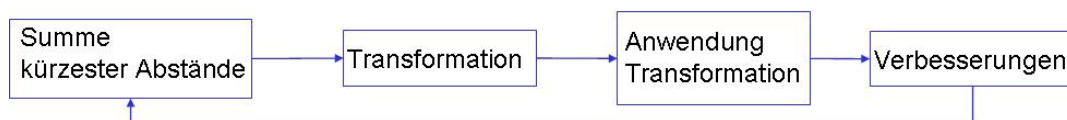


Bild 6: Schematische Darstellung des iterativen Ablaufs des ICP-Verfahrens

Fig. 6: Scheme of the iterative procedure of the ICP-method

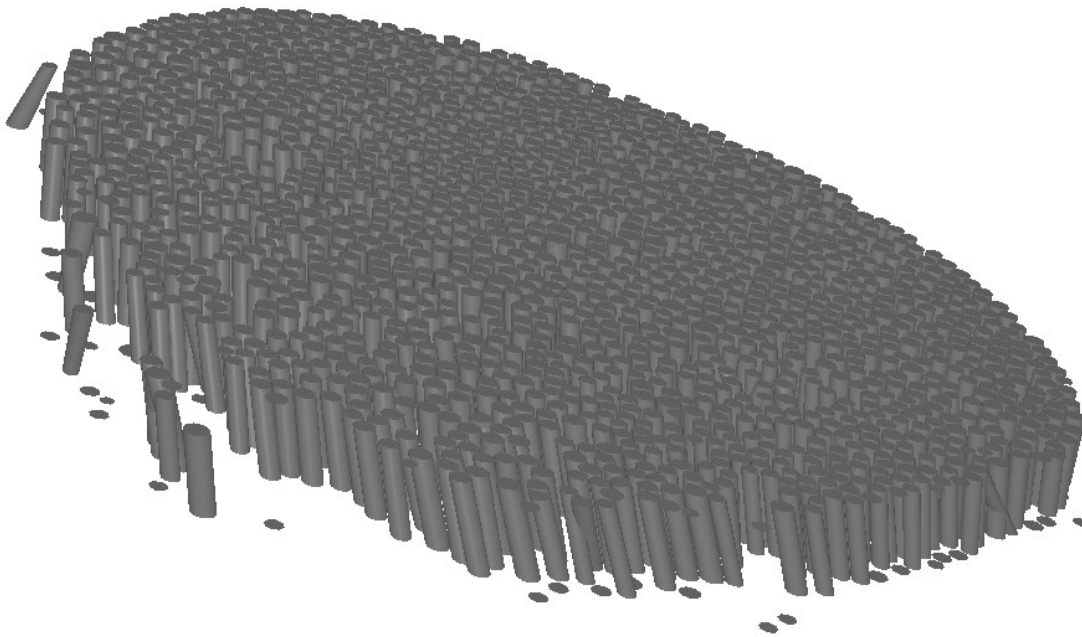


Bild 7: 3D Darstellung der Zuordnung von Filamenten zwischen den ersten beiden Querschnitten

Fig. 7: 3D representation of the mapping of filaments between the first two cross-sections

Auch hierfür werden die Abstände zu nächsten Nachbarn aufsummiert. Ist diese Summe kleiner als die zuvor berechnete, wird dieser Iterationsschritt erfolgreich, andernfalls werden neue Transformationsparameter bestimmt. Bild 7 zeigt eine dreidimensionale Darstellung von der Zuordnung der Filamente zwischen den ersten beiden Querschnitten mit Hilfe des ICP-Verfahrens. Von den in den Querschnitten detektierten Filamenten (1596 bzw. 1603 Filamente im Querschnitt 1 bzw. 2) konnten 1578 Filamente zugeordnet werden.

4.2 Lineares Kalmanfilter

Die weiteren Zuordnungen werden über ein lineares Kalmanfilter bestimmt. Bild 8 veranschaulicht maßstäblich die durchschnittlichen Verhältnisse von einem durchschnittlichen Filamentradius zum Querschnittsabstand vom ersten und zweiten Querschnittsübergang.

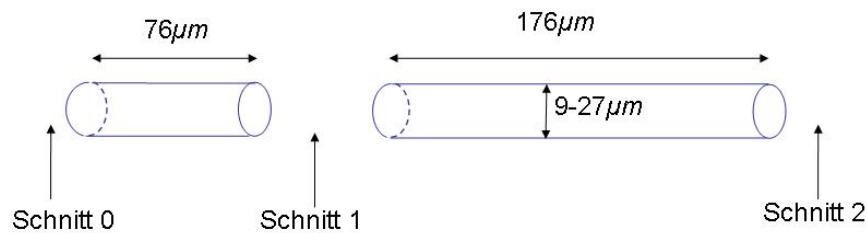


Bild 8: Maßstäbliche Darstellung Abstand-Radius-Verhältnis erster Übergang (links) zweiter Übergang (rechts)

Fig. 8: Scaled illustration distance-radius-relation of first passage (left), second passage (right)

Da die dargestellten Filamente aus massivem Glas sind, ist eine Biegung nur geringfügig möglich, so dass eine lineare Bewegung eine erste Näherung darstellt. Bei einem Kalmanfilter wird jedes Filament einzeln durch alle Querschnitte verfolgt. Dadurch werden Filamentbewegungen durch den Körper unabhängig von seinen Nachbarfilamenten nachvollzogen. Aus bekannter Lageinformation und Querschnittsabstand der bisherigen Zuordnungen wird die Position im nächsten Querschnitt berechnet. Außerdem wird ein Rauschen in Form einer „Beschleunigung“ modelliert, um Ungenauigkeiten zu berücksichtigen. Nach STEFFEN UND BEDER [8] wird eine prognostizierte Position $\hat{\mathbf{x}}_t$ aus bisherigen Zuordnungen bestimmt und mit einer tatsächlich vorgefundenen Position \mathbf{z}_t aktualisiert, indem der Abstand zwischen prognostizierter Position und der tatsächlich vorgefundenen Position mit einer Gewichtung auf die prognostizierte Position aufgetragen wird. Die Gewichtung ergibt sich aus der so genannten Kalman-Gain-Matrix (Gleichung (8)), die abhängig von der Genauigkeit von Messung und Prognose berechnet wird. Das Kalmanfilter wird in der Bildfolgenanalyse eingesetzt, um Objektbewegungen zwischen zwei Bildern zu verfolgen. Analog dazu wird für den Filamentbewegungsansatz das klassische Bewegungsmodell aus der Physik zugrunde gelegt, in dem eine Position im Folgebild über die aktuelle Objektposition und dessen Geschwindigkeit und Beschleunigung bestimmt wird. Die zu schätzenden Größen (Filamentposition und „Geschwindigkeit“) werden im Zustandsvektor bestimmt:

$$\mathbf{x}_t = \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ v_{x;t} \\ v_{y;t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{t-1} + v_{x;t-1}\Delta t + \frac{1}{2}a_x\Delta t^2 \\ y_{t-1} + v_{y;t-1}\Delta t + \frac{1}{2}a_y\Delta t^2 \\ v_{x;t-1} + a_x\Delta t \\ v_{y;t-1} + a_y\Delta t \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{x}_{t-1} + \begin{pmatrix} \frac{1}{2}\Delta t^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\Delta t^2 \\ \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{w}_t$$

mit x_t, y_t Filamentposition im aktuellen Querschnitt,
 $v_{x;t}, v_{y;t}$ aktuelle „Geschwindigkeit“,
 Δt aktueller Querschnittsabstand,
 a_x, a_y „Beschleunigung“ (Messrauschen)

Hierbei sind „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ berechnete Größen aus Filamentbewegungen zwischen den Querschnitten und deren Abstände und dürfen, im Gegensatz zur Bildfolgenanalyse, nicht im physikalischen Sinn als „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ verstanden werden. Die zugehörigen Kovarianzmatrizen für das Messrauschen (Gleichung (2)) und jede geschätzte Größe (Gleichung (3)) lauten:

$$\Sigma_{aa} = \begin{pmatrix} \sigma_{a_x}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{a_y}^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\Sigma_{xx,a} = \begin{pmatrix} \frac{1}{4}\Delta t^4\sigma_{a_x}^2 & 0 & \frac{1}{3}\Delta t^3\sigma_{a_x}^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4}\Delta t^4\sigma_{a_y}^2 & 0 & \frac{1}{3}\Delta t^3\sigma_{a_y}^2 \\ \frac{1}{3}\Delta t^3\sigma_{a_x}^2 & 0 & \Delta t^2\sigma_{a_x}^2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3}\Delta t^3\sigma_{a_y}^2 & 0 & \Delta t^2\sigma_{a_y}^2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Die Vorhersage, an welcher Position das untersuchte Filament im aktuellen Querschnitt liegen wird, wird über

$$\hat{\mathbf{x}}_t^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{t-1} \quad (4)$$

$$\Sigma_{xx,t}^- = \mathbf{A}\Sigma_{xx,t-1}\mathbf{A}^T + \Sigma_{xx,a} \quad (5)$$

berechnet. Im Querschnitt wird die Position jedes Filaments \mathbf{z}_t gemessen und für weitere Berechnungen zu

$$\mathbf{z}_t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t = \mathbf{H}\mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \quad (6)$$

modelliert mit der Kovarianzmatrix Σ_{zz} .

$$\Sigma_{zz} = \begin{pmatrix} \sigma_{z_x}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{z_y}^2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Die vorhergesagte Koordinate $\hat{\mathbf{x}}_t^-$ wird mit der tatsächlich vorgefundenen \mathbf{z}_t verglichen und zu

$$\mathbf{K}_t = \Sigma_{xx,t}^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \Sigma_{xx,t}^- \mathbf{H}^T + \Sigma_{zz})^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \hat{\mathbf{x}}_t^- + \mathbf{K}_t (\mathbf{z}_t - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_t^-) \quad (9)$$

$$\Sigma_{xx,t} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t \mathbf{H}) \Sigma_{xx,t}^-$$

aktualisiert.

Diese Schritte werden für jede Faser in jedem Querschnitt durchgeführt. Bild 9 zeigt die prognostizierten und die tatsächlich vorgefundenen Filamentpositionen. Hierbei ist zu beobachten, dass die Prognose im rechten Bildteil gut mit den vorgefundenen Filamenten übereinstimmen, nach links aber eine affine Verschiebung zu beobachten ist. Auf die prognostizierten Filamentpositionen wurde ebenfalls das ICP-Verfahren angewendet, um eine Zuordnung zwischen dem zweiten und dritten Querschnitt zu bestimmen. Hierfür genügt eine Iteration, da die affine Verschiebung durch wenige manuelle Zuordnungen bestimmt werden kann. Von den 1578 zugeordneten Filamenten aus der ersten Zuordnung konnten bei der zweiten Zuordnung 1550 Filamente weiter zugeordnet werden, wobei im Querschnitt 3 1612 Filamente detektiert wurden.

Eine räumliche Visualisierung der Garnstruktur über mehrere Querschnitte als Ergebnis der Zuordnungen wurde noch nicht realisiert.

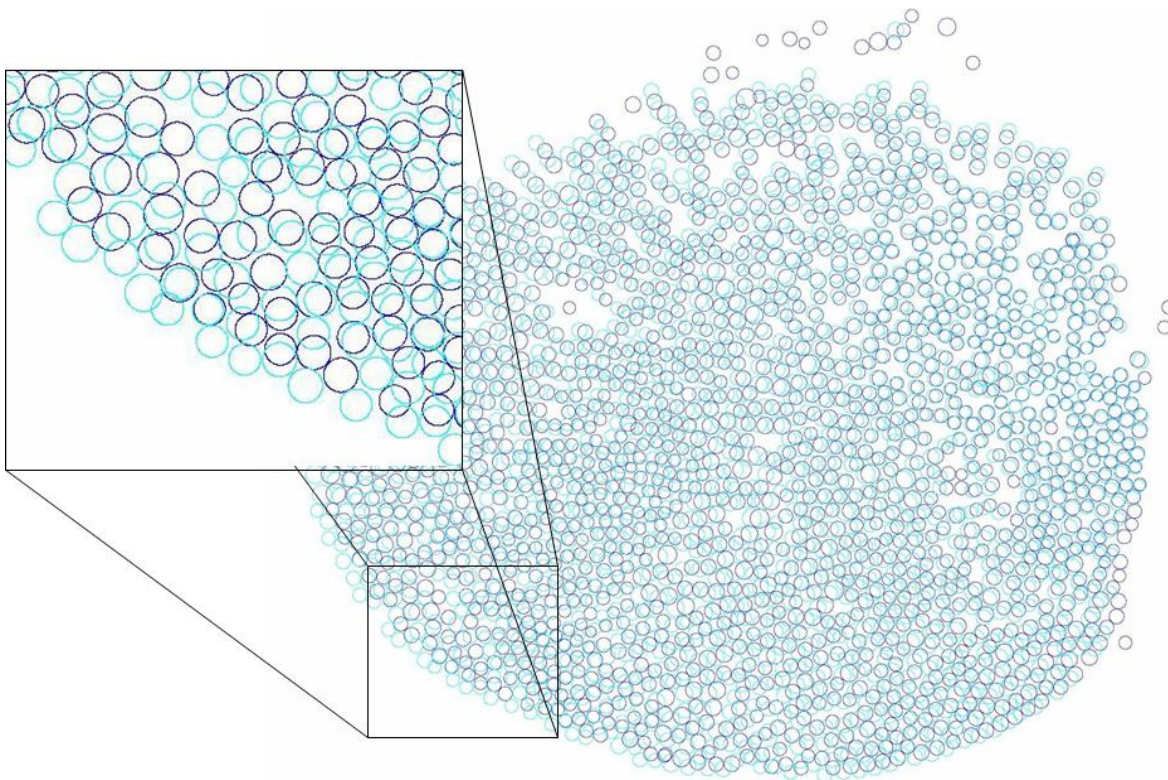


Bild 9: Helle Kreise: Prognostizierte Filamentposition durch Richtungsinformation, dunkle Kreise: Filamentpositionen im Querschnitt

Fig. 9: Bright circles: predicted filament positions by trend information, dark circles: filament positions in cross section

5 Ausblick

Das Tragverhalten textiler Bewehrung im Beton wird maßgeblich durch das Penetrationsverhalten der Betonmatrix in die stark heterogene Garnstruktur beeinflusst. Es wurden Ansätze zur quantitativen räumlichen Charakterisierung des Verbundzustands einzelner Filamente in der Mikrostruktur vorgestellt.

Bei der Filamentdetektion im Querschnitt treten in der Bildanalyse vereinzelt Fehler auf. Filamente werden entweder nicht erkannt oder andere Elemente werden fälschlicherweise als Filament detektiert. Bisher gehen daher nur im Querschnitt detektierte Filamente in die Zuordnung ein, so dass eine unterschiedliche Anzahl von Filamenten einander zugeordnet wird. Hierdurch entsteht schon a priori eine Inkonsistenz, die zu einer Fehlerakkumulation führt. Um diese Fehlerakkumulation zu vermeiden, sollen die falsch detektierten Filamente manuell korrigiert werden.

Des Weiteren müssen die Ergebnisse visualisiert werden, um eine Verifizierung der Filamentzuordnung vornehmen und eventuelle Fehler aufdecken zu können.

Letztendlich muss für eine gesicherte statistische Beschreibung des Verbundzustands eine repräsentative Menge an Querschnitten betrachtet werden. Zudem müssen unterschiedliche Garnformen, welche sich aus dem textilen Herstellungsprozess ergeben, untersucht werden. Diese Informationen dienen dann als Grundlage zur Formulierung eines stochastischen Modells, welches zur Generierung von statistisch äquivalenten Verbundstrukturen dient (für Parameterstudien ohne zusätzlichen experimentellen Aufwand), die für eine adäquate Simulation der Lastabtragung zwischen textiler Bewehrung und Betonmatrix notwendig sind.

6 Literatur

- [1] BANHOLZER, B.: *Bond Behaviour of a Multi-Filament Yarn Embedded in a Cementitious Matrix*. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (2004), No. 12, Dissertation.
- [2] KONRAD, M.; CHUDOBA, R.; KANG, B.-G.: Numerical and Experimental Evaluation of Damage Parameters for Textile Reinforced Concrete Under Cyclic Loading. Berlin: Springer, 2006. - In: *III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, Lisbon, 5-8 June 2006*, (MOTA SOARES, C.A.; MARTINS, J.A.; RODRIGUES, H.C.; et al (Eds.)).
- [3] SCHORN, H.: An adhesive cross-linkage model for textile reinforcement in concrete. In: *Proceedings of the Second International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation SEMC, Cape Town, July 2004*, S. 1563-1567 (CD-ROM), ZINGONI, A. (ed.):.
- [4] KANG, B.-G.; LANGE, J.; BENNING, W.; BRAMESHUBER, W.: Statistical evaluation of the microstructure of a multi-filament yarn embedded in concrete. *CCC 2008 Challenges for Civil Construction, Porto, 16-18 April 2008*, (TORRES MAARQUES et al. (Eds.)).
- [5] BESL, P.J.; MCKAY, N. D.: A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2): S. 239-256.
- [6] LANGE, J.: *Zum Thema Riss- und Faserdetektion in Betonbauteilen*. Dissertation am Geodätischen Institut der RWTH Aachen in Vorbereitung, Nr. 64, 2009.
- [7] BROCKMANN, T.: Anforderungen und Eigenschaften zementgebundener Feinbetone (Properties of cement based fine-concrete). Aachen: Lehrstuhl und Institut für Massivbau, 2001.- In: *Textilbeton. 1. Fachkolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 und 532, 15. und 16. Februar 2001 in Aachen* (HEGGER, J. (Hrsg.)), pp. 82-98.
- [8] STEFFEN, R.; BEDER, C.: Recursive Estimation with Implicit Constraints, *LNCS Proceedings of the DAGM 2007*, F.A. HAMPRECHT UND C. SCHNÖRR UND B. JÄHNE, Volume 4713, S. 194-203.