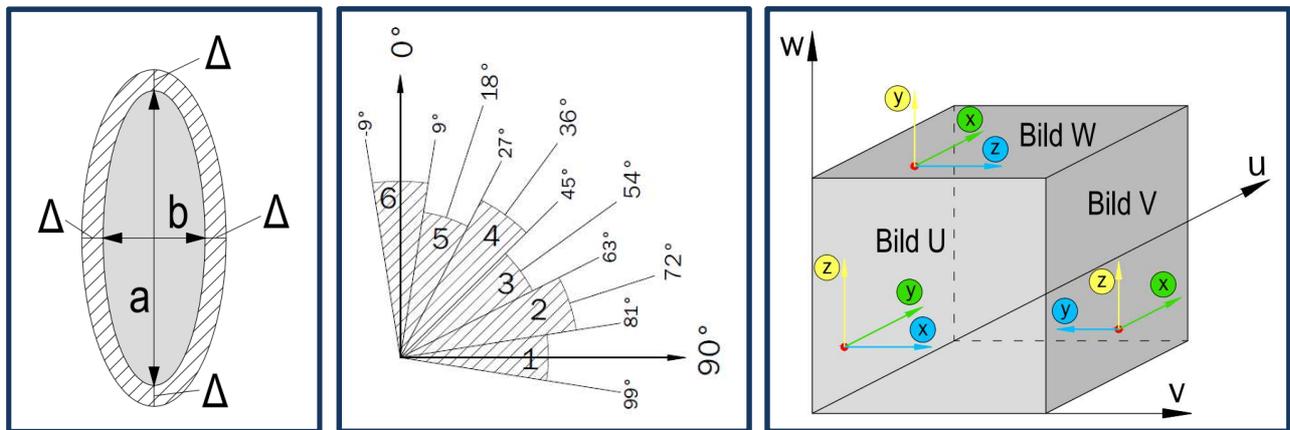


Experimentelle Analyse von Faserorientierungszuständen mittels räumlich kombinierter Schnittbildauswertung



Masterarbeit an der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften,
Technische Universität Graz

Michael Trummer BSc

März 2013

Eingereicht am Institut für Betonbau an der Universität Graz,

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Viet Tue Nguyen

Betreuer:

DI Dr. Bernhard Freytag und DI Günter Heinzle

Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI)

Institut für Betonbau (IBB)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere, als angegebene Quellen, nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich diese Arbeit bisher weder im In- noch im Ausland einem Beurteiler oder einer Beurteilerin in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz am 13.03.2013

Unterschrift

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Erstellung meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich beim Leiter des Labors für konstruktiven Ingenieurbau, Herrn DI Dr. techn. Bernhard Freytag, sowie dem wissenschaftlichen Assistenten, Herrn DI Günter Heinzle für die Betreuung bei dieser Diplomarbeit bedanken.

Ebenfalls möchte ich meinen Freunden, Herrn DI Dieter Ladenhauf und Herrn Michael Fuchs für ihre Unterstützung danken.

Großer Dank gebührt meiner Familie, die mich in meiner Ausbildungszeit unterstützt, und somit das Studium ermöglicht hat. Vor allem meiner Mutter, meinen Großeltern, meinem Onkel Rudi und meinen Geschwistern.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Ziel der Arbeit	8
3	Ultra-hochfester Faserbeton (UHPC)	9
3.1	Der Baustoff.....	9
3.2	Fasern im UHPC.....	9
3.2.1	Stahlfasern	9
3.2.2	Synthetische Fasern	10
3.3	Verteilung und Orientierung der Fasern	12
4	Theoretische Grundlagen zum Faserorientierungsbeiwert η und dessen Bestimmung mittels Schnittbildauswertung.	14
4.1	Zweck des Faserorientierungsbeiwertes	14
4.1.1	Definitionen des Faserorientierungsbeiwertes η	15
4.2	Bestimmung des durchschnittlichen Faserorientierungsbeiwertes mittels Auswertung einer Einzelschnittfläche.	15
4.2.1	Allgemeines	15
4.2.2	Faserorientierungsbeiwert.....	15
4.2.3	Herleitung der Faserorientierung (eine Schnittfläche).....	16
4.2.4	Mit der Betrachtung einer Einzelschnittfläche verbundene Probleme	18
4.3	Bestimmung des durchschnittlichen Faserorientierungsbeiwertes mittels Betrachtung dreier orthogonaler Schnittflächen.....	19
4.3.1	Voraussetzungen/Annahmen	19
4.3.2	Drei aufeinander orthogonale Schnittflächen.....	20
4.3.3	Faserauswahl in Matlab	21
5	Das Drei-Bild-Auswerteverfahren	25
5.1	Auswertalgorithmus für das fotooptische Analyseverfahren.....	25
5.1.1	Sägen	25
5.1.2	Planschliff	25
5.1.3	Polieren per Hand	27
5.2	Erzeugen der Schnittflächenaufnahmen.....	28
5.3	Foto Set up	29
5.3.1	Kamera und Objektiv	30
5.3.2	Fotobearbeitung.....	31
5.4	Bildauswertung mittels Matlab-Software.....	32
5.4.1	Auswertung im vorhandenen Skript.....	32
5.4.2	Drei-Bild-Auswertung	33
5.5	Genauigkeit des Verfahrens.....	33
5.5.1	Einfluss des Korrekturfaktors	33
6	Test des Drei-Bild-Auswerteverfahrens	37
6.1	Bearbeiten der Proben.....	39
6.2	Bestimmung der Faseranzahl und folglich der Faserorientierung durch Zählen.....	40
6.2.1	Abzählen der Fasern am geschnittenen Probekörper.....	40
6.2.2	Bestimmen der Faseranzahl im Volumen anhand einer Handrechnung	41
6.2.3	Bestimmung der Faserorientierung aus dem Ergebnis der Zählung	42
6.3	Bestimmung der Faserorientierung mittels Drei-Bild-Auswertung	44
6.3.1	Faserauswahl	44
6.3.2	Orientierungen bei der Drei-Bild-Auswertung	44
6.3.3	Referenzprobekörper	45
6.3.4	Schwankungen in den Schnittflächen.....	45
6.3.5	Lage der Bilder am Referenzprobekörper	46

6.3.6	Referenzprobeauswertung (2 % Fasergehalt).....	46
6.3.7	Referenzprobekörperauswertung (1,5 % Fasergehalt).....	53
6.4	Vergleich der Ergebnisse.....	57
7	Anwendung des Verfahrens der Drei-Bild-Auswertung	59
7.1	Probekörperbezeichnung.....	59
7.2	Untersuchte Probekörper.....	59
7.3	Probekörperbeschreibung.....	60
7.4	Probe FS_C03_2.0_10_03.....	61
7.5	Probekörper FS_C03_2.0_20_01/03.....	63
7.6	Probekörper FS_C03_3.0_5.0_01, FS_C03_1.0_5.0_01, FS_C03_1.0_5.0_01 und FS_C03_2.0_5.0_02/03.....	65
7.7	Probekörper FS_C03_2.0_6.0_02/03/05/08/09/10.....	70
7.8	Probekörper FS_C03_2.0_2.5_01 und FS_C03_3.0_2.5_06.....	77
7.9	Probekörper FS_D_2.0_5.0_01/02/03/04/05/06.....	80
8	Orientierungshäufigkeitsverteilung der Fasern	87
8.1	Klasseneinteilung.....	87
8.1.1	Teilung der Kugel zwischen Nordpol und Äquator in Schichten.....	88
8.1.2	Berechnen der Mantelfläche der Kugelschichten.....	89
8.1.3	Berechnung der Klassenanzahl in jeder Kugelschicht.....	90
8.1.4	Berechnen von $\Delta \alpha$ für jede Kugelscheibe.....	91
8.1.5	Klassenberechnung.....	91
8.2	Auswertung.....	92
8.2.1	Referenzprobekörper(2% Faseranteil).....	93
8.2.2	Ceracemproben.....	97
8.2.3	Ductalproben.....	105
9	Gesammelte Ergebnisse	108
10	Zusammenfassung	110
	Abbildungsverzeichnis	113
	Tabellenverzeichnis	117
	Anhang: Matlab Skript Erweiterungen	119

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Verbesserung der Bestimmung der Faserorientierung in Probekörpern aus stahlfaserbewehrtem ultrahochfesten Beton. Das Verfahren der Faserorientierungsbestimmung wird darin von der Faserorientierungsberechnung an einer Probenfläche auf die verbesserte an drei orthogonalen Schnittflächen durchgeführte (Drei-Bild-Auswertung) adaptiert. Dabei werden zuerst aus Biegezugträgern verschiedener Stärke Probekörper entnommen, deren Oberflächen anschließend durch Schleifen und Polieren bearbeitet werden, um die an den Probenflächen entstehenden Aufweitungen und Verschmierungen der Faserellipsen und Kreise, welche durch das Schneiden entstehen, zu minimieren. Diese bearbeiteten Probekörperflächen werden mit einer hochauflösenden Kamera fotografiert und von einem Bilderkennungsprogramm eingelesen. Diese Daten werden im programmierten Algorithmus zur Berechnung der Faserorientierungen an einer Schnittfläche verwendet. Mit den Ergebnissen dreier aufeinander orthogonal liegender Schnittflächen eines Probekörpers werden im nächsten Schritt werden die drei Faserorientierungsbeiwerte berechnet. Auf diese Weise wurden im Labor für konstruktiven Ingenieurbau der TU Graz 23 Probekörper untersucht. Um detailliertere Informationen zum gesamten Orientierungszustand der Fasern in den Probekörpern zu bekommen wurden Orientierungshäufigkeitsverteilungen erzeugt. Bei der Annahme bestimmter Kriterien können die Orientierungen aller Fasern einer Schnittfläche an der Oberfläche einer Viertelkugel dargestellt werden. Die Oberfläche der Viertelkugel wurde in gleich große Flächenstücke (Klassen) aufgeteilt mithilfe dieser die Verteilung der Ausrichtung der Fasern in Form von Verteilungsflächen dargestellt wurde.

Abstract

The following thesis deals with the improvement of the determination of fibre orientation in test specimens made of steel fibre reinforced, ultra high strength concrete. The procedure of determining the fibre orientation is thereby adapted from the fibre orientation calculation on a single cut surface of a specimen area to an improved one which has been realized on three orthogonal cut surfaces (three-surface-evaluation). At first, the test specimens are extracted from flexural tension specimens of different strengths, whereby their surfaces are subsequently finished by grinding and polishing, in order to minimize the widenings and smearings of the fibre ellipse and circles, which are caused by the cutting, that occur on the specimen surfaces. These prepared test specimen surfaces are photographed with a high-resolution camera and are read in by an image recognition program. Afterwards, these data are used in the developed algorithm for the calculation of the fibre orientation on the cut surfaces. In the next step, the total fibre orientationcoefficient of a test specimen are calculated with the results of the three orthogonal cut surfaces. In this way, 23 test specimens were evaluated in the Laboratory for structural Engineering at Graz University of Technology. In order to gather more information of the entire orientation state of fibres in the test specimen, orientation frequency distributions were generated. By means of an assumption of certain criteria, the orientations of all the fibres of a cut surface can be shown on the surface area of a quarter sphere. This surface area of the quarter sphere was divided into parts of equal size (classes). The distribution of the orientation of the fibres was finally illustrated in terms of 3D-frequency distribution plots.

1 Einleitung

Diese Masterarbeit wurde im Rahmen des Projektes „Zerstörungsfreien Bestimmung der richtungsabhängigen Zugtrageigenschaften von stahlfaserbewehrten Bauteilen aus UHPC“ (FibreScan) geschrieben. Dieses Projekt ist ein Forschungsprojekt, welches vom Labor für konstruktiven Ingenieurbau abgewickelt wurde. Der mineralische Baustoff UHPC bildet den Grundstein, auf dem das Projekt aufgebaut ist. Da die Korngrößenverteilung bis in den Nanobereich reicht, besitzt dieser Baustoff eine sehr hohe Packungsdichte. Als Folge der hohen Packungsdichte erreicht er eine ausgezeichnete Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit. Die Resistenz gegen mechanische und chemische Angriffe kann mit der von Granit verglichen werden. Zugfestigkeit wird bei UHPC-Bauteilen durch Zugabe von Stahlfasern erreicht. Um aber die Zugtragfähigkeit von UHPC-Bauteilen zu gewährleisten, müssen Faseranteil und Orientierung in diesen bekannt sein. Da aber aufgrund Korn- und Fasergeometrie sowie den rheologischen Eigenschaften während der Herstellung eine große Rolle bei der Ausrichtung der Fasern spielen, sind die Zugtrageigenschaften in einem Bauwerk oft sehr unterschiedlich. Um festzustellen, welche Zugkräfte der jeweilige Bauteil aufnimmt, können entweder Probekörper für Zugversuche entnommen werden oder es wird der Fasergehalt sowie Faserorientierung zerstörungsfrei mit Hilfe der magnetischen Induktion bestimmt. Für das FibreScan-Projekt wurden 12 Prismen aus der Fertigteilproduktion des Projektes WILD-Brücke herausgesägt und induktiv wie auch zerstörend (Biegezugprüfung) geprüft. Zusätzlich wurden Prismen mit 70 cm Länge, 15 cm Höhe und unterschiedlichster Stärke mit variierenden Fasergehalten sowie UHPC-Rezepturen (Ductal, Ceracem) hergestellt und einer Biegezugprüfung unterzogen.

Da ein Mangel an Konzepten für eine Qualitätskontrolle von UHPC-Bauteilen herrscht wurde in diesem Projekt eine Zerstörungsfreie Prüfmethode mit einem hohem Vertrauensniveau entwickelt. Ziel ist es, die Lücke dieser in den letzten 10 Jahren entwickelte Bauweise zu schließen. Der Anwendungsbereich dieser zerstörungsfreien Prüfmethode soll unabhängig von der Bauteildicke und Fasergeometrie werden.

Die Fotooptische Methode zur Bestimmung der Faserorientierung wird als Referenzmethode eingesetzt. Durch den Vergleich von Biegezugprüfung und fotooptischer Methode mit der Induktionsmessung soll die Qualität des induktiven Verfahrens beurteilt werden. [6]

2 Ziel der Arbeit

Da die Entwicklung des sich noch nicht so lange am Markt befindlichen UHPC rasch voranschreitet und durch das Beimengen von Stahlfasern auch ohne schlaffe Bewehrung Zugkräfte aufgenommen werden können, soll festgestellt werden, in welche Richtungen die Fasern zeigen, um daraus auf das Potential zur Aufnahme von Zugkräften schließen zu können.

Das primäre Ziel ist es, einen Auswertalgorithmus zu finden, mit dem unter Berücksichtigung aller Fasern im ausgewerteten Volumen die Orientierung derselben in Richtung der Achsen eines dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystems zu bestimmen. Die Theorie dieser Auswertung soll in eine Software implementiert werden, um mit dieser die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Dabei soll die bestehende Auswertung der Software an einer Einzelschnittfläche durch eine „3-Seiten-Schnittbildauswertung“ verbessert werden. Die Theorie zu dieser Auswertung soll erarbeitet, dokumentiert und angewendet werden.

Durch eine bessere Beleuchtung der Schnittflächen sowie einer Korrektur der Faservergrößerung bzw. Faserverkleinerung, welche trotz angepasster Beleuchtung auftritt, ist eine Genauigkeitserhöhung zu erreichen. Zur weiteren Verbesserung der Genauigkeit ist die Bearbeitung der Schnittflächen zu optimieren.

Ein weiterer Schritt ist das Herstellen von Bezugsprobekörpern. Diese sollen als Referenzproben dienen. Genauigkeitsunterschiede zwischen den Bearbeitungsschritten Sägen und Polieren sollen gezeigt werden.

Letztlich soll ein Weg gefunden werden, um die Orientierung der Fasern im Raum anschaulich darstellen und interpretieren zu können. Dabei werden statistische Methoden angewendet.

3 Ultra-hochfester Faserbeton (UHPC)

3.1 Der Baustoff

Der mineralische Baustoff UHPC (Ultra High Performance Concrete) oder UHFB („ultrahochfester“ Beton) zeichnet sich durch eine sehr hohe Druckfestigkeit ($>C100/115$ N/mm²) aus. Weitere Vorteile dieses Baustoffes sind eine hohe Steifigkeit und Dauerhaftigkeit. Diese wird durch eine sehr hohe Packungsdichte erreicht. Dadurch ist ein außergewöhnlich starker Widerstand gegen mechanische wie auch chemische Beanspruchungen gegeben. Mit diesem Baustoff ist es möglich, sehr filigrane Betonkonstruktionen herzustellen. Diese Betone können mit als auch ohne Zugabe von Fasern, als Feinkornbetone (Größtkorn $< 0,1$ mm) und als Grobkornbetone (Größtkorn 8-16 mm) hergestellt werden. Sind diesem Beton Fasern zugesetzt, lautet die Bezeichnung UHPFRC (Ultra High Performance Fibre Reinforcement Concrete). Metall-, Glas-, Kunststoff-, Kohlenstoff-, Zellulose- und Mineralische Fasern werden beim UHPC verwendet. Die Druckfestigkeit dieses Hochleistungsbetons entspricht der fünf- bis sechsfachen eines herkömmlichen Normalbetons. Ein Grund für diese hohe Druckfestigkeit ist der niedrige Wasser-Zementwert (w/z-Wert) der ca. bei 0,2 liegt. Damit besitzt der UHPC schon annähernd die Festigkeit eines Baustahles, obwohl sein spezifisches Gewicht nur ein Drittel davon ist. UHPC ist durch seine selbstverdichtende Eigenschaft im Kaltgussverfahren in nahezu alle Formen zu bringen. [1], [2]

3.2 Fasern im UHPC

Fasern, die für den Einsatz im UHPC verwendet werden, müssen dem alkalischen Milieu im Beton widerstehen. Zusätzlich dürfen die Eigenschaften wie z.B. Homogenität, Kriech- und Schwindverhalten oder Festigkeiten des Betons bei der Herstellung, wie auch nach dem Aushärten, nicht negativ beeinflusst werden. Beim Mischen darf nicht die Gefahr bestehen, dass die Fasern durch zu geringe Biegesteifigkeit oder durch Sprödbrech zerstört werden. Wenn diese Anforderungen alle erfüllt sind, ist die Faser für den Einsatz im UHPC geeignet. Zum Einsatz kommen hauptsächlich hochfeste Stahlfasern, wobei auch eine Vielzahl von organischen und anorganischen Fasern wie Kohlenstofffasern, Glasfasern und Kunststofffasern bereits am Markt sind. [3]

3.2.1 Stahlfasern

Übliche Stahlfasern bestehen aus hochfestem Stahl mit einer Zugfestigkeit von 1000-2600 N/mm². Der Durchmesser der Fasern beläuft sich auf 0,1 bis 0,3 mm bei einer Länge zwischen 6 und 20 mm. Der Fasergehalt im UHPC schwankt zwischen 0,8 und 3%. Es gibt aber einige Sonderfälle, wo der Gehalt noch höher liegt (vor dem Betonieren eingelegte Fasermatten). Der Faseranteil wird nach statischen Kriterien wie Höhe der Zug-, bzw. Biegezugbeanspruchung, Verarbeitbarkeit und Mischbarkeit gewählt. [3]



Abbildung 1: hochfeste Stahlfasern

3.2.2 Synthetische Fasern

Es werden diese in zwei Gruppen unterteilt:

- Organische Fasern
- Anorganische Fasern

Organische Fasern:

Organische Fasern werden aus natürlichen Rohstoffen hergestellt. Beispiele hierfür sind Kohlenstoff-, oder Zellulosefasern. [2]

Anorganische Fasern:

Anorganische Fasern werden aus Stoffen hergestellt, die nicht biologischer Herkunft sind. Beispiele dafür sind Basalt- oder Glasfasern. [2]

Es hat sich bis heute eine Vielzahl an Fasern gefunden, die für den Einsatz im UHPC geeignet sind. Nachfolgend werden einige synthetische Fasern näher beschrieben:

Alkaliresistente Glasfasern

Damit dieses Glas eine Beständigkeit gegen alkalische Umgebung bekommt, wird es mit Zirkonium angereichert. Bei der Herstellung der AR-Glasfasern werden zuerst endlose 0,01-0,02 mm starke Einzelfäden (Filamente) mittels Düsenziehverfahren erzeugt. Die Glasschmelze wird dabei durch Spinn Düsen ausgezogen. Diese Einzelfäden werden nach dem Abkühlen zu Strands zusammengeführt und in 6-25 mm Länge geschnitten. Vorteile der Glasfasern sind Unbrennbarkeit, eine sehr hohe Zugfestigkeit (2000-3700 N/mm²) und dass keine schädlichen Gase bei hoher Temperatur freigesetzt werden. Ein großer Nachteil dieser Fasern ist die Kerb- und Ritzempfindlichkeit. Viele der Fasern werden bereits beim Mischvorgang beschädigt was zur Folge hat, dass von keiner konstanten Betonqualität ausgegangen werden kann. Da der Verbund mit dem umliegenden Beton sehr stark ist, besteht zusätzlich die Gefahr des plötzlichen Bauteilversagens. [2]

Kunststofffasern

Kunststofffasern werden durch Herausstanzen aus Folien oder im Spinnverfahren hergestellt. Werden Fasern als Brandschutzmaßnahme eingesetzt, sind sie meist aus Polypropylen. Polypropylen besitzt einen E-Modul von 7500-18000 N/mm² und wird für den Brandschutz in Gehalten von 0,3-0,6 % beigemischt. Die Zugfestigkeiten liegen zwischen 400 und 750 N/mm² und die Durchmesser betragen 0,1 mm bis 6,6 mm. Eine besondere Art der Kunststofffasern stellen die Aramidfasern dar. Diese Hochleistungsfasern erreichen durch den Einbau von aromatischen Strukturen in den Polyamidketten eine Zugfestigkeit von bis zu 3700 N/mm². Weitere eingesetzte Fasern sind Polyacrylnitrilfasern, Polyvinylalkoholfasern und Polyethylenfasern. [2], [3], [5]

Kohlenstofffasern

Kohlenstofffasern erreichen eine unglaublich hohe Zugfestigkeit die von etwa 2000 N/mm² bis hin zu 6000N/mm² reicht. Hergestellt werden sie durch Karbonatisierung und Graphitierung. Die Fasern besitzen eine geringe Quersugfestigkeit wodurch sie beim Einmischen leicht brechen. Der typische Faserdurchmesser liegt in einem Bereich von 0,05 mm bis 0,10 mm und die typischen Faserlängen liegen zwischen 6 und 24 mm. [2], [3]

Mineralische Fasern

Aus einer Basaltschmelze hergestellte Basaltfasern werden neuerdings ebenfalls für UHPC eingesetzt. Mit einem Durchmesser von 0,1 - 0,2 mm und einer Länge > 50 mm wird eine Zugfestigkeit von bis zu 4840 N/mm² erreicht. Die Durchmesser der Fasern können mittels entsprechenden Ziehwerkzeugen verändert werden. Da sich die Einzelfasern nicht für den Einsatz eignen, werden derzeit Faserbündel zu ca. 200 Einzelfäden eingesetzt. Die Einzelfasern werden dafür mittels eines Klebers (Epoxidharz, flüssiges Polypropylen oder Kleber auf Elastomerbasis) zu Rovings zusammengeführt und zu kürzeren Fasern verarbeitet. [3], [6]

3.3 Verteilung und Orientierung der Fasern

Die Verteilung der Fasern gibt über die Lage der einzelnen Fasern im Volumen Auskunft. Sind die Fasern gleichmäßig im Körper verteilt, nennt man ihn homogen. Die Orientierung beschreibt die Richtung in der die Längsachse einer Faser zeigt. Sind die Faserlängsachsen in einem Körper gleichmäßig in alle möglichen Richtungen verteilt nennt man ihn isotrop. Betrachtet man ein kleines Volumen bestehend aus UHPC, zeigen die darin enthaltenen Fasern annähernd gleichmäßig im Körper verteilt in alle Richtungen. Ausnahmen sind durch einige Einflussfaktoren, die nachfolgend beschrieben sind, welche die Faserorientierung beeinflussen, gegeben.

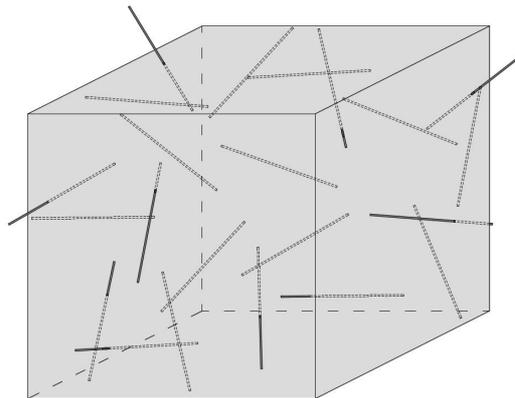


Abbildung 2: Fasern im Teilvolumen

Es ist möglich, die Orientierung der Fasern durch die Schnittflächen, welche für die Auswertung nachbearbeitet werden müssen, zu bestimmen. Die Auswertung der Faserorientierungen erfolgt entweder nur an einer Schnittfläche oder mit höherer Genauigkeit, wie in dieser Arbeit nachfolgend beschrieben und an Probekörpern ausgewertet, an drei aufeinander orthogonalen Schnittflächen.

Einflussfaktoren der Faserausrichtung:

Die Ausrichtung der Fasern wird durch Fasergehalt, Faserlänge, Größtkorn, Mischvorgang, Oberflächen, Schalwände, Betoneinbringung, Verdichtung usw. beeinflusst:

Je länger Fasern sind desto stärker richten sie sich beim Betoniervorgang in Fließrichtung des Betons aus und desto größer ist der Faserorientierungsbeiwert in diese Richtung.

Bei höherem Fasergehalt beeinflussen sich die Fasern in ihrer Orientierung gegenseitig.

Bei selbstverdichtendem Beton besteht die Gefahr des Absetzens der Fasern.

Im Bereich von Schalwänden ist der sogenannte „Wandeffekt“ (zweidimensionales Orientieren der Fasern entlang der Schalwände in einem Abstand von der halben Faserlänge) zu beobachten.

Beim Betonieren tritt eine Ausrichtung der Fasern in Fließrichtung des Betons auf.

Wird beim Betonieren der Beton von zwei Seiten gleichzeitig eingebracht, kann sich an der Stelle, wo sich der Beton der beiden Einbringungsstellen trifft, eine so genannte „Naht“ ausbilden. An dieser Naht tritt häufig eine Störung der Faserorientierung auf.

Aufgrund der Vibrationen bei der Verdichtung des Betons richten sich die Fasern senkrecht zur Vibrationsrichtung aus. Bei größerem Fasergehalt nimmt der Einfluss der Verdichtung ab.

Bei dem Mischvorgang besteht die Gefahr der Inhomogenität durch Igelbildungen (örtliche Faseransammlungen) oder Materialpakete (durch den Propeller im Rührkessel entstehen zweidimensional angeordnete Faseransammlungen).

Weiters stellt die Gesteinskörnung eine Beeinflussung der Faserausrichtung dar. Da im UHPC die Gesteinskörnung meist sehr klein ist, ist dies kein Problem. Hier behindern sich ausschließlich die Stahlfasern untereinander in ihrer Ausrichtung. [2]

4 Theoretische Grundlagen zum Faserorientierungsbeiwert η und dessen Bestimmung mittels Schnittbildauswertung.

4.1 Zweck des Faserorientierungsbeiwertes

Neben Festigkeit, Steifigkeit, Verbundverhalten und Fasermenge sind die mechanischen Eigenschaften des Faserbetons wesentlich von der Orientierung und Verteilung der Fasern abhängig.

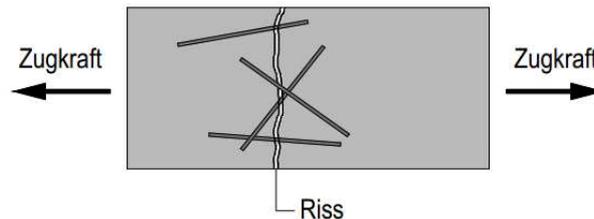


Abbildung 3: Rissüberbrückung durch Stahlfasern

Die Zugfestigkeit hängt von Faserlänge, Faserdurchmesser, Verbundfestigkeit der Faser sowie der Anzahl der Fasern, die den Riss kreuzen, ab. Anhand der Nachrisszugfestigkeit von UHPFRC-Bauteilen ist die Wichtigkeit des Faserorientierungsfaktors aufgezeigt.

Die Nachrisszugfestigkeit wird folgendermaßen berechnet:

$$f_{ct} = \frac{l_f}{d_f} * g * \tau_f * \eta * \rho \quad (4.1)$$

f_{ct} = Nachrisszugfestigkeit

ρ = Fasergehalt

η = Faserorientierungsbeiwert

g = Faserwirksamkeit

τ_f = Verbundfestigkeit der Faser

l_f = Faserlänge

d_f = Faserdurchmesser

Anhand der Gleichung (4.1) ist ersichtlich, dass der Faserorientierungsfaktor für die Berechnung der Nachrissfestigkeit notwendig ist. Sind alle Stahlfasern in Richtung der angreifenden Zugkraft ausgerichtet, kann die größte Zugkraft übertragen werden. Sind hingegen alle Fasern normal auf die angreifende Zugkraft ausgerichtet, kann keine Zugkraft übertragen werden. [7]

4.1.1 Definitionen des Faserorientierungsbeiwertes η

Die Faserorientierungsfaktor η wurde von Schönlin(1988) als Mittelwert des Richtungskosinus in Beanspruchungsrichtung aller Fasern im betrachteten Querschnitt definiert. [8]

Herr Lin beschrieb die Faserorientierung η als Mittelwert des Verhältnisses aller in Richtung der Zugspannung projizierten Faserlängen zur wahren Faserlänge. [9]

Eine weitere Definition des Faserorientierungsbeiwertes lautet wie folgt: „Der Faserorientierungsbeiwert η_φ ist der Mittelwert des Verhältnisses aller in Richtung der Zugspannung projizierten Faserlängen zu der tatsächlichen Faserlänge“ [2]

Durch das Dividieren der Länge der in die Betrachtungsrichtung (meist dieselbe Richtung wie die Krafrichtung) projizierten Faser durch deren Länge erhält man den Orientierungsbeiwert einer Faser.

4.2 Bestimmung des durchschnittlichen Faserorientierungsbeiwertes mittels Auswertung einer Einzelschnittfläche.

4.2.1 Allgemeines

Zum Bestimmen der Orientierung einer Einzelfaser ist das zweidimensionale Schnittbild ausreichend. An diesem bilden sich die Fasern als Ellipsen ab. Anhand der Halbmesser der Faserschnittellipsen, sind die Neigungen der jeweiligen Fasern zur Schnittebene bestimmt [14]

4.2.2 Faserorientierungsbeiwert

Bei der Betrachtung einer Einzelfaser wird der Faserorientierungsbeiwert durch Division der Länge in der Bezugsrichtung (projizierte Länge) durch deren wahre Länge (Faserlänge) errechnet.

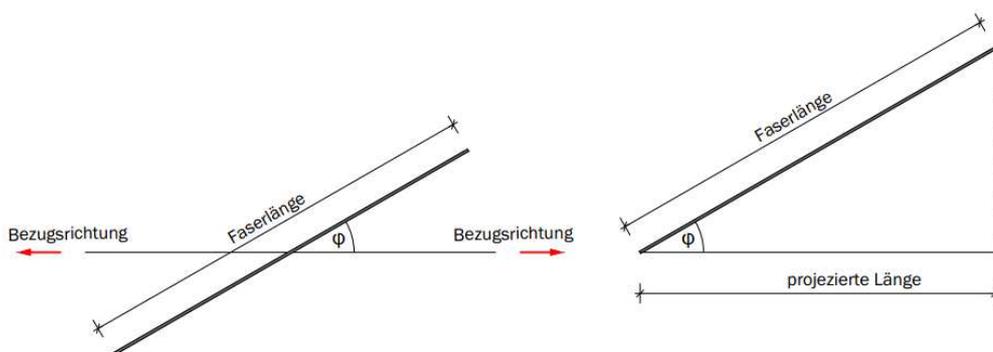


Abbildung 4: Bezugs- und Faserrichtung mit deren eingeschlossenem Winkel [2]

$$\eta_{\varphi, i} = \cos \varphi_i \quad (4.2)$$

Der Faserorientierungsbeiwert eines Körpers ist als der Mittelwert des Verhältnisses aller projizierten Faserlängen in Zugspannungsrichtung zu der wahren Faserlänge definiert. Erstmals wurde die Ermittlung des Faserorientierungsbeiwertes aus einer Schnittfläche durch Klaus Schönlin hergeleitet. Dabei wurden aber nur die Fasern, welche an der Schnittfläche zu sehen sind (m) berücksichtigt und nicht jene im Volumen (n). [8], [14]

Faserorientierungsbeiwert für einen Körper mit m geschnittenen Fasern:

$$\eta_{\varphi} = \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m \frac{\text{in Bezugsrichtung projizierte Faserlänge}}{\text{tatsächliche Faserlänge}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \cos \varphi_i \quad (4.3)$$

φ_i = Entspricht dem Winkel der Faser zur Bezugsrichtung

m = Faseranzahl in der betrachteten Schnittfläche

Wenn alle Fasern in dieselbe Richtung orientiert sind beträgt der Faserorientierungsbeiwert $\eta_{\varphi} = 1$.

4.2.3 Herleitung der Faserorientierung (eine Schnittfläche)

Beim Bestimmen der allgemeinen Lage der Fasern im Beton (Raum) stellt sich das Problem, dass die Anzahl der geschnittenen Fasern einer frei gewählten Probenschnittfläche nicht mit der Faseranzahl des gesamten Probekörpers übereinstimmen. Deshalb ist es wichtig einen Zusammenhang zwischen Anzahl der Fasern im gesamten Volumen der Probe und derer, welche geschnitten an der Probenschnittfläche sichtbar sind, herzustellen. Wird das nicht gemacht ergeben sich nach der Formel von Schönlin zu hohe Orientierungsbeiwerte. [8]

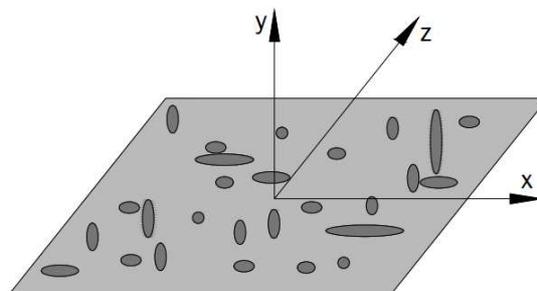


Abbildung 5: Infinitesimal dünne Scheibe

Man betrachtet nun einen infinitesimal dünn herausgeschnittenen Körper bei dem beidseitig dasselbe Faserbild auftritt. Bei dieser Darstellung entspricht das Volumen des Faseranteils in % gleich dem Flächenanteil der Fasern in % (dunkelgraue Ellipsen bei der Abbildung 5).

$$\rho_f = \frac{V_{f,ges}}{V_{ges}} = \frac{A_{f,ges}}{A_{ges}} \quad (4.4)$$

ρ_f = Fasergehalt

$V_{f,ges}$ = Faservolumen im betrachteten Körper

V_{ges} = Volumen des betrachteten Körpers

$A_{f,ges}$ = Faserschnittfläche aller Fasern

A_{ges} = Fläche der Schnittfläche

Die **Faserfläche** erhält man aus der Summe der Ellipsenflächen:

$$A_{f,ges} = \sum_{i=1}^m \frac{d_f^2 \pi}{4} * \cos \varphi_i = \frac{d_f^2 \pi}{4} * \sum_{i=1}^m \frac{1}{\eta_{\varphi,i}} \quad (4.5)$$

d_f = Faserdurchmesser

m = Anzahl der geschnittenen Fasern

$\eta_{\varphi,i} = \cos \varphi_i$ = Faserorientierungsbeiwert einer Faser

φ = Winkel zwischen Faser und der Normalen zur Schnittfläche

Der **Fasergehalt** ergibt sich durch das Einsetzen von $A_{f,ges}$ in die Formel (4.5):

$$\rho_f = \frac{d_f^2 * \pi}{4 * A_{ges}} * \sum_{i=1}^m \frac{1}{\eta_{\varphi,i}} \quad (4.6)$$

Durch Einsetzen von ρ_f (4.6) in Gleichung (4.4) und Umformen ergibt sich das **Faservolumen**:

$$V_{f,ges} = \frac{d_f^2 * \pi * V_{ges}}{4 * A_{ges}} * \sum_{i=1}^m \frac{1}{\eta_{\varphi,i}} \quad (4.7)$$

Die **Faseranzahl n** des dabei betrachteten Volumens entspricht:

$$n = \frac{V_{f,ges}}{V_f} \quad (4.8)$$

V_f = Volumen der Einzelfaser

Das Faservolumen (4.7) in Gleichung (4.8) eingesetzt ergibt dann die Faseranzahl.

$$n = \frac{\frac{d_f^2 * \pi * V_{ges}}{4 * A_{ges}} * \sum_{i=1}^m \frac{1}{\eta_{\varphi,i}}}{\frac{d_f^2 * \pi * l_f}{4}} = \frac{1}{l_f} * \frac{V_{ges}}{A_{ges}} * \sum_{i=1}^m \frac{1}{\eta_{\varphi,i}} \quad (4.9)$$

l_f = Faserlänge

Beim Betrachten eines fiktiven Körpers mit dem Volumen eines Prismas der Höhe, welche der Länge der Fasern entspricht, ist ersichtlich, dass bei einem Schnittbild nicht alle Fasern, die im Volumen vorkommen, geschnitten werden. Die tatsächliche Anzahl lässt sich aber durch den Winkel φ ermitteln. Je stärker eine Faser geneigt ist,

desto kleiner ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Faser geschnitten wird. Durch Division jeder Faser mit dem Cosinus des Winkels (φ) der jeweiligen Faser rechnet man die geringere Anzahl der flacheren Fasern auf die tatsächliche im Volumen vorhandene um.

$$n = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\cos \varphi_i} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\eta_{\varphi, i}} \quad (4.10)$$

Jeder Term der Summe $i = 1$ bis m muss somit mit dem Faktor $\frac{1}{\cos \varphi_i}$ multipliziert werden, um die Summe aller geschnittenen Fasern des Volumens zu erhalten. Die Faserorientierung ergibt sich dann folgendermaßen:

$$\eta_y = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \cos \varphi_{y, i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{\cos \varphi_{y, i}}} * \sum_{i=1}^n \cos \varphi_{y, i} = \frac{m}{n} = \frac{m}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{\eta_{y, i}}} \quad (4.11)$$

Wobei:

m = Anzahl der geschnittenen Fasern

n = Faseranzahl im betrachteten Volumen

y = Achse normal auf die Schnittebene

$\eta_{x, i}$ und $\eta_{z, i}$ können nach Gleichung (4.12) berechnet werden (Abbildung 6).

$$\begin{aligned} \eta_{x, i} &= \sin \varphi_{, i} * \cos \alpha_{, i} \\ \eta_{z, i} &= \sin \varphi_{, i} * \sin \alpha_{, i} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$\eta_{x, i}$ Projektion einer Faser auf die x-Achse

$\eta_{z, i}$ Projektion einer Faser auf die Z-Achse

$$\eta_x = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \sin \varphi_{, i} * \cos \alpha_{, i} \quad (4.13)$$

$$\eta_z = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \sin \varphi_{, i} * \sin \alpha_{, i} \quad (4.14)$$

4.2.4 Mit der Betrachtung einer Einzelschnittfläche verbundene Probleme

Für die Betrachtung der Lage der Fasern stellt man sich diese als Linien vor. Bei dieser Betrachtung ist die Wahrscheinlichkeit, dass Fasern parallel zur Schnittfläche ($\varphi_i = 90^\circ$) geschnitten werden gleich Null. Da Fasern in Wirklichkeit keine Linien sind und somit einen Durchmesser aufweisen, könnte eine zur Schnittfläche parallele Faser geschnitten werden. In der Formel 4.9 würde dies zu einer Division führen, in der Null im Nenner

steht. Es müsste die Faser unendlich oft vorkommen was nicht stimmt. Derartige Fasern werden bei der Bestimmung der Faserorientierung vom Programm ausgeschieden und daher nicht berücksichtigt.

Alternativen:

- Berücksichtigen der Fasergeometrie: Ist nur sinnvoll wenn alle Spezialschnittformen, also jene deren Schnittbild ungleich einer Ellipse ist, erkannt werden. Dies führt aber nicht zu einer Problemlösung der Fasern in 90° Richtung.
- Betrachten von drei orthogonalen Schnittflächen: Dabei werden an jeder der drei betrachteten Seiten nur Fasern in einem bestimmten Winkelbereich ausgewertet. Mit dieser Auswertung werden flache Fasern einer Schnittfläche, die zu Ungenauigkeiten führen würden, in einer der anderen zwei Schnittflächen ausgewertet.

4.3 Bestimmung des durchschnittlichen Faserorientierungsbeiwertes mittels Betrachtung dreier orthogonaler Schnittflächen.

Drei Schnittflächen werden betrachtet weil:

- Alle theoretischen Annahmen aus 4.2 nur für unendlich viele und unendlich dünne Fasern gelten.
- Bei der Betrachtung einer Schnittfläche auch sehr flache Fasern verwendet werden müssen, diese aber oft leicht gekrümmt sind und daher vom Programm ausgeschieden werden.
- Ellipsen von parallelen Fasern eine unendlich lange „lange Achse“ haben.
- In Faserlängsachse geschnittene Fasern, die nicht genau im Mittelpunkt des Faserquerschnittes geschnitten werden, haben keine korrekte kurze Achse.

Aufgrund dieser Punkte tritt ein Fehler auf. Je flacher die Fasern sind, desto größer ist dieser Fehler.

4.3.1 Voraussetzungen/Annahmen

Die Betrachtung dreier orthogonaler Schnittflächen kann nur erfolgen, wenn folgende Voraussetzungen gelten:

- Es herrschen in den drei Schnittflächen homogene Faserverteilungen, das bedeutet dass in allen drei Schnittflächen eine gleichmäßige Verteilung der Fasern gegeben ist und
- diese Fasern isotrop orientiert sind (gleichmäßige Orientungsverteilung der Fasern im Körper)

4.3.2 Drei aufeinander orthogonale Schnittflächen

Dabei wird das Volumen eines Körpers an drei Schnittflächen betrachtet. Jede mögliche Faserrichtung darf bzw. muss in genau einer Schnittfläche ausgewertet werden. Dabei wird so vorgegangen, dass nur jene Fasern in der Schnittebene betrachtet werden, bei denen die Projektion der Faser auf die Achse normal zu dieser Ebene länger ist, als auf den zwei anderen Achsen.

Die Gleichung (4.11) kann auf alle der drei Schnittflächen angewendet werden.

$$\eta_x = \frac{m_x}{\sum_{i=1}^{m_x} \frac{1}{\cos \varphi_{x,i}}} ; \eta_y = \frac{m_y}{\sum_{i=1}^{m_y} \frac{1}{\cos \varphi_{y,i}}} ; \eta_z = \frac{m_z}{\sum_{i=1}^{m_z} \frac{1}{\cos \varphi_{z,i}}} \quad (4.15)$$

m_x = Anzahl der betrachteten geschnittenen Fasern in der y-z-Schnittfläche

m_y = Anzahl der betrachteten geschnittenen Fasern in der x-z-Schnittfläche

m_z = Anzahl der betrachteten geschnittenen Fasern in der x-y-Schnittfläche

φ_x = Winkel zwischen der Faser i und der x-Achse

φ_y = Winkel zwischen der Faser i und der y-Achse

φ_z = Winkel zwischen der Faser i und der z-Achse

Wenn bei der Wahl der Fasern in den drei Schnittflächen Fasern jeder möglichen Orientierung genau einmal erfasst und ausgewertet werden, erhält man die Faseranzahl im Einheitsvolumen durch die Gleichung:

$$n = \sum_{i=1}^{m_x} \frac{1}{\cos \varphi_{x,i}} + \sum_{i=1}^{m_y} \frac{1}{\cos \varphi_{y,i}} + \sum_{i=1}^{m_z} \frac{1}{\cos \varphi_{z,i}} \quad (4.16)$$

Die Orientierung einer geschnittenen Faser in der x-y Ebene ist durch φ_z und α_z , x-z Ebene durch φ_y und α_y und in y-z Ebene durch φ_x und α_x gegeben (Abbildung 6).

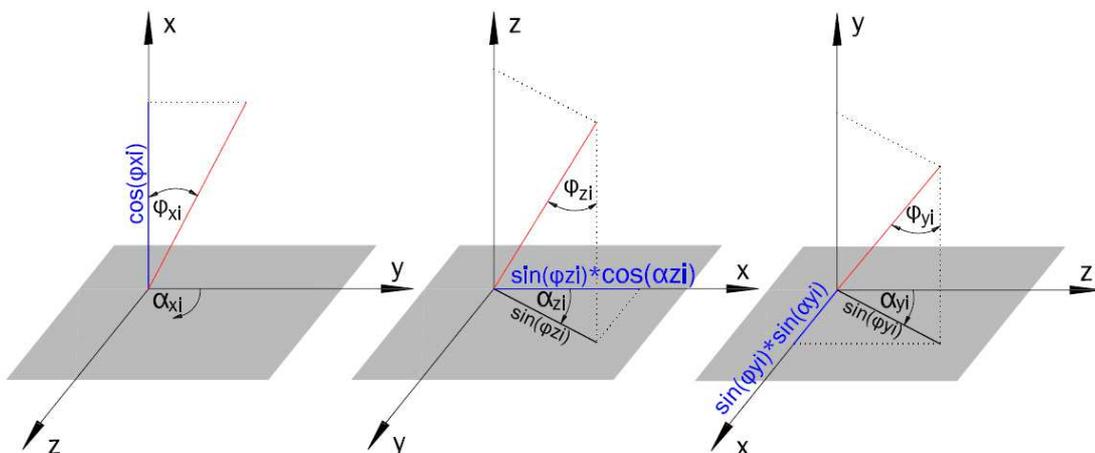


Abbildung 6: Koordinatensystem mit Winkelbezeichnungen und Faserprojektionen [7]

Es wird nun eine in der x-y Ebene geschnittene Faser betrachtet. Projiziert man sie auf die x-Achse, folgt daraus die Orientierung der Faser in x-Richtung (Abbildung 6):

$$\eta_{x,i} = \sin \varphi_{z,i} * \cos \alpha_{z,i} \quad (4.17)$$

Bei einer in x-z Ebene geschnittene Faser die in die x-Achse projiziert wird gilt folgende Formel für die Orientierung der Faser in x-Richtung (Abbildung 6):

$$\eta_{x,i} = \sin \varphi_{y,i} * \sin \alpha_{y,i} \quad (4.18)$$

Daraus errechnet sich der Faserorientierungsbeiwert in x-Richtung:

$$\eta_x = \frac{m}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{m_x} (\cos \varphi_{x,i} * n \varphi_{x,i})}{\sum_{i=1}^{m_x} \frac{1}{\cos \varphi_{x,i}}} + \frac{\sum_{i=1}^{m_y} (\sin \varphi_{y,i} * \sin \alpha_{y,i} * n \varphi_{y,i})}{\sum_{i=1}^{m_y} \frac{1}{\cos \varphi_{y,i}}} + \frac{\sum_{i=1}^{m_z} (\sin \varphi_{z,i} * \cos \alpha_{z,i} * n \varphi_{z,i})}{\sum_{i=1}^{m_z} \frac{1}{\cos \varphi_{z,i}}} \quad (4.19)$$

Auswertung von Bild x in Richtung x ; Auswertung von Bild y in Richtung x ; Auswertung von Bild z in Richtung x

$n_{\varphi,i}$ entspricht der Korrektur der Faseranzahl

Da $n_{\varphi,x,i} = 1/\cos(\varphi_{x,i})$ ergibt sich aus $\sum_{i=1}^{m_x} (\cos \varphi_{x,i} * n_{\varphi,x,i}) = m_x$

$n_{\varphi,y,i} = 1/\cos(\varphi_{y,i})$ und $n_{\varphi,z,i} = 1/\cos(\varphi_{z,i})$

$n_{\varphi,x,i}$In Bild X ausgewertete Faseranzahl

$\cos(\varphi_{x,i})$Faserorientierung normal zum Bild X

$n_{\varphi,y,i}$In Bild Y ausgewertete Faseranzahl

$\cos(\varphi_{y,i})$Faserorientierung normal zum Bild Y

$n_{\varphi,z,i}$ In Bild Z ausgewertete Faseranzahl

$\cos(\varphi_{z,i})$Faserorientierung normal zum Bild Z

Aus $\sin(\varphi_{y,i}) * n_{\varphi,y,i}$ ergibt sich $\tan(\varphi_{y,i})$ und aus $\sin(\varphi_{z,i}) * n_{\varphi,z,i}$ ergibt sich $\tan(\varphi_{z,i})$

Erneut eingesetzt ergibt sich für $\eta_{\varphi,x}$:

$$\eta_x = \frac{m_x}{\sum_{i=1}^{m_x} \frac{1}{\cos \varphi_{x,i}}} + \frac{\sum_{i=1}^{m_y} (\tan \varphi_{y,i} * \sin \alpha_{y,i})}{\sum_{i=1}^{m_y} \frac{1}{\cos \varphi_{y,i}}} + \frac{\sum_{i=1}^{m_z} (\tan \varphi_{z,i} * \cos \alpha_{z,i})}{\sum_{i=1}^{m_z} \frac{1}{\cos \varphi_{z,i}}} \quad (4.20)$$

4.3.3 Faserauswahl in Matlab

Im Matlab Skript, das für die Auswertung der Probekörper herangezogen wird, wird für die Faserauswahl folgendermaßen vorgegangen:

In Abbildung 7 wird die Ebene x-z als Referenzebene angesehen. Dabei ist die Projektion der im Bild eingezeichneten Faser auf der normal zur x-z Ebene stehenden y-Achse am längsten, das bedeutet, sie wird zur Auswertung in diesem Bild herangezogen. Anders erklärt werden die Fasern einer Seite ausgewertet, welche innerhalb einer eingezeichneten Pyramide (Spitze im Mittelpunkt des Würfels) aus der Schnittfläche ragen (Abbildung 7).

Die Auswahlkriterien sind: (4.21)

$$\cos \varphi_{x,i} \geq \cos \varphi_{y,i} \cup \cos \varphi_{x,i} \geq \cos \varphi_{z,i} \equiv \cos \varphi_{x,i} \geq \sin \varphi_{x,i} * \cos \alpha_{x,i} \cup \cos \varphi_{x,i} \geq \sin \varphi_{x,i} * \sin \alpha_{x,i}$$

Bedingung für die Auswertung einer Faser i in der y-z Ebene (4.22)

$$\cos \varphi_{y,i} \geq \cos \varphi_{x,i} \cup \cos \varphi_{y,i} \geq \cos \varphi_{z,i} \equiv \cos \varphi_{y,i} \geq \sin \varphi_{y,i} * \cos \alpha_{y,i} \cup \cos \varphi_{y,i} \geq \sin \varphi_{y,i} * \sin \alpha_{y,i}$$

Bedingung für die Auswertung einer Faser i in der x-z Ebene (4.23)

$$\cos \varphi_{z,i} \geq \cos \varphi_{x,i} \cup \cos \varphi_{z,i} \geq \cos \varphi_{y,i} \equiv \cos \varphi_{z,i} \geq \sin \varphi_{z,i} * \cos \alpha_{z,i} \cup \cos \varphi_{z,i} \geq \sin \varphi_{z,i} * \sin \alpha_{z,i}$$

Bedingung für die Auswertung einer Faser i in der x-y Ebene

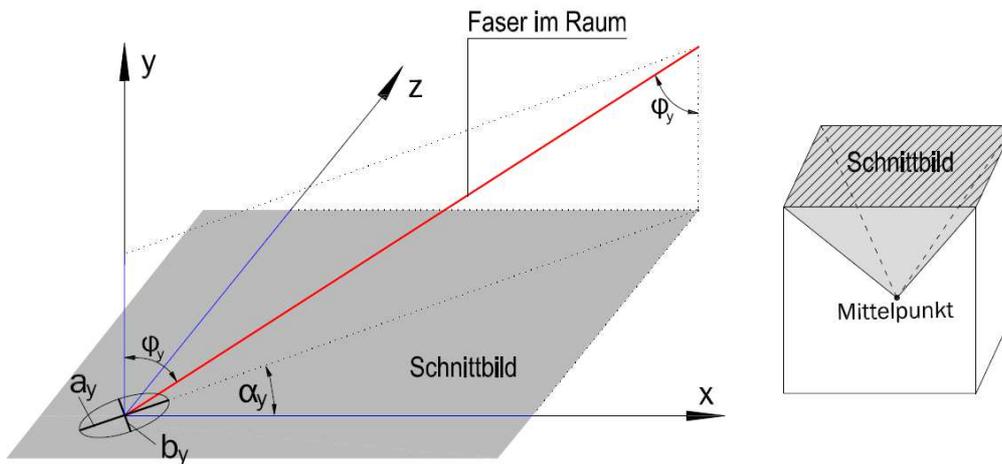


Abbildung 7: Faserauswahl

Da von jeder beliebig im Raum liegenden Faser nur die Halbmesser (a_y und b_y = Faserdurchmesser) in der Schnittebene und der Winkel α_y (Winkel zwischen x-Achse und Projektionsrichtung der Faser in der x-z Ebene) bekannt sind, ist es nun notwendig die Abstände und Winkel in allen drei Ebenen zu berechnen.

Zuerst wird mittels a_y und b_y der Winkel φ_y berechnet. Dies ist durch den Zusammenhang der Ellipsenhalbachsen möglich.

$$\frac{b_y}{a_y} = \cos \varphi_y \rightarrow \varphi_y \quad (4.24)$$

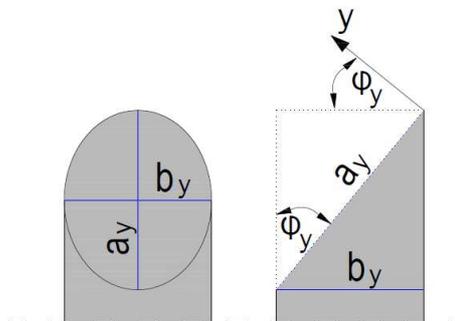
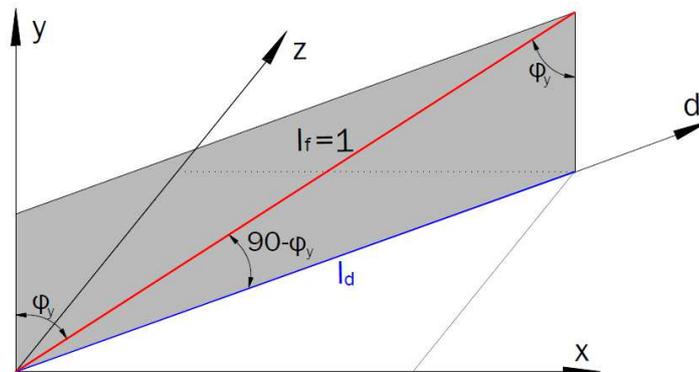


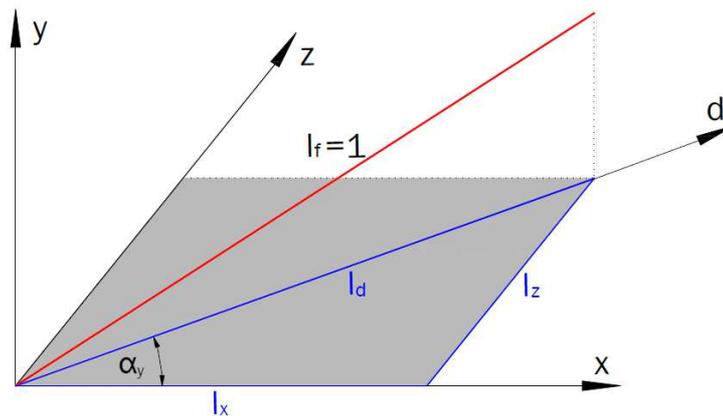
Abbildung 8: Winkel φ_y

Nun wird die Annahme getroffen, dass die Länge der Faser im Raum (l_f) 1 beträgt, da zur weiteren Berechnung der Winkel zu den Achsen x und z die Faserlänge keine Rolle spielt. Berechnet werden jetzt die fehlenden Winkel (φ_x und φ_z) über rechtwinkelige Dreiecke im Raum (Abbildung 11).


 Abbildung 9: l_D -Berechnung

$$\cos(90 - \varphi_y) = l_D = \sin(\varphi_y) \quad (4.25)$$

Um die Längen l_x und l_z zu berechnen wird nun die x - z -Ebene benötigt.


 Abbildung 10: l_x und l_z

$$\sin(\alpha_y) * l_D = l_z \text{ und } \cos(\alpha_y) * l_D = l_x \quad (4.26)$$

Aufgespannte Ebenen zwischen Faser und x bzw. z -Achse lassen uns nun φ_x und φ_z berechnen.

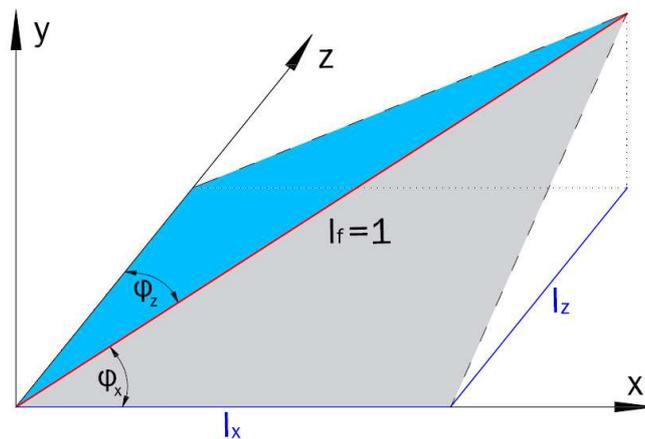


Abbildung 11: Winkel zur x bzw. z-Achse

$$\varphi_x = \arccos(l_x) \quad (4.27)$$

$$\varphi_z = \arccos(l_z)$$

Da nun alle drei Winkel zu den Achsen bekannt sind, steht fest, ob die Faser in der jeweiligen Schnittfläche für die Berechnung weiter verwendet wird. Die fehlenden Faserorientierungen in y und z-Richtung können anschließend berechnet werden.

$$\begin{aligned} \eta_x &= \cos(\varphi_x) \\ \eta_z &= \cos(\varphi_z) \end{aligned} \quad (4.28)$$

Damit sind folgende geometrischen Parameter für jede Einzelfaser bestimmt.

φ_x	φ_y	φ_z	η_x	η_y	η_z
-------------	-------------	-------------	----------	----------	----------

Die Auswertung dieser Ergebnisse erfolgt im Matlab, siehe Kapitel 9.

5 Das Drei-Bild-Auswerteverfahren

5.1 Auswerteargorithmus für das fotooptische Analyseverfahren

Dieses optische Verfahren wird durch Fotografieren der Oberfläche und anschließendes Bearbeiten und Auswerten des Bildes mittels einer automatisierten Bildauswertung der Software Matlab charakterisiert. Um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen, müssen die auszuwertenden Oberflächen der Proben poliert (Verschmierungen der Faserellipsen sind dadurch gering) und anschließend bei ausreichender Beleuchtung hochauflösend fotografiert werden. Die Nachbearbeitung der Oberfläche ist notwendig, da das Rechenprogramm die metallischen Faserquerschnitte in Größe und Form richtig erkennen muss, um die Orientierung (Raumrichtung) bestimmen zu können.

5.1.1 Sägen

Im ersten Schritt werden aus den Biegezugträgern die Probekörper herausgesägt. Durch das Sägen fransen die Stahlfasern aus und weiten sich bis auf das Vierfache der beim Planschliff entstehenden Ellipse auf. [11]

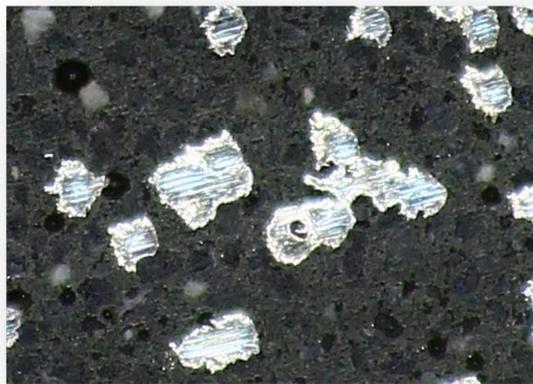


Abbildung 12: Referenzprobekörper 2 % gesägt

5.1.2 Planschliff



Abbildung 14: Schleifen einer Probe (Ceracem)



Abbildung 13: Schrubb- und Schlichtscheibe

Anschließend wurden die Oberflächen mittels Roboter plan geschliffen. Durch das Schleifen bzw. Polieren versucht man eine genaue Abgrenzung zwischen Beton und Stahlfasern zu erreichen. Die Ellipsenform kommt dadurch zum Vorschein. Verwendet wird eine Schlichtscheibe der Marke Wendt welche für die Stahlbearbeitung vorgesehen ist. Die notwendige Schärfe der Grenzlinie Beton/Stahl wird aber nur unter optimaler Kühlung und bestmöglicher Erschütterungsdämpfung erreicht. Die Kühlung der Schleifscheibe erfolgt von oben durch Löcher in der Schleifscheibe. Im Probenbereich wird das Wasser also von Innen zwischen Probe und Schleifaufsatz gespritzt, um die Fläche, die gerade bearbeitet wird und das Werkzeug, zu kühlen. Der Optimalfall wäre, dass die Schlichtscheibe in Segmenten aufgeteilt ist, wobei zwischen jedem Segment gekühlt werden kann oder gar eine Bearbeitung der Probe unter Wasser. [11]

Schrubbscheibe von Wendt: Bez: 11A2-125*23*20
SDS427 60M27/E
Ord. Nr. 781703/01

Schlichtscheibe CBN von Wendt: Bez: 11A2-150-12,5-4-20
42B126 R100 BX506/A-50/S
Ord. Nr. 781703/02

Ergänzend zu erwähnen wäre, dass sich dieses soeben erklärte Verfahren in der Entwicklungsphase befindet und die für die Probekörper verwendete Schrubb- und Schlichtscheibe nachträglich betrachtet mit einer zu geringen Körnung gewählt worden war, was zum Verschmieren dieser und damit verbunden zu schlechteren Resultaten führte. Gegen unerwünschte Erschütterungen werden die Proben in einer starren Einspannung so gelagert, dass die zu bearbeitende Oberseite nur wenige Millimeter über den Rand der Einspannung ragt. (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) Bei sehr großen steifen Proben ist dies nicht erforderlich. Die Proben werden für den Schleifvorgang mit zwei M16 Schrauben unter einem Drehmoment von 100 Nm eingespannt. Beim Schleifvorgang selbst wurden so oft bis der Körper völlig plan war, 0,25 mm mit der Schrubbscheibe abgeschliffen. Anschließend wurde fünf bis sechs Mal je 0,05 mm mit der Schlichtscheibe weggenommen, um die Oberfläche zu verbessern. Durch weiteres Schleifen ohne Änderung der Einstellungshöhe gibt es eine kleine Verbesserung (bei dieser Probe nicht durchgeführt, da mit der Hand poliert wurde).



Abbildung 15: Geschliffene Probe(Ceracem)

5.1.3 Polieren per Hand

Als letzten Bearbeitungsschritt wird, mittels Luftdruckschleifgerät mit Polierscheiben für Stahl, die Oberfläche behandelt. Die Faserellipsen werden damit etwas glatter und reflektieren das Licht besser, welches eine genauere Auswertung durch bessere Darstellung des Schwarzweißbildes bewirkt. Des Weiteren werden Ausfransungen geringer oder gar beseitigt und bereits ankorrodierte Stellen werden gereinigt. Die zum Polieren verwendeten Schleifscheiben besitzen einen Korndurchmesser von 100 bzw. 30 Millionstel Meter. Poliert wurde zuerst mit 100 μm und anschließend mit 30 μm . Weiteres Polieren mit einer 9 μm Schleifscheibe bewirkte, dass die gesamte Oberfläche so glatt wurde, dass Beton und Fasern das Licht annähernd gleich stark reflektierten und keine Auswertung möglich war.

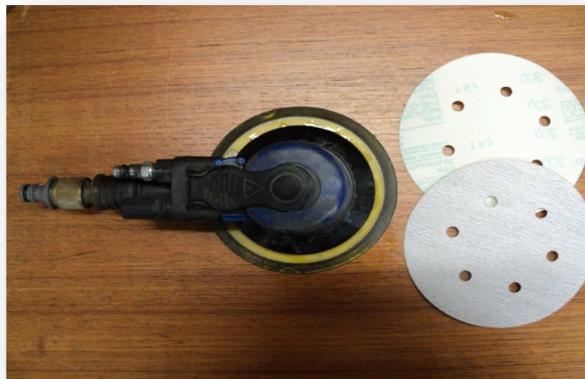


Abbildung 16: Luftdruckhandschleifgerät zum Polieren

Poliert wurde nach folgendem Muster: Zuerst langsam in Richtung der vier Kanten der Seiten vor, zurück, links, rechts und anschließend in einer Kreisbewegung. Dieser Ablauf benötigte ca. 2 Minuten. Dieses Muster wurde anschließend nochmals mit der feineren Schleifscheibe (30 μm) durchgeführt. Anschließend wurde die Oberfläche begutachtet. Ist ein weiteres polieren nötig gewesen, ist derselbe Vorgang mit einer neuen 30 μm Schleifscheibe wiederholt worden. Nach jedem zweiminütigen Poliervorgang wurde die Schleifscheibe gegen eine neue ersetzt.



Abbildung 17: Polierte Probe (Ceracem)

5.2 Erzeugen der Schnittflächenaufnahmen

Bei diesem Verfahren werden die Oberflächen von Probekörpern bei guter Beleuchtung fotografisch festgehalten. Die Oberfläche wird dabei durch eine starke Lichtquelle beleuchtet, was bewirkt, dass sich die geschnittenen Stahlfasern auf der Aufnahme durch Reflexion an der glatten Stahloberfläche als helle Ellipsen zeigen. Stellen, an denen das Licht nicht auf eine Faserellipse trifft, reflektieren den Lichtstrahl nur sehr gering und erscheinen dadurch auf der Aufnahme dunkler. So entstehen Bilder an denen sich die Faserellipsen durch den Helligkeitsunterschied abheben. [2]

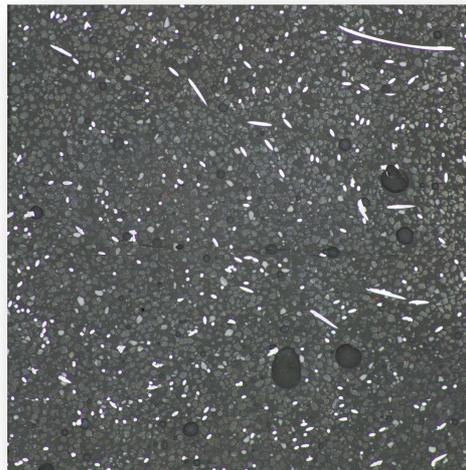


Abbildung 18: Helligkeitsunterschied

5.3 Foto Set up

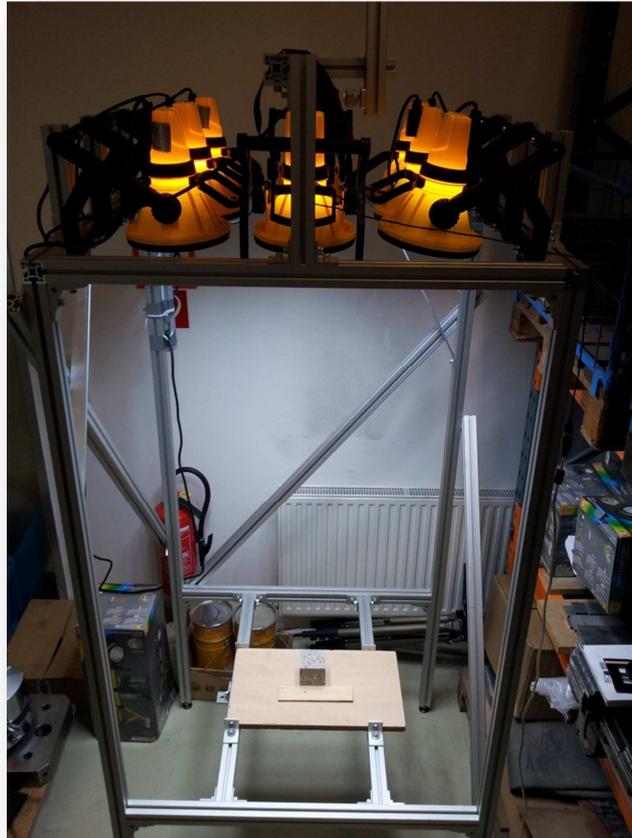


Abbildung 19: Foto Set up

Für die fotografischen Aufnahmen der zugeschnittenen sowie zugeschnittenen/polierten Probekörper dient eine Aluminiumkonstruktion auf der Beleuchtung und Kamera befestigt sind. An der Konstruktion sind acht Beleuchtungseinheiten (Strahler) mit einer Leistung von je 32 Watt montiert. Eine Glühbirne besitzt bei einer 5 %igen Ausbeute von sichtbarem Licht eine Leuchtkraft von 14 Lumen/W. Halogenbeleuchtung leistet die doppelte Leuchtkraft (ca.28 Lm/W) und 10,5 % sichtbares Licht. Die restliche Energie (Glühbirne = 95 %, Halogenbeleuchtung = 89,5 %) wird in Wärme und UV-Licht umgewandelt. Da die Steifigkeit wichtig ist um Schwingungen zu verhindern, werden Diagonalstreben an der Konstruktion befestigt.

Zu beachten ist, dass die Lichtquelle größer ist als die Probe, da es sonst zu einer schlechten Beleuchtung der Ränder kommt. Je mehr Unebenheiten die Oberfläche aufweist, desto schlechter ist die Ausleuchtung. [10]

In dieser Konstruktion werden acht Lichtquellen verwendet, welche um die Probe angeordnet und auf Probe gerichtet sind. Die drei linken Strahler sind auf den linken Rand der Probe gerichtet, die drei rechten Strahler auf den rechten Probenrand und die zwei in der Mitte zeigen je einer auf den vorderen und auf den hinteren Rand der Probe. Damit wird eine sehr gute Ausleuchtung erreicht.

5.3.1 Kamera und Objektiv

Zur Durchführung des Versuches ist eine hochauflösende, leistungsstarke, digitale Spiegelreflexkamera 600D der Marke Canon benutzt worden. Diese hat eine Auflösung von bis zu 18 Megapixel liefert damit sehr gute Ergebnisse bei den Versuchen.



Abbildung 20: Kamera

Das verwendete Objektiv mit der Bezeichnung Canon EF70-300mm f/4-5,6 IS USM hat eine Brennweite von 70-300mm.

Technische Daten:

Canon EOS 600D	
Auflösung	bis zu 5.184 x 3.456 Bildpunkte (Seitenhältnis 3:2)
Farbtiefe	24 Bit (16,7 Millionen Farben) bei JPG-Format, 42 Bit bei RAW-Format
Sensor	C-MOS Chip mit 18.000.000 Bildpunkten
Verbindung zum Computer	USB-Schnittstelle (Version 2.0 Hi-Speed)
Stromversorgung	Lithiumionen-Akku oder Netzgerät
Lichtempfindlichkeit	ISO 100-6400 (automatisch) ISO 100/200/400/800/1600/3200/6400/12800 (manuell)
Belichtungszeiten	1/4.000 s bis 30 s , 1/200 s bis 30 s (mit Blitz)
Canon EF70-300mm f/4-5,6 IS USM	
Brennweite	70 - 300 mm
Zoomfaktor	4,3-fach

Einstellungen an der Kamera:

Die Kamera wird zentral über der Probe zwischen der Beleuchtung montiert um Verzerrungen so gering wie möglich zu halten. Als Grundeinstellung wird bei der Kamera die manuelle Einstellung (M) gewählt.

Darin wurde eingestellt:

- Aufnahmemodus: Manuelle Belichtung
- Blende: 7,1
- Tv (Verschlusszeit): 1/50
- Messmodus: Mehrfeldmessung
- ISO: Auto (hier 100-200)
- Bildgröße: 5148x3456
- Seitenverhältnis: 3:2
- Bildqualität: RAW
- Blitz: Aus
- Weißabgleich: Automatisch
- Transportart: Einzelbild
- Bildstil (Bildeinstellungen):
 - Schärfe = 7
 - Kontrast = 4
 - Farbsättigung = -4
 - Farbton = 0

Die Bedienung der Kamera zur Aufnahme der Schnittbilder erfolgt am Computer. Wird die E600D eingeschaltet, verbindet sie sich nach erfolgreicher Installation der mitgelieferten Software automatisch mit dem Computer. Von diesem aus werden dann per Fernaufnahme die Schnittbilder fotografiert.

5.3.2 Fotobearbeitung

Bevor die Auswertung mit Matlab beginnen kann, müssen die Fotoaufnahmen mit Hilfe des Programmes Raw Therapiee V4.0 bearbeitet werden. Dieses Programm kann im Internet kostenlos herunter geladen werden. Der später in Matlab verwendete Bildausschnitt wird in dem Programm auf eine Größe von 5*5 cm zugeschnitten und in ein 8 Bit JPEG gespeichert. Diese Bilder werden anschließend in Matlab eingelesen. Die Software erstellt dann die binären schwarz weiß Bilder und führt damit die Auswertung durch.

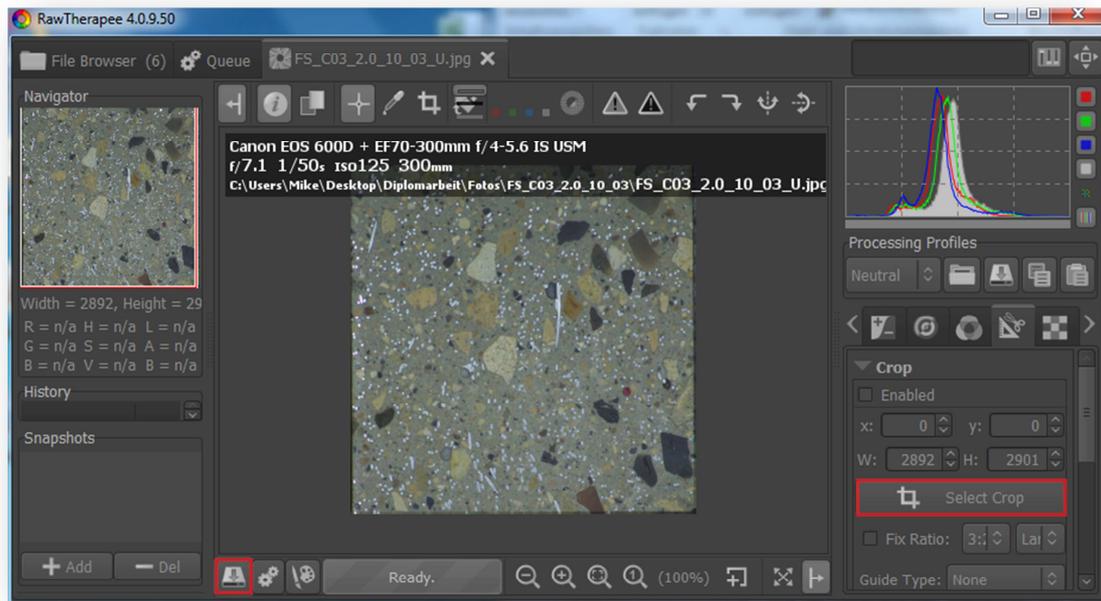


Abbildung 21: Bildbearbeitungsprogramm

5.4 Bildauswertung mittels Matlab-Software

5.4.1 Auswertung im vorhandenen Skript

Mittels der Software Matlab erfolgt die Auswertung der Faserorientierungen anhand der Schnittflächen. Nachdem die Bilder der drei Seiten einer Referenzprobe in Raw Therapiee zugeschnitten und als JPEG gespeichert wurden, müssen diese in den Ordner kopiert werden, indem sich die Software Matlab befindet. Anschließend öffnet man das Programm „Faserorientierung_eine_Seite“, in welchem zuerst ganz oben der Bildname eingegeben werden muss. Weiters sind der Grauwert (Zeile 24), Anzahl der dpi (Zeile 38), Anzahl der Faserdurchmesser (Zeile 40) und deren Bereiche (48-...) und Faserdurchmesser (56-...) für die Auswertung notwendig. Der Grauwert ist ein Wert zwischen 1 und 255, welcher so eingestellt werden muss, dass sich, am später erzeugten schwarz weiß Bild die Faserellipsen vom Beton an der Schnittfläche abheben. Die Bildgröße wird in dpi in Zeile 38 eingegeben. Die Anzahl, der verschiedenen Faserdurchmesser in der Probe wird in Zeile 40 eingetragen. Da der Durchmesser der Faserellipsen ein und desselben Durchmessers etwas variiert, wird angegeben, in welchem Bereich sich der jeweilige bewegt. Ab Zeile 56 werden noch die tatsächlichen Faserdurchmesser eingetragen. Sind diese Werte alle eingegeben, kann das Programm durch Betätigen des Run-Buttons gestartet werden. Als Ergebnis werden im gleichen Ordner indem sich das eingelesene Bild befindet vom Programm ein schwarz-weiß Bild, ein Bild mit der Fasernummerierung und eine Excel Tabelle mit der Auswertung für diese eine Schnittfläche ausgegeben. Bei der Auswertung der anderen zwei benötigten Bilder müssen nur mehr der Bildname und der Grauwert angepasst werden. Die drei Excel Files, die bei der Auswertung von drei Einzelseiten eines Probekörpers erzeugt werden, benötigt nun das neue Matlab Programm für die Gesamtauswertung (Drei Flächen Auswertung).

5.4.2 Drei-Bild-Auswertung

Das neue Matlab-Skript für die Auswertung der Faserorientierung anhand dreier Seiten eines Probekörpers mit der Bezeichnung "Gesamtauswertung" muss sich im Ordner, in dem die Excel Files der drei Einzelseitenauswertungen sind, befinden. Nach Öffnen des Programmes sind die Bezeichnungen der drei Excel Files der Einzelflächenauswertungen und die dazugehörigen Grauwerte einzutragen. Beim anschließenden Ausführen des Programmes wird im Ordner, in dem sich alle Files befinden, eines mit der Bezeichnung des ersten Bildes und der Endung „_endergebnis“ angelegt.

5.5 Genauigkeit des Verfahrens

Durch Bearbeiten der Probenoberfläche wie auch durch mathematische Korrekturen ist es möglich, die Genauigkeit des Verfahrens zu verbessern. Gewisse Ungenauigkeiten bleiben trotz dieser Maßnahmen bestehen. Nachfolgend werden Korrekturen und verbleibende Fehler beschrieben.

5.5.1 Einfluss des Korrekturfaktors

Durch die hohe Auflösung der Fotos werden die kurzen Achsen $b=0,3$ mm in der Größe von 17 Pixel und $b=0,175$ mm anhand von 10 Pixel abgebildet. Da bei der Beleuchtung der Flächen die Fasern das Licht reflektieren, werden die Faserellipsen bei einer Überbelichtung größer und bei einer Unterbelichtung kleiner dargestellt, als sie in Wirklichkeit sind.

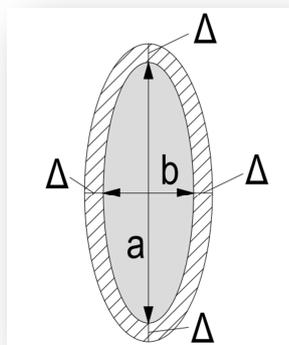


Abbildung 22: Ellipsenkorrektur

Diese Vergrößerung/Verkleinerung entspricht dem Delta in der Abbildung 22. Es wird angenommen, dass diese Vergrößerung/Verkleinerung an der gesamten Ellipse demselben Wert entspricht. Durch diese beleuchtungsbedingte Vergrößerung der Ellipse wird diese etwas runder, dies führt dazu, dass sich bei der Berechnung des Winkels φ ein steilerer ergibt als es der Wahrheit entspricht. Dies führt zu einem Fehler in der Berechnung der Faserorientierung. Die Größe des Fehlers ist abhängig von der Stärke der Über- oder Unterbelichtung. Eine Korrektur erhält man indem man die zu groß oder zu klein dargestellte Ellipse auf die bekannte Breite (Faserdurchmesser) bezieht. Dabei wird die Abweichung $= 2 \cdot \Delta$ an der Länge b ebenfalls bei der Länge a dazugegeben oder abgezogen.

Bis auf den Fall der senkrechten Faser, an der a und b denselben Wert besitzen, schlägt sich der Fehler in der Faserorientierung nieder. Dies ist an Gleichung 5.1 zu erkennen.

$$\eta_{\varphi} = \frac{b + 2\Delta}{a + 2\Delta} \quad (5.1)$$

In der Diplomarbeit von Markus Lüftenegger [13] wird ein Korrekturfaktor $f = 0,6$ global über alle Fasern angenommen. Da bei jeder Beleuchtungsänderung eine Änderung des Faktors auftritt ist hier eine Verbesserung mit einem Multiplikator vorgenommen worden. Da die Beleuchtung genau angepasst wurde, wird die Vergrößerung der Ellipsen um vieles geringer oder es tritt sogar eine leichte Verkleinerung ein. Die Korrektur für eine Faser wird nicht wie bisher mit einem globalen Faktor angenommen, sondern durch Dividieren des tatsächlichen Faserdurchmessers durch die kurze Achse für jede Faser einzeln gebildet.

Beispiel für die Bandbreite der Vergrößerung bzw. Verkleinerung der kurzen Achse. (Bildes U der Probe **FS_C03_2.0_10_03**):

	Kurze Achse
Max.	1,8867
Min.	0,7795

Tabelle 1: Vergrößerung bzw. Verkleinerung von b

In der Tabelle 1 ist die Faser mit der maximalen und die mit der minimalen Korrektur der Schnittfläche U dargestellt. $1,8867 \cdot 0,3 \text{ mm}$ ergibt die Vergrößerung der kurzen Achse b an der Schnittbildaufnahme. $0,7795 \cdot 0,3 \text{ mm}$ die Verkleinerung. Hat die Korrektur einen Wert größer eins bedeutet es, dass η_y durch die Faserkorrektur größer wird, da die Ellipse beim Korrigieren etwas runder wird. Bei Werten < 1 ist es umgekehrt. Weiters ändern sich durch die korrekturbedingt veränderten η_y auch die Orientierungen η_x und η_z .

5.5.2 Einfluss der Schleifrichtung

Da sich beim Schleifen die Schleifrichtung an der Faser abbildet, ist hier der Einfluss auf die Genauigkeit angeführt. Wo die Schleifscheibe die Faser zuerst berührt, wird der Rand schön elliptisch dargestellt. Dort wo die Schleifscheibe die Faserellipse verlässt, ist ein Ausfransen des Randes der Faser zu beobachten.



Abbildung 23: Einfluss der Schleifrichtung (nach dem Polieren per Hand mit einer 30μ Schleifscheibe)

Einfluss auf den Faserdurchmesser

Der Rand, an dem die Schleifscheibe die Faser verlässt, ist umso größer je größer die Schleifscheibe ist. Bei dem hier betrachteten Körper ist eine 30 μm (30/1000 mm) Schleifscheibe verwendet worden. An der eingetragenen Mittelungskurve in Abbildung 24 ist zu erkennen, dass die Faserdurchmesser, welche vom Programm gemessen werden, um ca. 20 % größer (0,36mm) sind, als der tatsächliche Faserdurchmesser (0,3mm). Das bedeutet, dass es trotz genauem Polierens nicht möglich ist, den tatsächlichen Faserdurchmesser an der Schnittfläche darzustellen. In diesem Fehler ist die Abweichung aus der Über- oder Unterbelichtung mit inbegriffen, da die Abweichung beim Polieren sich nicht von der Belichtungsabweichung trennen lässt. Am Bild U der Probe **FS_C03_2.0_10_03** wird nun die Faserdurchmesservergrößerung in Abhängigkeit des Winkels Alpha dargestellt.

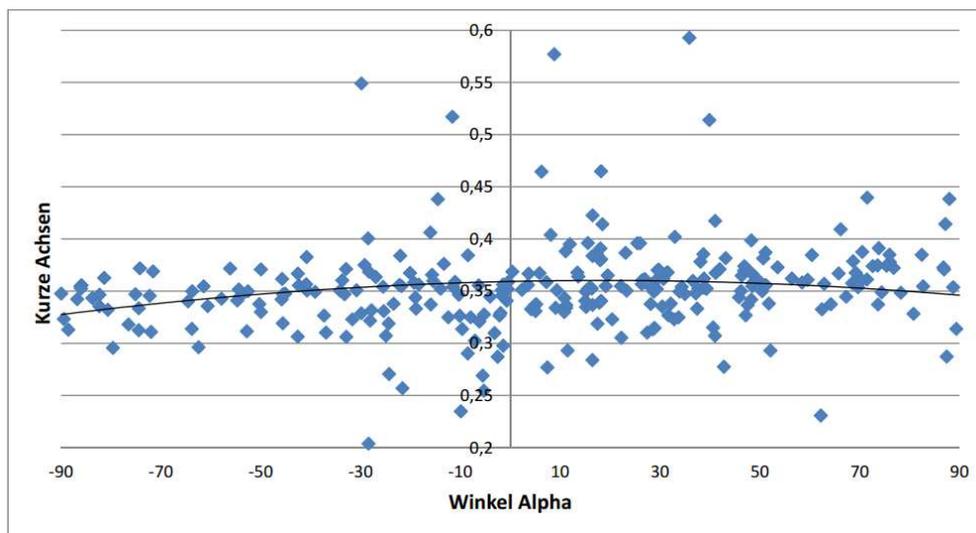


Abbildung 24: Faservergrößerung durch Belichtung und Poliervorgang

Es ist zu erkennen, dass die Faserdurchmesser in der Schnittbildaufnahme, welche nach dem Poliervorgang erstellt wurde, durch Belichtung und Poliervorgang eine durchschnittliche Vergrößerung von ca. 0,06 mm aufweisen.

Einfluss auf die Orientierung

Zusätzlich ist durch das einseitige Ausfransen der Fasern ein Einfluss auf die Orientierung festzustellen. Dieser Einfluss ist damit zu erklären, dass sich der Winkel Alpha durch die einseitigen Fransen etwas ändert, da der Schwerpunkt der Faser nicht dem der Abbildung am Foto entspricht. Je flacher die Fasern sind, desto größer ist dieser Einfluss. Bei der in dieser Arbeit verwendeten Auswertung, in der flache Fasern nicht einfließen, ist dieser Fehler sehr gering.

5.5.3 Luftporen

Bei erster Betrachtung wird nicht vermutet, dass kleine Lufteinschlüsse eine negative Auswirkung auf die Orientierungsbestimmung der Fasern haben. Die Luftporen selbst sind auch nicht der Grund, sondern die Bearbeitung der Proben. Durch das Schneiden wird die Stahlfaser am Anschnitt stark erweitert und in eventuell vorhandene Luftporen gedrückt. Bei der weiteren Bearbeitung der Probenfläche kann der in die Luftporen befindliche Stahl nicht mehr entfernt werden und fließt so in die Auswertung ein. Nun kann es sein, dass Fasern, welche normalerweise gezählt werden, durch die Verformung ausgeschieden werden oder die Verformung so ungünstig ist, dass einer Faser eine völlig falsche Orientierung zugeordnet wird.

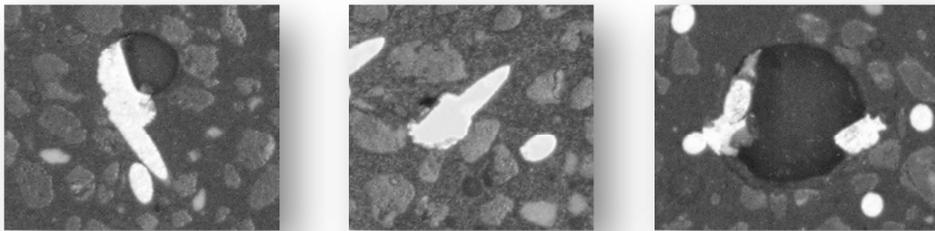


Abbildung 25: Fasern in oder neben Luftporen

6 Test des Drei-Bild-Auswerteverfahrens

Um das Verfahren zu überprüfen werden zwei Bezugsprobekörper hergestellt.

Die Bezugsprobekörper haben folgende Funktion:

- Die Bezugsprobekörper dienen als Referenzproben.
- Durch eine Handzählung und dem Vergleich mit der Anzahl der Fasern die das Programm findet, kann festgestellt werden, wie viele Fasern durch das Programm nicht gezählt werden. (Bei Zusammenstoßen von mehreren Fasern werden diese vom Programm als eine Faser gesehen, welche gezählt, oder bei großer Unförmigkeit, ausgeschieden wird.)
- Da die Auswertung am geschnittenen und am polierten Körper stattfindet, kann der Einfluss der Bearbeitung der Schnittflächen auf die Genauigkeit festgestellt werden.

Idealerweise sollten die Probekörper eine homogene Faserverteilung in jeder der drei Schnittflächen aufweisen und die Fasern sollten isotrop im Körper orientiert sein.

Die zwei Referenzprobekörper wurden im Labor hergestellt und unterschieden sich nur in Faser- und Wassergehalt. Die Proben haben die Form eines Prismas mit den Abmessungen 150/150/100 mm. Mit der den Probekörpern zugrunde gelegten Mischungsberechnung ist der Probekörper 1, welcher 2 % Stahlfasern enthält, nur sehr schwer herstellbar gewesen, weshalb der Wassergehalt bei Probekörper 2 (1,5 % Faseranteil) etwas erhöht wurde. Der neue W/Z-Wert betrug statt 0,25 bei der 2 %igen Probe nun 0,28 bei dem 1,5 %igen Körper.

Mischvorgang



Abbildung 26: Hobart II

Zum Mischen der Referenzkörper wurde ein Mörtelmischer (Hobart 2) verwendet.

Frischbetonherstellungsablauf:

- 1.) 30 sec. Mischen von Zement und Microsilika
- 2.) 30 sec. Hinzumischen von Wasser und Fließmittel, welches zuvor miteinander vermengt wurde.
- 3.) 330 sec. Mischen
- 4.) 30 sec. Hinzumischen der Stahlfasern
- 5.) 330 sec. Homogenmischen des Gemenges

Während des Mischvorganges musste beim Beimengen der Stahlfasern auf Stufe 1 des Hobart gestellt werden, da sich der Beton durch den geringen Wassergehalt sonst nicht mischen ließ (Leistungsgrenze des Mixers wurde erreicht). Das Ausbreitmaß wurde mit dem Ausbreitversuch nur an Probekörper 1 mit 15cm (14,5 und 15,5 diagonal gemessen) festgehalten.

Die Prüfung des Frischbetons erfolgt nach DIN EN 12350-5.

Benötigt werden dafür:

- Ausbreittisch
- Kegelstumpfförmiger Behälter der beidseitig offen ist (Durchmesser oben 13 cm, Durchmesser unten 20 cm und
- Wasser zum Befeuchten benötigt.

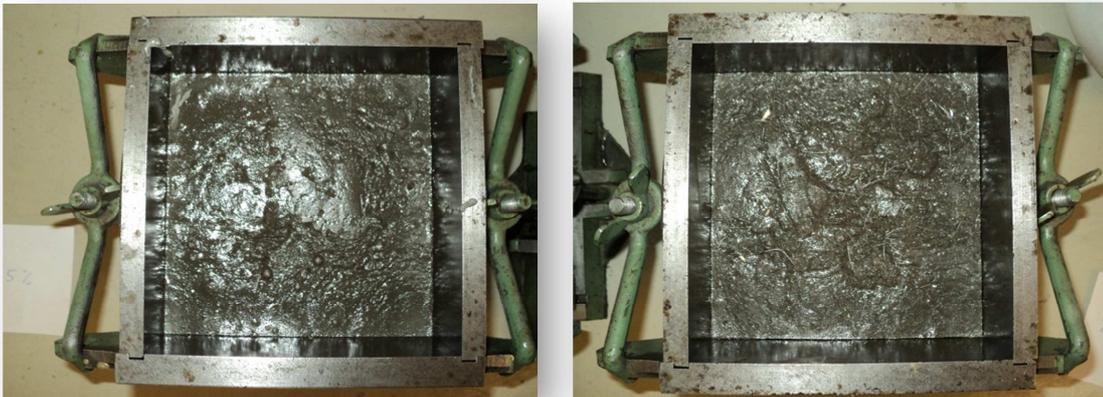


Abbildung 27: Probe mit 1,5 % (links) und 2 % (rechts) Stahlfaseranteil

Trotz selbstverdichtenden Betons wurde die 2 % Probe auf eine Rüttelplatte gestellt.

Das Ergebnis der Mischungsberechnung bei der zweiten Probe mit 1,5 % Stahlfasergehalt wurde die Wassermenge auf 0,394kg angehoben, um die Mischfähigkeit zu verbessern. Bei der Abbildung 27 ist durch den sehr geringen Wasser-Zement-Wert (W/Z-Wert) das Mischgut so trocken ausgefallen, dass einige Stahlfasern an der Oberfläche zu sehen sind.

Bei der 1,5 %igen Probe wurde der W/Z-Wert von 0,25 auf 0,28 erhöht. An dieser Probeoberfläche sind so gut wie keine Fasern erkennbar, das bedeutet, dass fast alle Fasern im Zementleim eingebettet sind.

6.1 Bearbeiten der Proben

Für die Faserorientierungsbestimmung müssen die Proben auf ein Format von 6*6*6 cm (Abbildung 28) zugeschnitten werden. Das Ursprungsformat der Quader betrug bei der Probe mit 1,5 % Faseranteil 149,9*150*99,8 mm und bei der 2 %igen Probe 149,9*149,9*99,1 mm.

Bearbeitungsschritte:

- a.) Sägen auf benötigtes Format

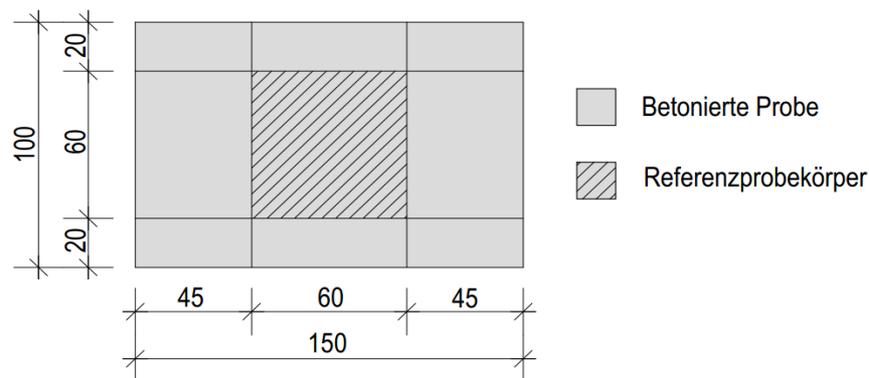


Abbildung 28: Referenzkörperzuschnitt

- b.) Planschleifen mittels Roboter
c.) Polieren der Oberflächen per Hand mit einem Nass-Schleifgerät

Die Quader wurden durch Sägen auf ein Format 60/60/60 verkleinert. Das Sägen der Proben erfolgte nur grob. Da beim Sägen die Kanten des herausgeschnittenen Probekörpers ausbrechen (durch Erschütterungen beim Bearbeiten und Ausreißen der Stahlfasern an den Kanten) wird bei der Auswertung je Seite nur eine 5*5 cm große Fläche, dessen Mittelpunkt im Zentrum der jeweiligen Seite liegt, betrachtet. Das Planschleifen und Polieren erfolgt nach Kapitel 5.1.

6.2 Bestimmung der Faseranzahl und folglich der Faserorientierung durch Zählen

6.2.1 Abzählen der Fasern am geschnittenen Probekörper

An der geschnittenen aber noch nicht geschliffenen Probe ist ein Zählen der Fasern nur schwer möglich, da die Oberflächen sehr rau sind und nur stark verschmierte Faserellipsen erkennbar sind. Dennoch ist es hier so gut wie möglich versucht worden, um später einen Vergleich zwischen ungeschliffener und geschliffener Probe zu erhalten. Der zu zählende Bereich wurde mit 5*5 cm vom Mittelpunkt der Probe festgelegt. Gezählt wird auf einer Photographie der Oberfläche mit Hilfe einer Software (Paint), da jede gezählte Faser mit einem Farbpunkt markiert werden kann. Durch diese Vorgehensweise wird jede Faser nur einmal gezählt.

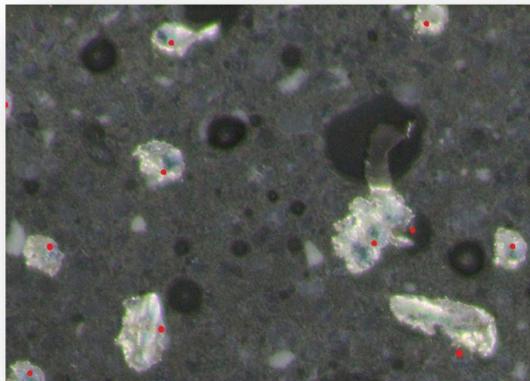


Abbildung 29: Markieren der gezählten Fasern

So wird die Faseranzahl an allen 6 Seiten des Probekörpers bestimmt. In der Abbildung 30 sieht man das gewählte globale Koordinatensystem u - v - w und die nachfolgend zu zählenden Bilder $U1$, $V1$ und $W1$. Das Bild $U2$ befindet sich auf der Schnittfläche gegenüber Bild $U1$, das Bild $V2$ auf der Schnittfläche gegenüber Bild $V1$ sowie das Bild $W2$ auf der Schnittfläche gegenüber Bild $W1$. Es war nach der Bearbeitung nicht möglich die Betonierrichtung an den Referenzproben festzustellen.

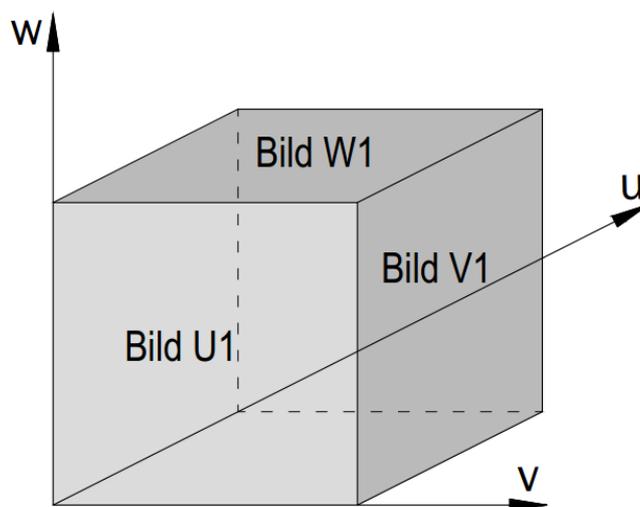


Abbildung 30: Globales Koordinatensystem mit Bildzuordnung

Fasern in den geschnittenen Flächen:

Referenzprobe 2%		Referenzprobe 1,5 %	
Bild	Faseranzahl	Bild	Faseranzahl
Bild U1	285	Bild U1	251
Bild V1	374	Bild V1	136
Bild W1	278	Bild W1	167
Bild U2	359	Bild U2	194
Bild V2	349	Bild V2	170
Bild W2	140	Bild W2	136

Fasern in den geschliffenen/polierten Flächen:

Referenzprobe 2%		Referenzprobe 1,5 %	
Bild	Faseranzahl	Bild	Faseranzahl
Bild U1	309	Bild U1	258
Bild V1	384	Bild V1	135
Bild W1	312	Bild W1	171
Bild U2	396	Bild U2	193
Bild V2	354	Bild V2	182
Bild W2	139	Bild W2	161

Bei einer homogenen Faserverteilung und einer isotropen Orientierung der Fasern müssten in jeder Fläche gleich viele Fasern zu finden sein. Dies ist hier aber nicht der Fall. Es sind Abweichungen von bis zu 200 % die Realität.

6.2.2 Bestimmen der Faseranzahl im Volumen anhand einer Handrechnung

Es wurden 20 Fasern mit einer Vakuumwaage abgewogen und durch Division das Gewicht einer Einzelfaser, welches 0,01171 g beträgt, bestimmt. Da bei der 2 %igen Probe eine Masse von 351 g Fasern verwendet wurde, errechnete sich daraus die Gesamtanzahl an Fasern (29974 Stück) im Probekörper. Da sich nun verteilt auf eine Höhe von 99,1 mm 29974 Fasern befinden und diese eine Länge von 2 cm aufweisen ist die theoretische Anzahl bei totaler Ausrichtung normal zur Schnittfläche in einem beliebigen Schnitt:

$$\frac{9,91\text{cm}}{2,0\text{cm}} = 4,955 \rightarrow \frac{1}{4,955} = 20,18\% \text{ der Fasern, entspricht einer Anzahl von } 6049 \text{ Stück}$$

Wird eine isotrope Orientierung angenommen ($\eta = 0,5$) halbiert sich die Faseranzahl in jedem Schnitt. Mit der Annahme der Orientierung aller Fasern normal zum Schnitt erhält man die benötigte theoretische Faseranzahl $n_{\text{theoretisch}}$ im Volumen.

Die theoretische Faseranzahl befindet sich somit auf der Schnittfläche $149,9 \cdot 149,9 \text{ mm} = 224,7 \text{ cm}^2$. Aus dieser Fläche kann errechnet werden, wie viele Fasern sich im Volumen mit einer Auswertungsfläche ($5 \cdot 5 \text{ cm}$) befinden.

$$\frac{224,7 \text{ cm}^2}{100 \%} = \frac{25 \text{ cm}^2}{\text{Fasern} (\%)} \rightarrow \frac{100\% \cdot 25 \text{ cm}^2}{224,7 \text{ cm}^2} = 11,13 \% \text{ Fasern}$$

Theoretische Faseranzahl in der Probe mit 2 % Fasergehalt:

$$\frac{6049 \text{ Stück}}{100 \%} = \frac{X \text{ Stück}}{11,13 \%} \rightarrow \frac{6049 \text{ Stück} \cdot 11,13 \%}{100 \%} = 673 \text{ Fasern}$$

Dividiert man nun die aus 6.2.1 gezählten Fasern durch die hier errechneten theoretischen 673 Stück, erhält man den Faserorientierungsbeiwert.

Berechnung der Faseranzahl in einem Volumen der Länge der Faser für die 1,5 %ige Probe:

$$263 \text{ g} / 0,01171 \text{ g} = 22459 \text{ Stück}$$

$$\frac{9,98 \text{ cm}}{2,0 \text{ cm}} = 4,99 \rightarrow \frac{1}{4,99} = 20,04\% \text{ der Fasern, entspricht einer Anzahl von } 4501 \text{ Stück}$$

$$\text{Fläche: } 149,9 * 150 = 224,85 \text{ cm}^2$$

$$\frac{224,85 \text{ cm}^2}{100 \%} = \frac{25 \text{ cm}^2}{\text{Fasern (\%)}} \rightarrow \frac{100\% * 25 \text{ cm}^2}{224,7 \text{ cm}^2} = 11,12 \% \text{ Fasern}$$

$$\frac{4501 \text{ Stück}}{100 \%} = \frac{X \text{ Stück}}{11,12 \%} \rightarrow \frac{4501 \text{ Stück} * 11,12 \%}{100 \%} = 500 \text{ Fasern}$$

6.2.3 Bestimmung der Faserorientierung aus dem Ergebnis der Zählung

Nun kann für alle sechs Seiten der zwei Referenzprobekörper nach Gleichung 6.1 die Faserorientierung berechnet werden.

$$\eta_{\varphi, 2 \%} = \frac{m}{n_{\text{theoretisch}}} = \frac{m}{673} \quad (6.1)$$

$$\eta_{\varphi, 1,5 \%} = \frac{m}{n_{\text{theoretisch}}} = \frac{m}{500}$$

m = geschnittene Fasern (gezählt)

$n_{\text{theoretisch}}$ = alle Fasern in einem Volumen der Auswertungsfläche 5*5 cm (gerechnet)

Faserorientierungen der geschnittenen Proben:

Bilder 2 %	Faseranzahl	Orientierungsbeiwerte	
U1	285	η_U	0,423
V1	374	η_V	0,556
W1	278	η_W	0,413
U2	359	η_U	0,533
V2	349	η_V	0,519
W2	140	η_W	0,208

Tabelle 2: geschnittene Probe 2%

Bilder 1,5 %	Faseranzahl	Orientierungsbeiwerte	
U1	251	η_U	0,502
V1	136	η_V	0,277
W1	167	η_W	0,334
U2	194	η_U	0,388
V2	170	η_V	0,340
W2	136	η_W	0,277

Tabelle 3: geschnittene Probe 1,5%
Faserorientierungen der polierten Proben:

Bilder 2 %	Faseranzahl	Orientierungsbeiwerte	
U1	309	η_U	0,459
V1	384	η_V	0,571
W1	312	η_W	0,464
U2	396	η_U	0,588
V2	354	η_V	0,526
W2	139	η_W	0,206

Tabelle 4: polierte Probe 2%

Bilder 1,5 %	Faseranzahl	Orientierungsbeiwerte	
U1	258	η_U	0,516
V1	135	η_V	0,270
W1	171	η_W	0,342
U2	193	η_U	0,386
V2	182	η_V	0,364
W2	161	η_W	0,322

Tabelle 5: polierte Probe 1,5%

Aus den Ergebnissen dieses Zählverfahrens kann man schließen, dass n für den ganzen Probekörper sehr genau bestimmt werden kann, aber bei Schwankungen in der Verteilung ist n lokal fehlerhaft (siehe Bild W2). Im Idealfall sollte an allen Seiten des Körpers ein η_φ von 0,5 das Ergebnis sein. Aus der Auswertung ist zu erkennen, dass die meisten Werte deutlich darunter liegen. Diese Ergebnisse begründen sich aus einer verminderten Anzahl der Fasern in den Schnittflächen. Die Ursache für diese verminderte Faseranzahl, bzw. lokale Orientierung der Fasern bei beinahe allen Schnittflächen konnte bis jetzt nicht gefunden werden.

Vergleich der Ergebnisse von geschnittenen und polierten Proben

Der Vergleich der Zählung an gesägten und polierten Körpern zeigt nur eine geringe Abweichung. Dieser Fehler entsteht teilweise beim Zählen, da die gesägten Fasern so stark verschmiert sind, dass zwei oder drei Fasern am Bild oft zu einer verschmelzen. Weiters wurden durch das Polieren der Flächen viele Fasern, die am geschnittenen Körper zu sehen waren, beim Schleifen entfernt und neue Fasern die zuvor noch im Beton waren, wurden sichtbar. Aufgrund dieser Tatsache ist ein direkter Vergleich nicht aussagekräftig.

6.3 Bestimmung der Faserorientierung mittels Drei-Bild-Auswertung

6.3.1 Faserauswahl

Faserauswahl „ALT“ = Diese Faserauswahl wird im Matlab Skript, welches zur Faserorientierungsbestimmung an einer Schnittfläche eingesetzt wird, verwendet. Alle Fasern bis auf zu große, zu kleine oder sehr unförmige werden zur Auswertung herangezogen.

Faserauswahl „NEU“ = Je Probenfläche werden nur jene Fasern der Faserauswahl „ALT“ ausgewertet, welche den kleinsten Winkel zu den drei Achsen auf der Achse normal zur Probenfläche besitzen (Siehe Abbildung 7).

6.3.2 Orientierungen bei der Drei-Bild-Auswertung

In der Abbildung 31 sind die drei globalen Achsen (u, v, w) in deren Richtungen die Gesamtorientierungen berechnet werden und die drei lokalen Koordinatensysteme, welche zur Berechnung der Gesamtorientierungen benötigt werden, dargestellt. Diese lokalen Koordinatensysteme dienen der Zuordnung der Faserorientierungen der drei Einzelbilder und werden bei der Auswertung in Matlab benötigt um auf die Gesamtorientierungen zu schließen.

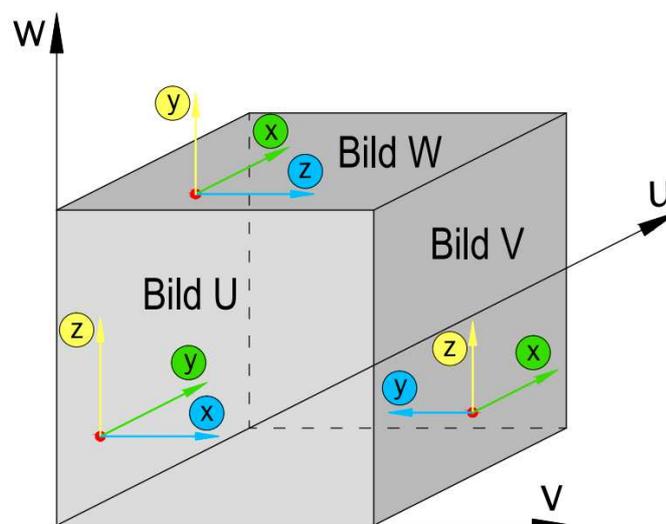


Abbildung 31: Zugehörige Orientierungen

η_x , η_y und η_z sind die Faserorientierungsbeiwerte für die lokalen Koordinatensysteme, welche bei der Berechnung mit dem bereits vorhandenen Matlab Programm ausgegeben werden. Diese sind in der Auswertung bereits den Richtungen u,v und w zugeordnet und dementsprechend als η_u , η_v und η_w bezeichnet. Die Ergebnisse sind nach Auswertung „ALT“ für jede Seite einzeln berechnet. Der neue Korrekturfaktor wird für jede Faser einzeln berechnet und bei beiden Berechnungen („ALT“ = Auswertung an einer Schnittfläche und „NEU“ = Drei-Bild-Auswertung) verwendet.

Es ist bei der Betrachtung der Ergebnisse der Einzelseitenauswertung zu beachten, dass nicht η_x der einen Seite mit η_x der anderen zwei verglichen wird, sondern die jeweilig zugehörigen Orientierungen. In Abbildung 31 werden die zusammengehörigen Orientierungen, welche in der neuen Matlab Programmierung in die drei Gesamtorientierungen zusammengefasst werden, farblich dargestellt. Die drei grünen Pfeile entsprechen der Kombination für die Gesamtorientierung in U-Richtung (η_{uges}), die blauen in V-Richtung (η_{vges}) und die gelben in W-Richtung (η_{wges}).

Bei der Auswertung von allen drei Seiten kombiniert, wird (wie in 4.3 erläutert) nur ein gewisser Teil der Fasern je Seite ausgewertet, damit jede Faser im Volumen genau einmal gezählt wird.

6.3.3 Referenzprobekörper

In Kapitel 6.2 wurde an den Referenzproben bereits die Faserorientierung durch Auszählen der Fasern bestimmt. Hier erfolgt nun die Auswertung mittels Programm. Diese Auswertung erfolgt einmal am sägerauen und einmal am polierten Körper. Die Computerauswertung „Gesamtauswertung“ liefert durch die Verbesserungen gegenüber der Auswertung an nur einer Schnittfläche genauere Ergebnisse an der polierten Probe, welche später mit den Ergebnissen der Handzählung und der sägerauen Auswertung verglichen werden.

6.3.4 Schwankungen in den Schnittflächen

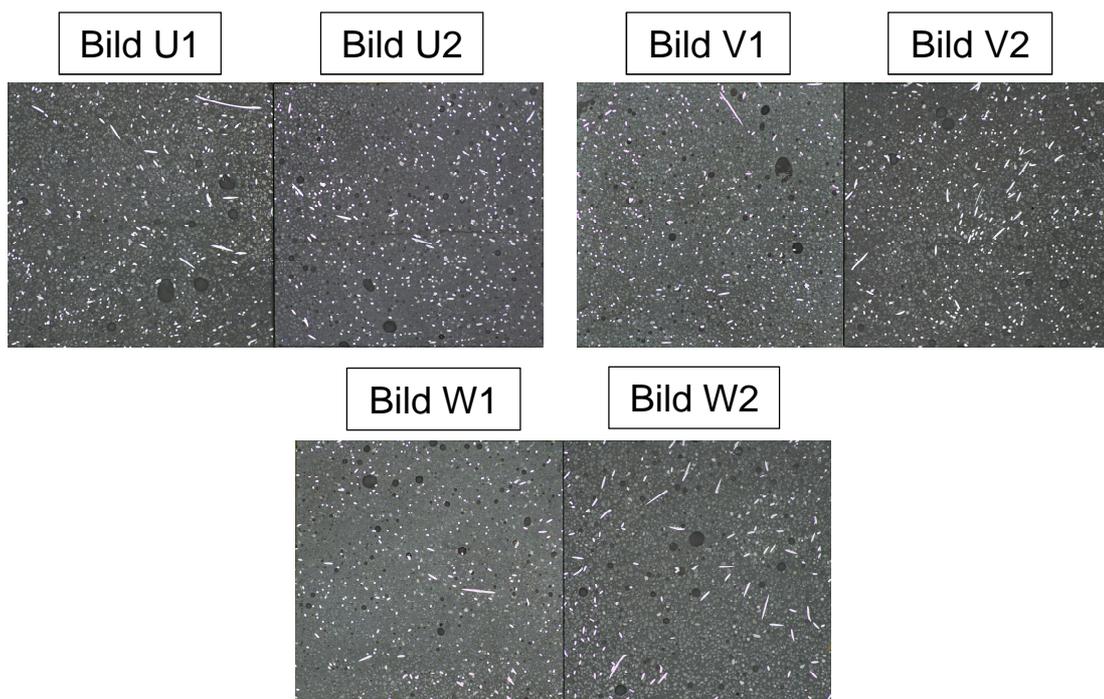


Abbildung 32: Darstellung und Benennung der 6 Referenzprobeseiten (2 % Fasergehalt)

Vergleicht man die Bilder der gegenüber liegenden Seiten, sind starke Schwankungen in der Faseranzahl schon mit bloßem Auge erkennbar. Theoretisch müssten alle sechs Seiten annähernd dieselbe Anzahl an geschnittenen Fasern aufweisen. Die Drei bei der Auswertung zusammengehörigen Seiten der beiden Referenzprobekörper werden mit U1, V1, W1 und die gegenüberliegenden zusammengehörigen mit U2, V2 und W2 bezeichnet. In Abbildung 32 sind die drei Seiten mit deren Rückwertigen der 2 %igen polierten Probe dargestellt. Am deutlichsten ist der Unterschied der Faseranzahl an den Seiten W1 und W2 zu erkennen. Während in W1 viele Fasern gleichmäßig über die Fläche geschnitten sind sieht man in W2 eine deutlich geringere Anzahl die unregelmäßig über die Fläche verteilt ist. Diese große Abweichung ist nur mit einem Faserabsetzen beim Betoniervorgang zu erklären.

6.3.5 Lage der Bilder am Referenzprobekörper

Anhand eines aufgefalteten Würfels sind hier die Bilder an der Oberfläche in ihrer Lage eingezeichnet.

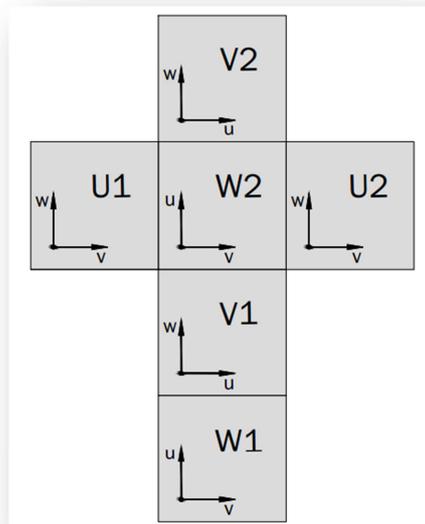


Abbildung 33: Oberfläche Referenzprobekörper

6.3.6 Referenzprobeauswertung (2 % Fasergehalt)

Durch starke Streuungen, die in den Einzelflächen auftreten ist eine Auswertung von nur einer Fläche mit großer Ungenauigkeit behaftet. Bei der Auswertung der sägerauen Probe sind die Seiten U1, V1 und W1 zusammen ausgewertet und anschließend die Seiten U2, V2 und W2. Bei der polierten Probe sind die acht möglichen Kombinationen gebildet und ausgewertet worden.

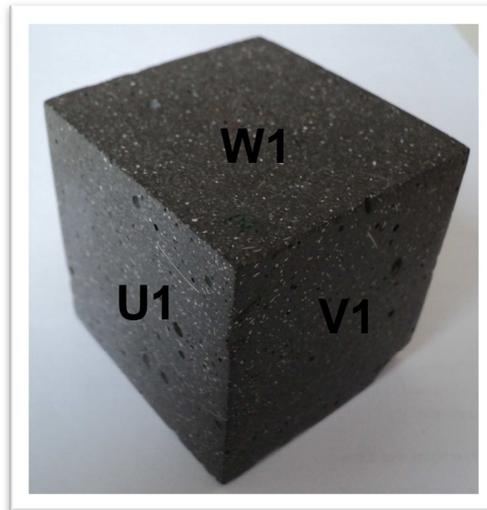


Abbildung 34: Referenzprobekörper 2 %

Bei allen folgenden Tabellen der Auswertung entsprechen η_u , η_v , und η_w der Gesamtfaserorientierung einer Schnittfläche und η_{uges} , η_{vges} , und η_{wges} den Ergebnissen der Drei-Bild-Auswertung.

Referenzprobekörper sägerau

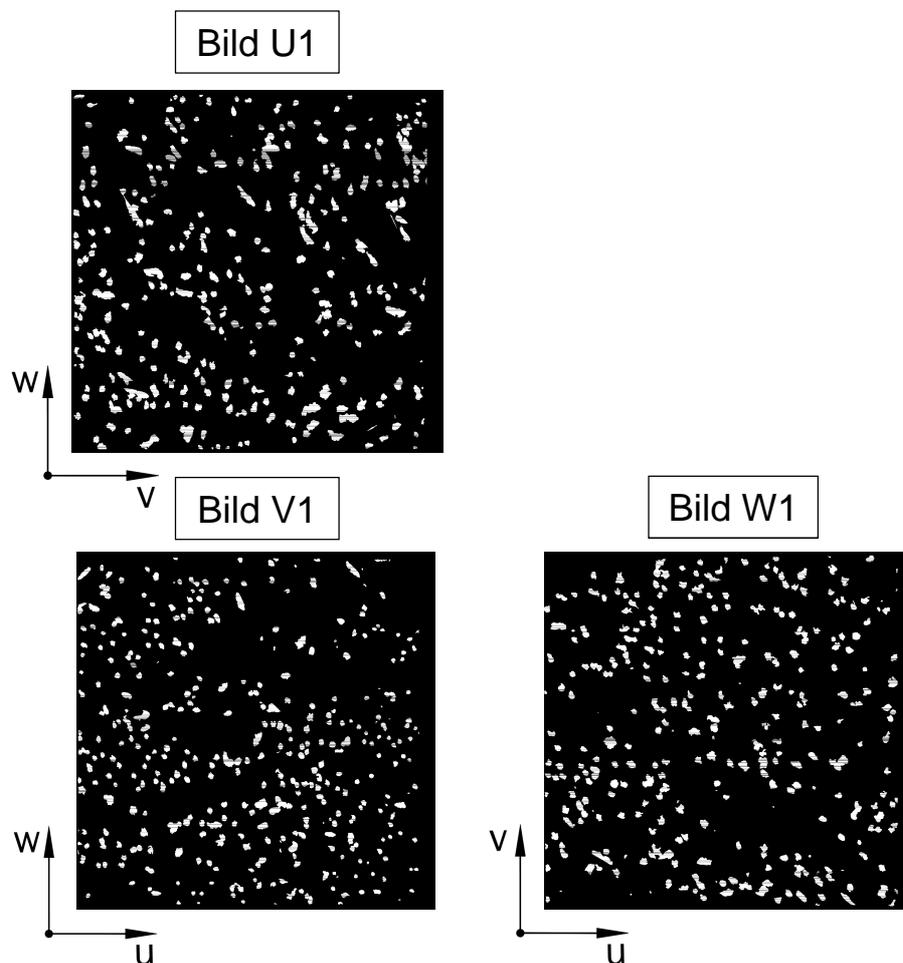


Abbildung 35: Binäre schwarz weiß Bilder U1, V1 und W1 des 2 %igen Probekörpers (sägerau)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 2%_U1	263	41	0,3397	0,4934	0,6621
Referenzprobe 2%_V1	326	113	0,5119	0,4602	0,5787
Referenzprobe 2%_W1	266	40	0,5740	0,5893	0,3851
Referenzprobe 2%_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	194		0,4900	0,5978	0,5152

Tabelle 6: Auswertung der Referenzprobe 2 % (U1, V1, W1)

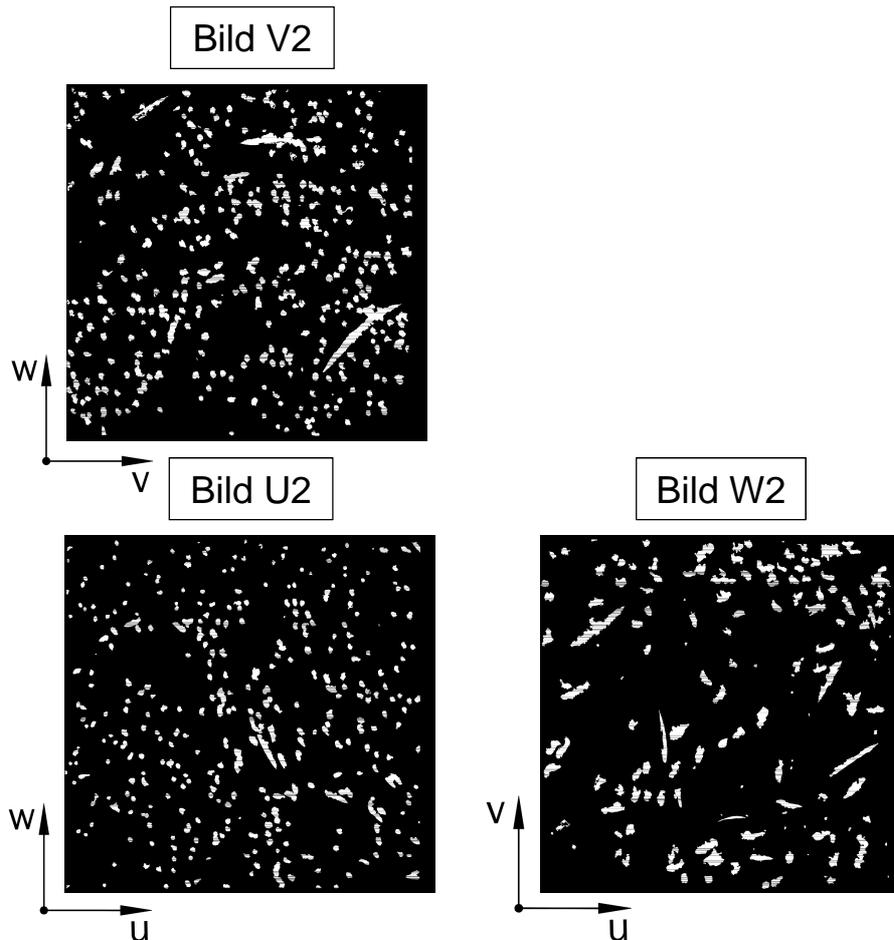


Abbildung 36: Binäre schwarz weiß Bilder U2, V2 und W2 des 2 %igen Probekörpers (sägerau)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 2%_V2	319	57	0,4567	0,4242	0,6529
Referenzprobe 2%_U2	300	92	0,3826	0,4862	0,6421
Referenzprobe 2%_W2	129	14	0,6140	0,6183	0,2034
Referenzprobe 2%_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	163		0,6033	0,5150	0,4882

Tabelle 7: Auswertung der Referenzprobe 2 % (U2, V2, W2)

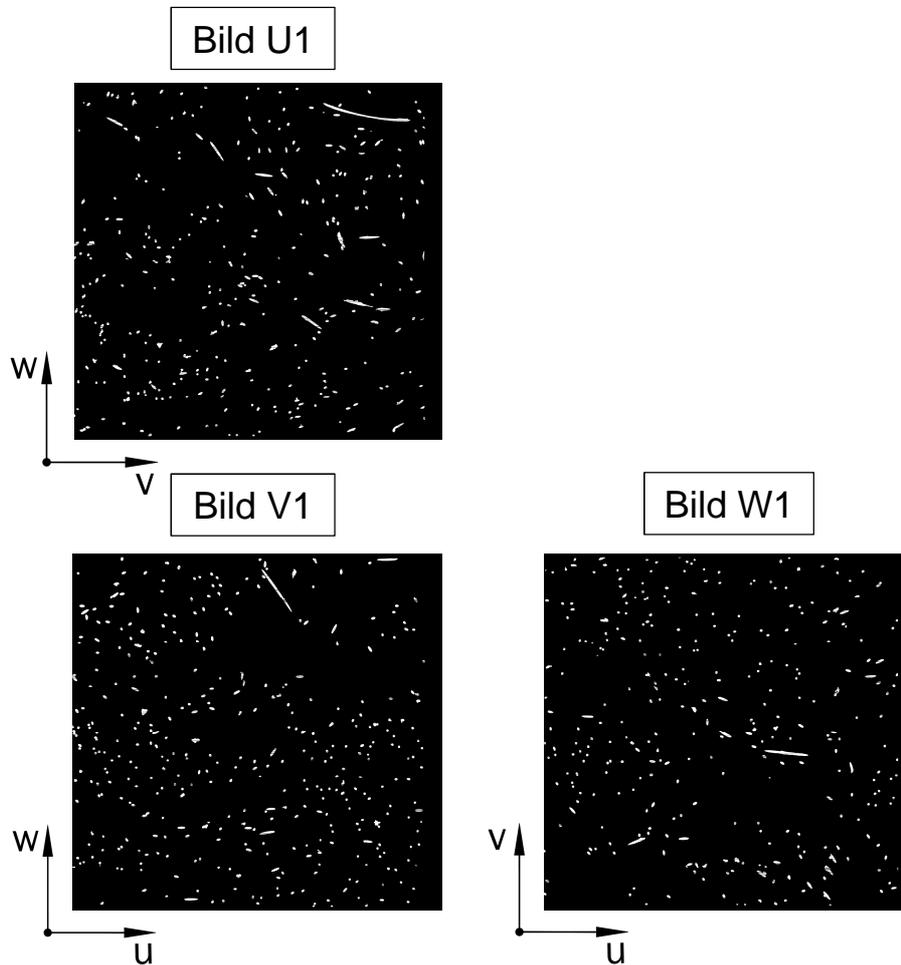
Referenzprobekörper poliert


Abbildung 37: Binäre schwarz weiß Bilder U1, V1 und W1 des 2 %igen Probekörpers (poliert)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 2%_U1	274	129	0,5089	0,5651	0,4559
Referenzprobe 2%_V1	370	241	0,5263	0,5993	0,4021
Referenzprobe 2%_W1	291	187	0,5300	0,3718	0,6019
Referenzprobe 2%_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	557		0,4602	0,5383	0,5253

Tabelle 8: Auswertung der Referenzprobe 2 % (U1, V1, W1)

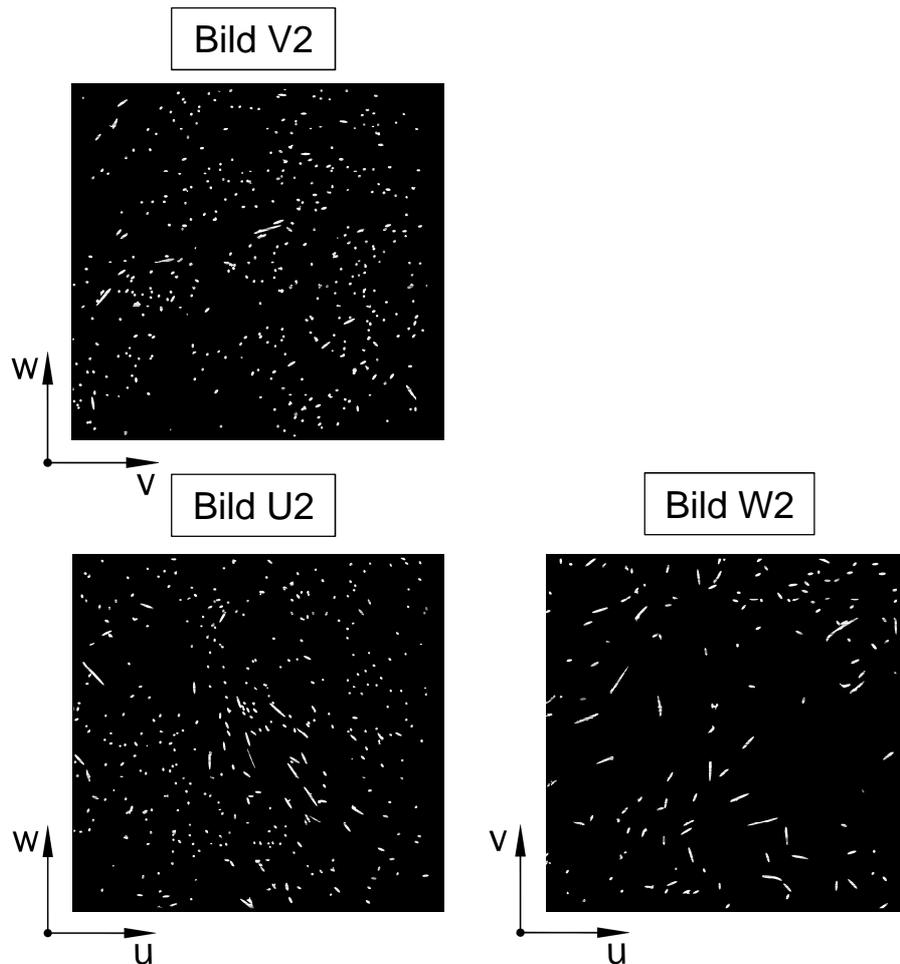


Abbildung 38: Binäre schwarz weiß Bilder U2, V2 und W2 des 2 %igen Probekörpers (poliert)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 2%_V2	326	251	0,4871	0,5334	0,5345
Referenzprobe 2%_U2	373	182	0,6159	0,5110	0,3980
Referenzprobe 2%_W2	120	12	0,6338	0,5693	0,2718
Referenzprobe 2%_“NEU“		$\sum m_{neu}$	η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		445	0,5259	0,6180	0,3894

Tabelle 9: Auswertung der Referenzprobe 2 % (U2, V2, W2)

Die folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse weiterer möglicher Kombinationen der Dreiseitenauswertung an der polierten 2 %igen Probe.

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 2%_V1	370	241	0,5263	0,5993	0,4021
Referenzprobe 2%_U2	373	248	0,6156	0,5118	0,3978
Referenzprobe 2%_W1	292	187	0,5316	0,3703	0,6012
Referenzprobe 2%_“NEU“		$\sum m_{neu}$	η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		676	0,5281	0,4992	0,4905

Tabelle 10: Auswertung der Referenzprobe 2 % poliert (V1, U2, W1)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 2%_U2	373	248	0,6156	0,5118	0,3978
Referenzprobe 2%_V2	324	182	0,4832	0,5362	0,5354
Referenzprobe 2%_W1	291	187	0,5302	0,3700	0,6020
Referenzprobe 2%_“NEU“		$\sum m_{neu}$	η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		617	0,5363	0,4677	0,5145

Tabelle 11: Auswertung der Referenzprobe 2 % poliert (U2, V2, W1)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 2%_V2	324	182	0,4832	0,5362	0,5354
Referenzprobe 2%_U1	274	129	0,5089	0,5651	0,4559
Referenzprobe 2%_W1	291	187	0,5305	0,3692	0,6021
Referenzprobe 2%_“NEU“		$\sum m_{neu}$	η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		498	0,5036	0,4626	0,5586

Tabelle 12: Auswertung der Referenzprobe 2 % poliert (V2, U1, W1)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 2%_U1	273	129	0,5102	0,5631	0,4559
Referenzprobe 2%_V2	326	182	0,4871	0,5334	0,5345
Referenzprobe 2%_W2	121	13	0,6308	0,5712	0,2729
Referenzprobe 2%_“NEU“		$\sum m_{neu}$	η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		444	0,5324	0,6029	0,4128

Tabelle 13: Auswertung der Referenzprobe 2 % poliert (U1, V2, W2)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 2%_U2	373	251	0,6159	0,5110	0,3980
Referenzprobe 2%_V1	370	242	0,5259	0,5994	0,4021
Referenzprobe 2%_W2	120	13	0,6336	0,5695	0,2717
Referenzprobe 2%_“NEU“		$\sum m_{neu}$	η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		506	0,5959	0,5618	0,3731

Tabelle 14: Auswertung der Referenzprobe 2 % poliert (U2, V1, W2)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 2%_V1	370	242	0,5259	0,5994	0,4021
Referenzprobe 2%_U1	273	129	0,5102	0,5631	0,4559
Referenzprobe 2%_W2	118	13	0,6457	0,5609	0,2734
Referenzprobe 2%_“NEU“		$\sum m_{neu}$	η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		364	0,5182	0,6376	0,3871

Tabelle 15: Auswertung der Referenzprobe 2 % poliert (V1, U1, W2)

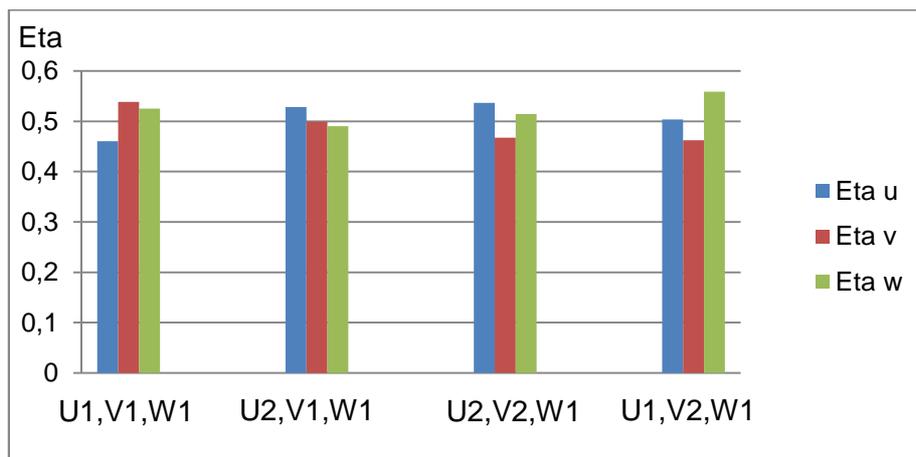


Abbildung 39: Faserorientierungsbeiwerte von 3-Bildauswertungen

An der Abbildung 39 sind die vier Kombinationsmöglichkeiten der Drei-Bild- Auswertung mit den dazugehörigen Gesamtorientierungen gezeigt. Es ist dabei eine annähernd isotrope Faserorientierung ($\eta = 0,5$) aller Kombinationen zu erkennen. Die Kombinationsmöglichkeiten in denen W2 enthalten ist, werden durch die großen Abweichungen in dieser Schnittfläche (womöglich durch Faserabsetzen) nicht dargestellt.

6.3.7 Referenzprobekörperauswertung (1,5 % Fasergehalt)

Referenzprobekörper sägerau

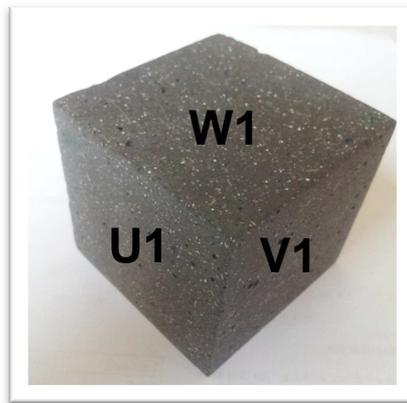


Abbildung 40: Referenzprobekörper 1,5 %

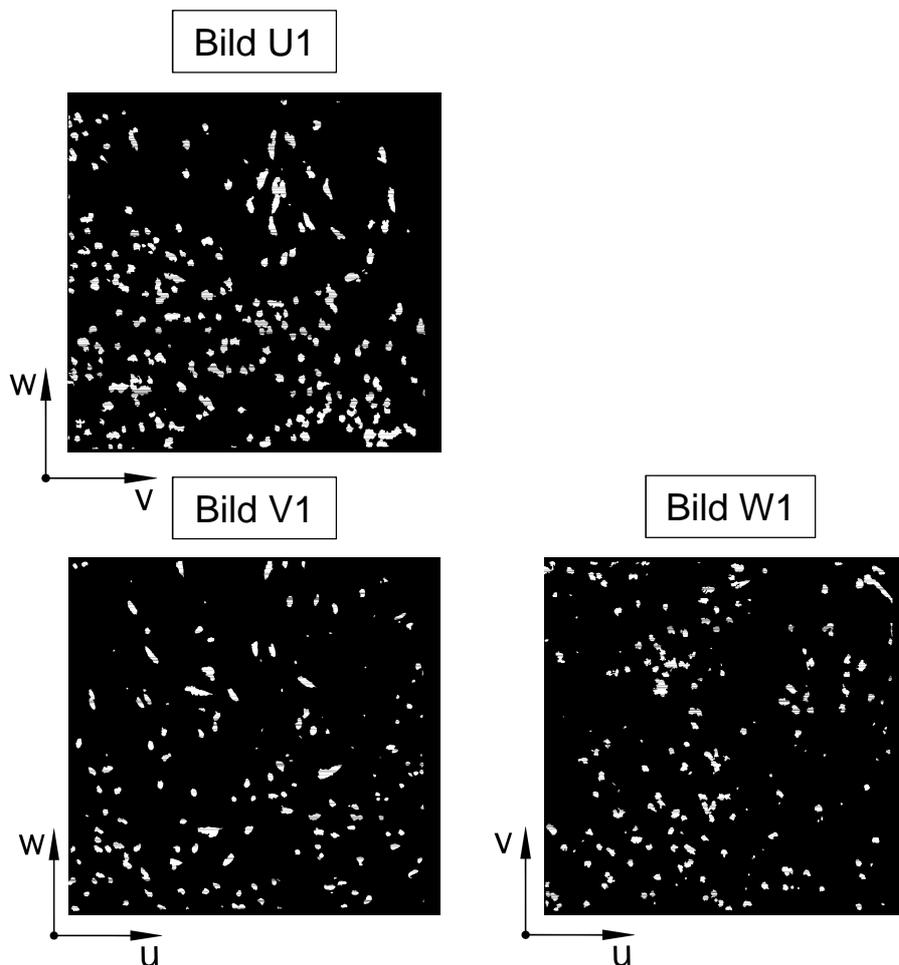


Abbildung 41: Binäre schwarz weiß Bilder U1, V1 und W1 des 1,5 %igen Probekörpers (sägerau)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 1,5%_U1	191	30	0,3171	0,4347	0,7180
Referenzprobe 1,5%_V1	135	18	0,5712	0,3449	0,5877
Referenzprobe 1,5%_W1	148	29	0,5845	0,5547	0,3946
Referenzprobe 1,5%_“NEU“	Σm_{neu}		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		77	0,5618	0,4939	0,5454

Tabelle 16: Auswertung der Referenzprobe 1,5 % (U1, V1, W1)

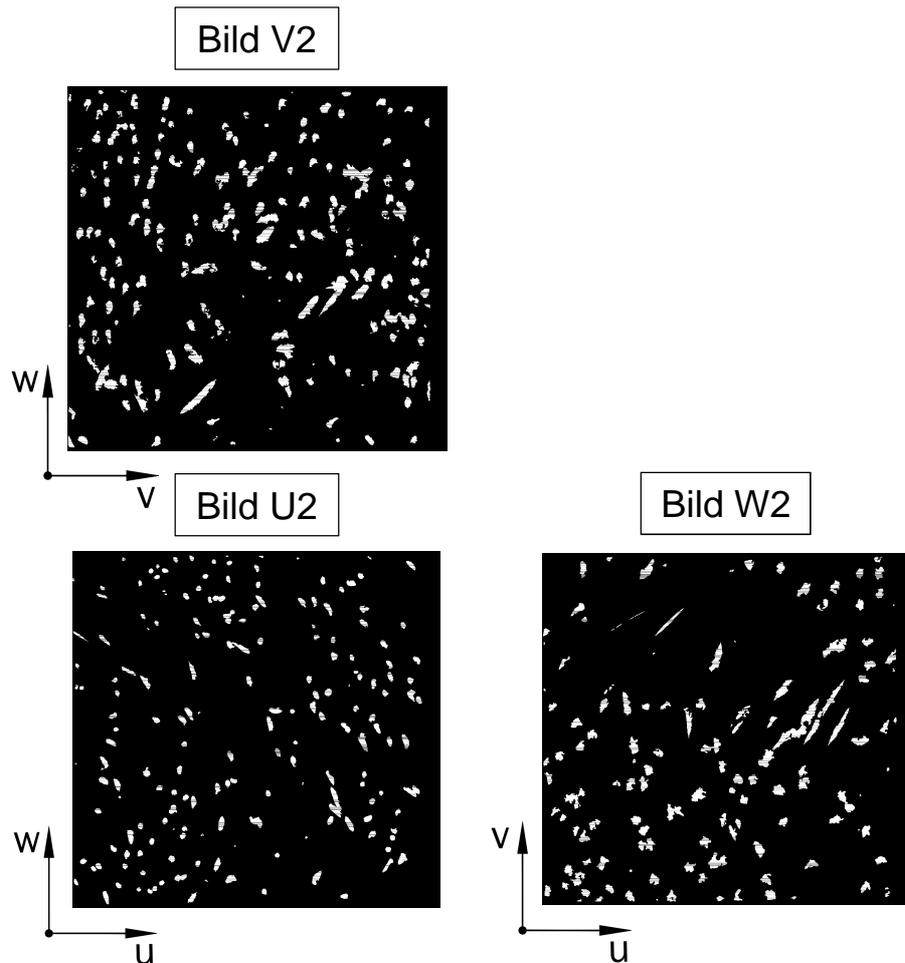


Abbildung 42: Binäre schwarz weiß Bilder U2, V2 und W2 des 1,5 %igen Probekörpers (sägerau)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 1,5%_V2	162	33	0,4875	0,3424	0,6845
Referenzprobe 1,5%_U2	175	16	0,2700	0,4193	0,7634
Referenzprobe 1,5%_W2	118	7	0,5198	0,7210	0,2467
Referenzprobe 1,5%_“NEU“	Σm_{neu}		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		56	0,6083	0,4853	0,4842

Tabelle 17: Auswertung der Referenzprobe 1,5 % sägerau

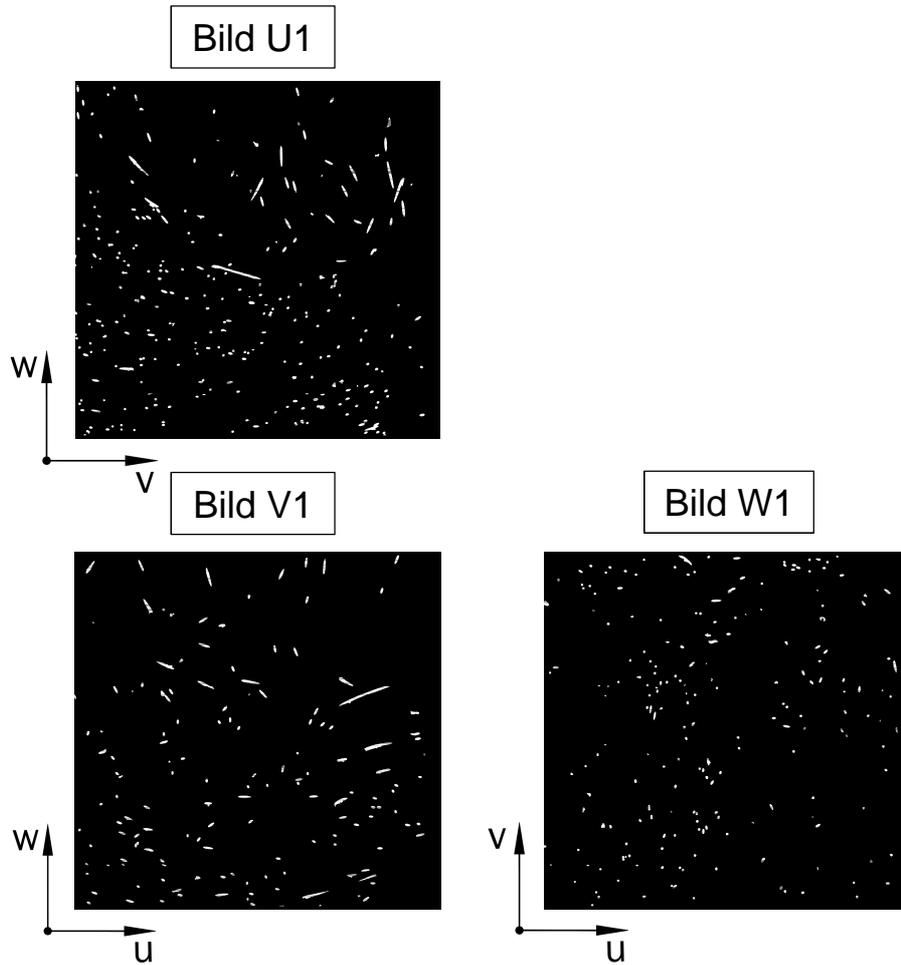
Referenzprobekörper poliert


Abbildung 43: Binäre schwarz weiß Bilder U1, V1 und W1 des 1,5 %igen Probekörpers (poliert)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 1,5%_U1	233	104	0,4737	0,5384	0,4780
Referenzprobe 1,5%_V1	129	21	0,6781	0,3299	0,4702
Referenzprobe 1,5%_W1	172	104	0,4257	0,4407	0,6281
Referenzprobe 1,5%_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	229		0,5465	0,4100	0,5512

Tabelle 18: Auswertung der Referenzprobe 1,5 % poliert (U1, V1, W1)

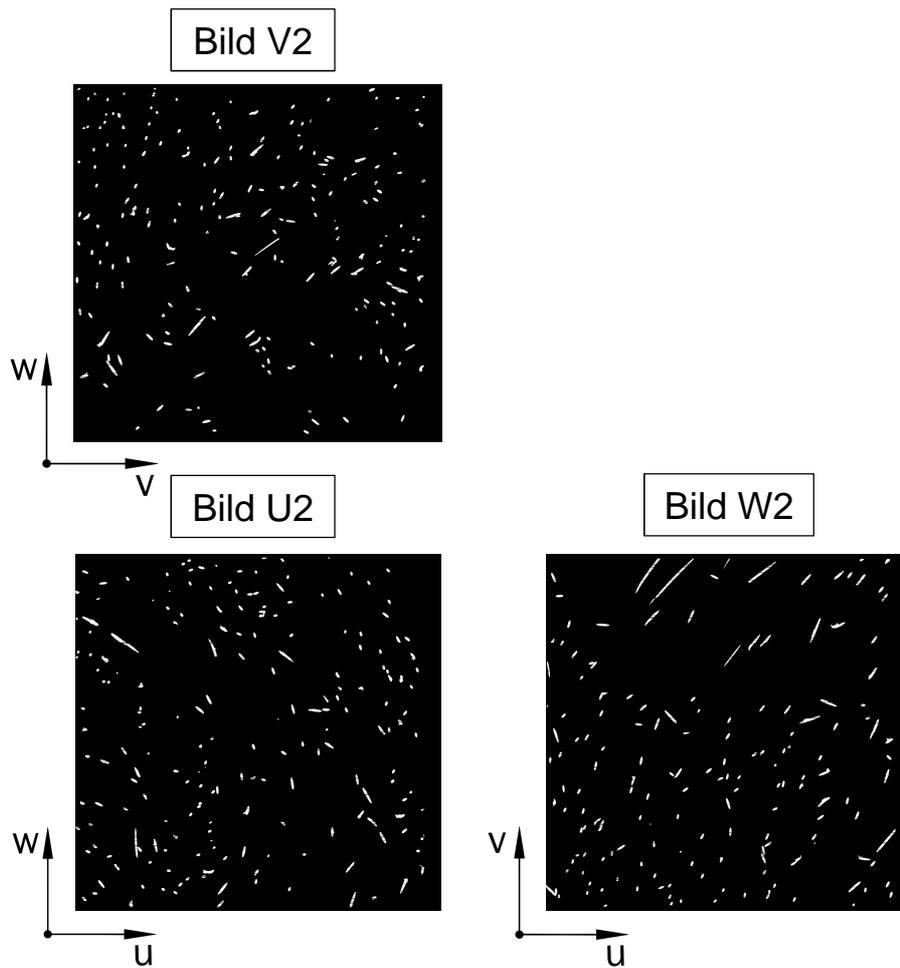


Abbildung 44: Binäre schwarz weiß Bilder U2, V2 und W2 des 1,5 %igen Probekörpers (poliert)

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
Referenzprobe 1,5%_V2	173	21	0,3523	0,5481	0,6313
Referenzprobe 1,5%_U2	174	30	0,5410	0,4050	0,6149
Referenzprobe 1,5%_W2	138	6	0,5113	0,7371	0,2787
Referenzprobe 1,5%_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	57		0,5192	0,5899	0,4951

Tabelle 19: Auswertung der Referenzprobe 1,5 % poliert (U2, V2, W2)

6.4 Vergleich der Ergebnisse

Poliert/Sägerau:

Bei der 2 %igen Probe unterscheiden sich die Faserorientierungsbeiwerte der Einzelflächen der polierten Probe sehr stark von der Einzelflächenauswertung der sägerauen. Die beim Schneiden auftretenden Ausfransungen haben demnach einen starken Einfluss auf die Faserorientierung. Bei der Gesamtorientierung ist der Unterschied zwischen polierter und sägerauer Probe bei der Betrachtung von U1, V1 und W1 mit bis zu 0,05 gering. Bei den Bildern U2, V2 und W2 ergibt die Abweichung aller drei Gesamtorientierungen ca. 0,1 und ist damit schon sehr groß. Diese Ergebnisse zeigen, dass das Bearbeiten der Oberfläche einen großen Einfluss auf die Genauigkeit hat. Bei der Probe mit 1,5 % Faseranteil ist es ähnlich. Polierte und sägeraue Einzelauswertungen streuen sehr stark und bei den Gesamtorientierungen ist wiederum eine Abweichung von bis zu 0,1 zu verzeichnen.

Einzelbilder (poliert) untereinander:

Bei dem Vergleich der Auswertungen der Einzelseiten ist festzustellen, dass es nicht gelungen ist eine homogene Betonage herzustellen, da die Faserorientierungen in Richtung der drei Achsen bei den Bildern sehr stark abweichen.

Handzählung/Software

Es werden nun Handzählung und Auswertung mit der Software am polierten Körper verglichen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die größte Genauigkeit vom Programm erreicht wird. Die anschließend verglichenen Werte sind die Orientierungen normal auf die Probekörperflächen (Handzählung wird mit der Auswertung an einer Schnittfläche verglichen). Das bedeutet, dass z.B. η Handzählung an der Seite U1 mit dem Wert η_u der Seite U1 aus Tabelle 8 verglichen wird. So erhält man die zum Vergleich benötigten Werte aus den Tabellen Tabelle 8 und Tabelle 9.

Bezeichnung	η Handzählung	η Software	Abweichung in %
2%_U1	0,459	0,509	10,9
2%_V1	0,571	0,599	4,9
2%_W1	0,464	0,602	29,7
2%_U2	0,588	0,487	20,7
2%_V2	0,526	0,511	2,9
2%_W2	0,206	0,272	32

Tabelle 20: Vergleich von Handzählung und Softwareauswertung der Probe 2 %

Die Ergebnisse aus der Berechnung der Software zeigen eine deutliche Abweichung von der Handzählung, wie es in Tabelle 20 abzulesen ist. Bei der Handzählung stimmen nur die Werte von Bild V1 und V2 mit dem Ergebnis annähernd überein.

Nun werden die jeweils zusammengehörigen Orientierungen der Handzählung U1, U2; V1, V2; W1; W2 gemittelt und mit den Gesamtorientierungen der Drei-Bild-Auswertung verglichen. Die zum Vergleich benötigten Werte von der Software sind aus der Seitenkombination U1, V1 und W1 aus Tabelle 8 entnommen.

Bezeichnung	η Handzählung gemittelt	η Software U1,V1,W1		Abweichung in %
2%_U1,U2	0,524	η_{uges}	0,460	13,9
2%_V1,V2	0,549	η_{vges}	0,538	2
2%_W1,W2	0,335	η_{wges}	0,525	56,7

Tabelle 21: Vergleich von gemittelter Handzählung und 3-Bildauswertung (U1,V1,W1)

Bei diesen Ergebnissen fällt die Faserorientierung normal zu den Schnittbildern W mit einer Abweichung von mehr als 50 % auf. Diese Abweichung kommt sehr wahrscheinlich durch Faserabsetzen zustande. Bei der Mittelung der Handzählung fließt W2 mit ein und verringert damit den Orientierungsbeiwert. Da bei den Ergebnissen der Software die Seiten U1, V1 und W1 zur Auswertung herangezogen werden, ist an der Softwareauswertung eine isotropere Faserorientierung ersichtlich.

Bezeichnung	η Handzählung gemittelt	η Software U2,V2,W2		Abweichung in %
2%_U1,U2	0,524	η_{uges}	0,523	0,2
2%_V1,V2	0,549	η_{vges}	0,618	12,6
2%_W1,W2	0,335	η_{wges}	0,389	16,1

Tabelle 22: Vergleich von gemittelter Handzählung und 3-Bildauswertung (U2,V2,W2)

In Tabelle 22 ist nun die gemittelte Handzählung mit der Drei-Bild-Auswertung der drei Bilder U2, V2 und W2 (Tabelle 9) verglichen. Es ist durch den Einfluss des Bildes W2 bei der Auswertung der Gesamtorientierungen eine geringere Abweichung von nur 16,1 % abzulesen.

7 Anwendung des Verfahrens der Drei-Bild-Auswertung

Es werden 23 Proben mit dem neuen Verfahren ausgewertet. Folgend werden nun die Ergebnisse der ausgewerteten Probekörper mittels Tabellen dargestellt. Jede der Proben hat eine eindeutige Bezeichnung die in 7.1 erklärt wird. Davon sind 15 Ceracemprobekörper, 6 Stück mit der Fertigmischung von Ductal und 2 Referenzproben.

7.1 Probekörperbezeichnung

Bis auf die zwei Referenzprobekörper unterliegen die Proben einer genauen Bezeichnung.

Erklärung der Bezeichnung anhand eines Beispiels:

FS_C03_2.0_5.0_01

a b c d e f

- a.) FS = Fibre Scan (Projektbezeichnung)
- b.) C = Ceracem, Ductal (UHPC-Mischung)
- c.) 03 = Faserdurchmesser in mm (03 = z.B. 0,3mm)
- d.) 2.0 = Fasergehalt in %
- e.) 5.0 = Bauteildicke in cm
- f.) 01 = Nummerierung

7.2 Untersuchte Probekörper

FS_C03_2.0_10_03	FS_C03_2.0_20_01
FS_C03_2.0_20_03	FS_C03_3.0_5.0_01
FS_C03_1.0_5.0_01	FS_C03_2.0_5.0_02
FS_C03_2.0_5.0_03	FS_C03_2.0_6.0_02
FS_C03_2.0_6.0_03	FS_C03_2.0_6.0_05
FS_C03_2.0_6.0_08	FS_C03_2.0_6.0_09
FS_C03_2.0_6.0_10	FS_C03_2.0_2.5_01
FS_C03_3.0_2.5_06	FS_D_2.0_5.0_01
FS_D_2.0_5.0_02	FS_D_2.0_5.0_03
FS_D_2.0_5.0_04	FS_D_2.0_5.0_05
FS_D_2.0_5.0_06	
Referenzprobe 2 %	Referenzprobe 1,5 %

7.3 Probekörperbeschreibung

Die Biegezugträger im FibreScan-Projekt besitzen alle eine Länge von 70 cm und eine Querschnittshöhe von 15 cm. Sie sind, bis auf die Referenzbiegezugträger der WILD-Brücke und der Ductalproben, diese beiden Arten wurden aus wandartigen Teilen herausgeschnitten, in einer Schalung der Trägergröße betoniert. Die Biegezugträger unterscheiden sich in der Querschnittsstärke, Fasergehalt, Faserdurchmesser und UHPC-Mischung. Die ausgewerteten Probekörper werden aus den geprüften Biegezugträgern entnommen welche daher einen Riss außerhalb der Mitte aufweisen. Aus der noch intakten Seite wurden die Probekörper geschnitten die hier zur Auswertung herangezogen werden. (Seite ohne Biegezugriss) In Abbildung 46 wird die genaue Lage der Probekörper in der intakten Seite beschrieben. Das ist auch deshalb wichtig, da von den jeweiligen Proben nicht das gesamte Volumen sondern nur ein höchstens 5*5*5 cm großes ausgewertet wird. Falls der Riss beim Biegezugversuch genau mittig aufgetreten ist, wird der Prüfkörper nicht halbiert sondern an einer beliebigen Seite neben dem Riss geschnitten.



Abbildung 45: Beispielkörper mit gekennzeichnete intakter Seite zur Entnahme des Probekörpers

Der Probekörper wird folgendermaßen aus den Prüfkörpern herausgeschnitten:

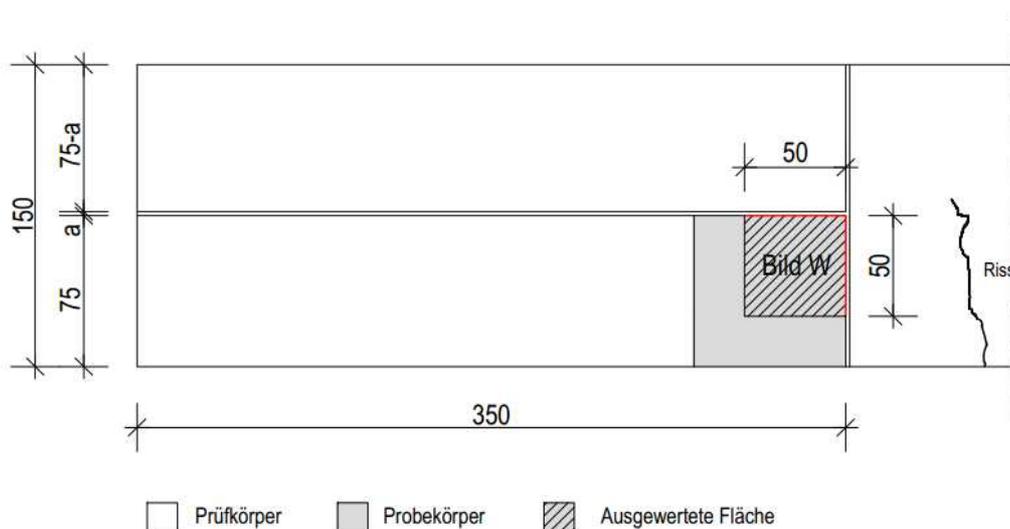


Abbildung 46: Probekörperentnahme

7.4 Probe FS_C03_2.0_10_03

Dieser hergestellte Biegezugträger wurden beim Betoniervorgang stehend befüllt, das bedeutet in Richtung der Achse v , weshalb sich, wie in der Abbildung 49 zu sehen, die Fasern entlang der Achse v ausrichteten. Anhand eines Schnittes in Querrichtung des Prüfkörpers wird hier die Stelle, an der sich der Probekörper befand dargestellt. Zusätzlich sind für das allgemeine Verständnis in Abbildung 31 das globale Koordinatensystem u, v, w und die Position der Bilder U, V, W eingetragen.

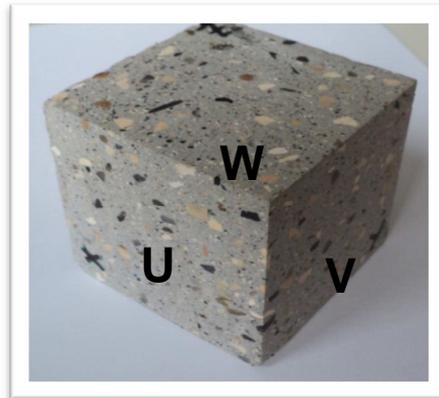


Abbildung 47: Ceracem Typ 1

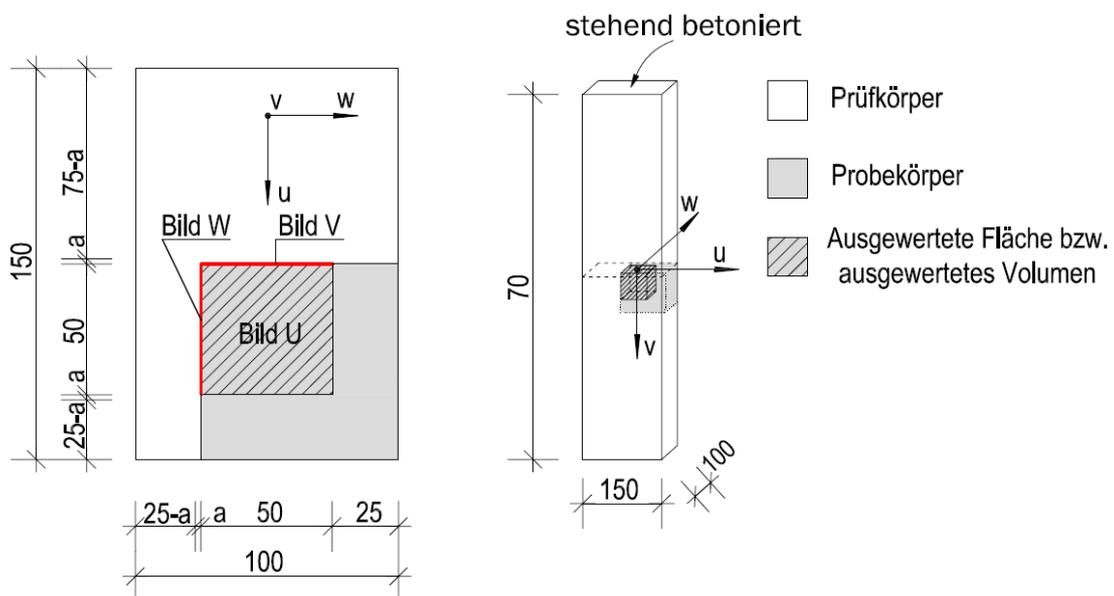


Abbildung 48: Prüfkörper FS_C03_2.0_10_03

Mittels einer Fertigmischung (Ceracem) unter Zugabe von Wasser, Fließmittel und Fasern wurde ein Bauteil mit 10 cm Stärke hergestellt, aus dem ein Probekörper mit den Abmessungen $7,5 \times 7,5 \times 7,5$ cm entnommen wurde. Die Auswertung an diesem Körper erfolgt an den in Abbildung 48 dargestellten Bildern U, V und W . Der ausgewertete Bereich umfasst drei 5×5 cm große Flächen.

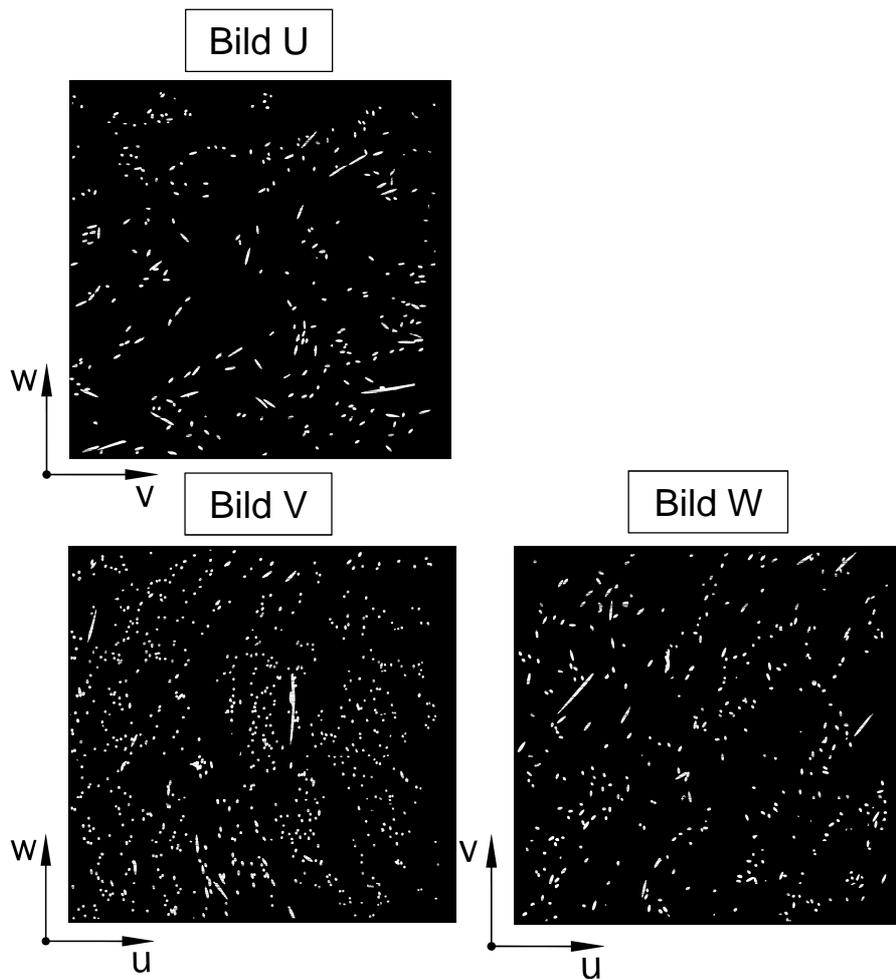


Abbildung 49: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_10_03

An den binären schwarz-weiß Bildern ist eine gewisse Ausrichtung anhand der gezählten Fasern je Seite festzustellen. In Bild V ist eine klassische Längsverteilung zu erkennen. Hauptgrund hierfür ist die Art der Herstellung (stehend betoniert) des Betonkörpers.

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_2.0_10_03_U	263	42	0,3043	0,6847	0,5082
FS_C03_2.0_10_03_V	643	518	0,2994	0,6526	0,5627
FS_C03_2.0_10_03_W	302	94	0,4859	0,6641	0,3876
FS_C03_2.0_10_03 „NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	654		0,3156	0,7529	0,4423

Tabelle 23: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_10_03

Im Ergebnis sieht man, dass die schwächste Ausrichtung der Fasern in u-Richtung und die Stärkste in v-Richtung verläuft.

7.5 Probekörper FS_C03_2.0_20_01/03

Diese Probekörper wurden aus einem Prüfkörper mit der Stärke von 20 cm entnommen. Die Körper wurden, wie schon die Proben zuvor, stehend (Betonflussrichtung entlang der Achse v) betoniert.

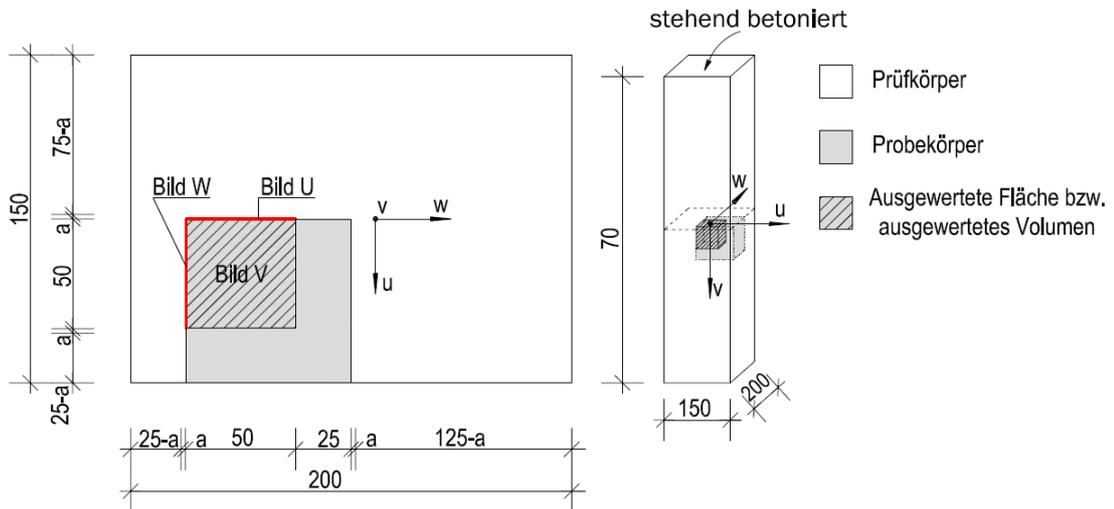


Abbildung 50: Prüfkörper FS_C03_2.0_20_01/03

FS_C03_2.0_20_01

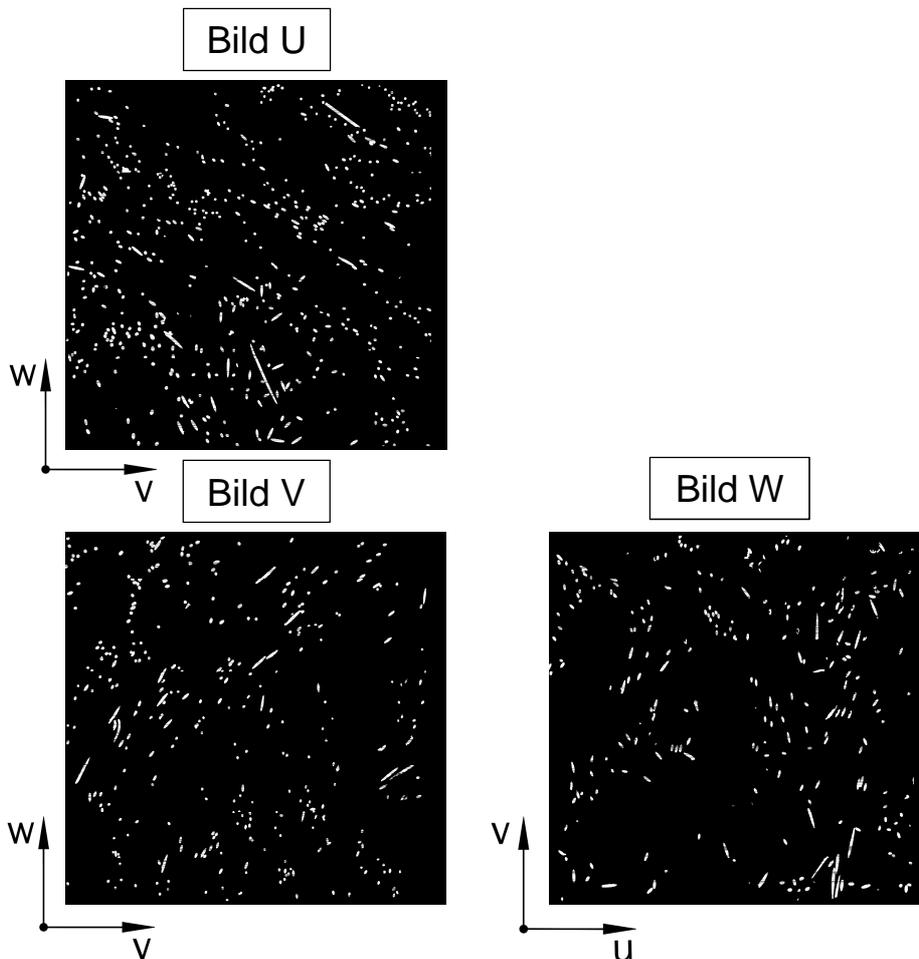


Abbildung 51: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_20_01

An den binären schwarz-weiß Bildern der Probe FS_C03_2.0_20_01 ist eine starke Orientierung der Fasern in der vw-Ebene zu erkennen. Das Bild W zeigt nur wenige geschnittene Fasern. Zusätzlich sind viele der Fasern am Bild W sehr elliptisch abgebildet somit für die Ausrichtung der Fasern in der Ebene (Bild W) spricht. Da dieser Körper stehend betoniert wurde ist die Orientierung in v-Richtung am größten, da sich die Fasern in Fließrichtung ausrichten.

Das an der Abbildung 51 Vermutete bewahrheitet sich bei der Auswertung.

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_2.0_20_01_U	287	150	0,4288	0,4265	0,6706
FS_C03_2.0_20_01_V	447	279	0,5141	0,4975	0,5227
FS_C03_2.0_20_01_W	201	17	0,3863	0,7940	0,2759
FS_C03_2.0_20_01_“NEU“	Σm_{neu}		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	446		0,5137	0,6124	0,4046

Tabelle 24: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_20_01

FS_C03_2.0_20_03

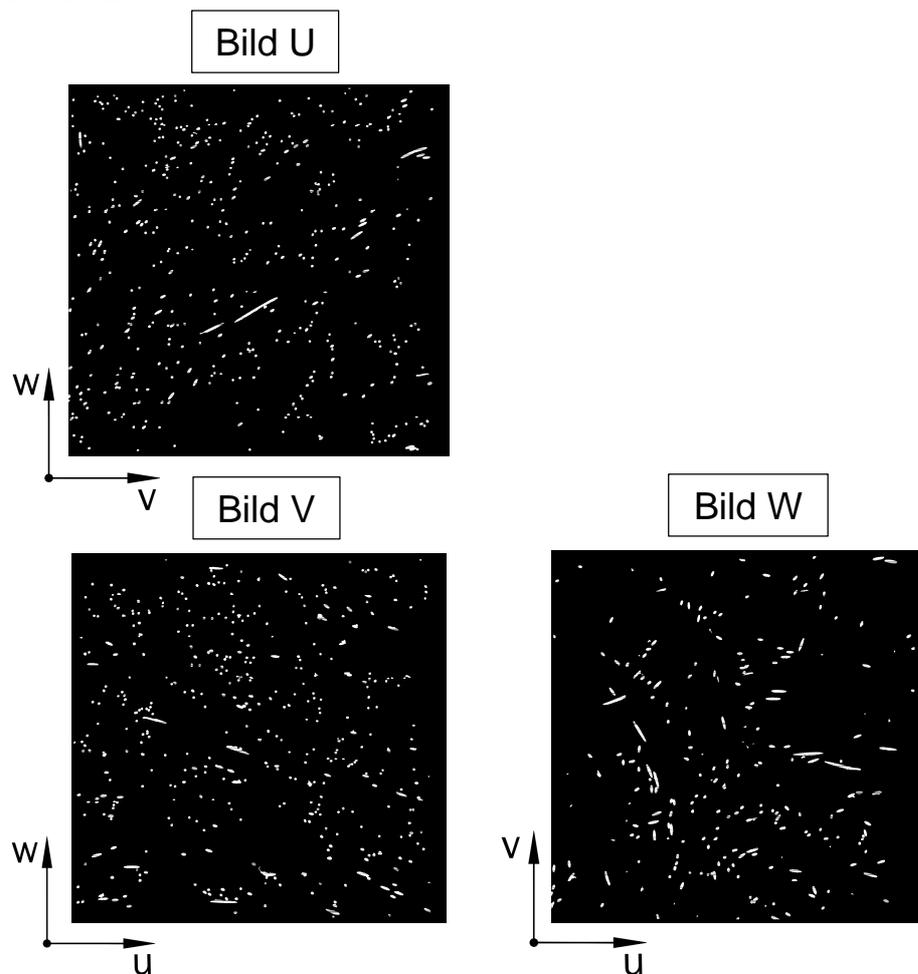


Abbildung 52: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_20_03

In dieser Probe ist ersichtlich, dass Sowohl in u- als auch in v-Richtung eine starke Ausrichtung der Fasern erfolgte. Grund dafür könnte eine inhomogene Mischung sein.

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_2.0_20_03_U	413	304	0,6104	0,5374	0,3945
FS_C03_2.0_20_03_V	372	277	0,6018	0,6062	0,2925
FS_C03_2.0_20_03_W	195	36	0,6530	0,4944	0,3156
FS_C03_2.0_20_03_“NEU“	Σm_{neu}		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		617	0,6055	0,5726	0,3121

Tabelle 25: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_20_03

7.6 Probekörper FS_C03_3.0_5.0_01, FS_C03_1.0_5.0_01, FS_C03_1.0_5.0_01 und FS_C03_2.0_5.0_02/03

Der Probekörper FS_C03_3.0_5.0_01 und FS_C03_1.0_5.0_01 werden stehend, die Probekörper FS_C03_2.0_5.0_02 und FS_C03_2.0_5.0_03 werden liegend betont. Alle vier Proben wurden aus Prüfkörpern mit einer Stärke von 5 cm entnommen.

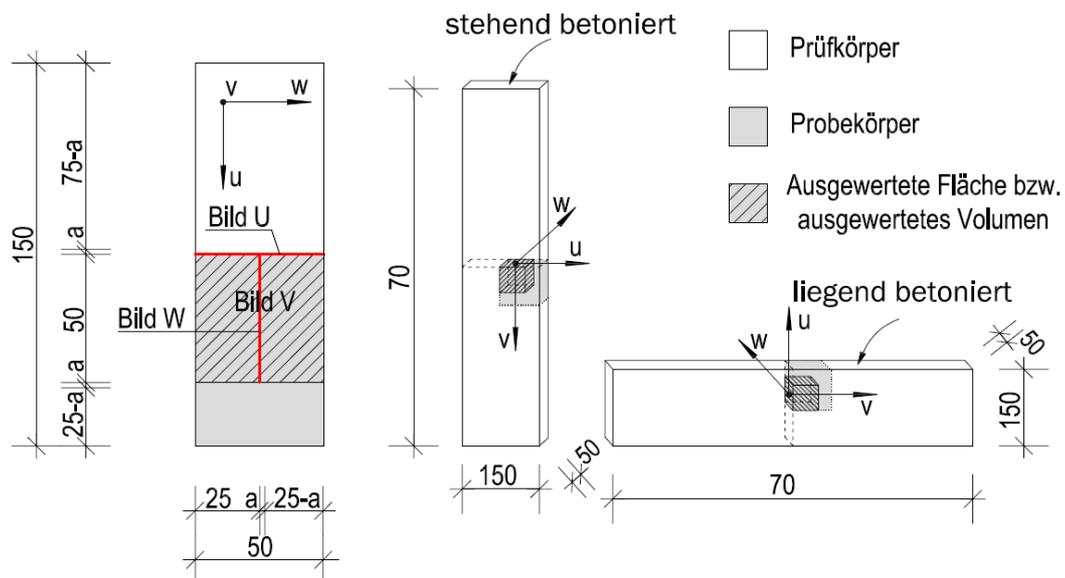


Abbildung 53: Prüfkörper FS_C03_3.0_5.0_01 und FS_C03_2.0_5.0_02/03

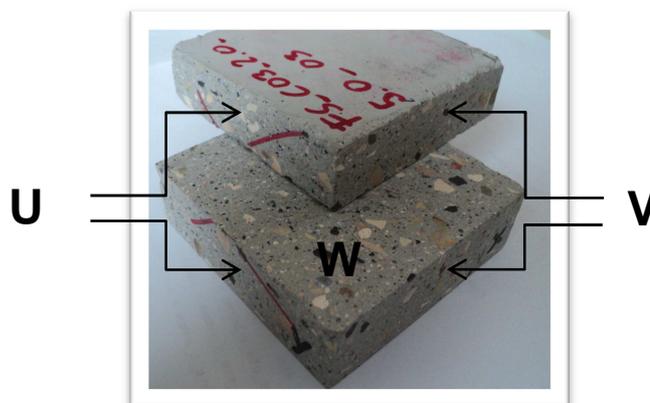


Abbildung 54: Probe Ceracem Typ 2

FS_C03_3.0_5.0_01

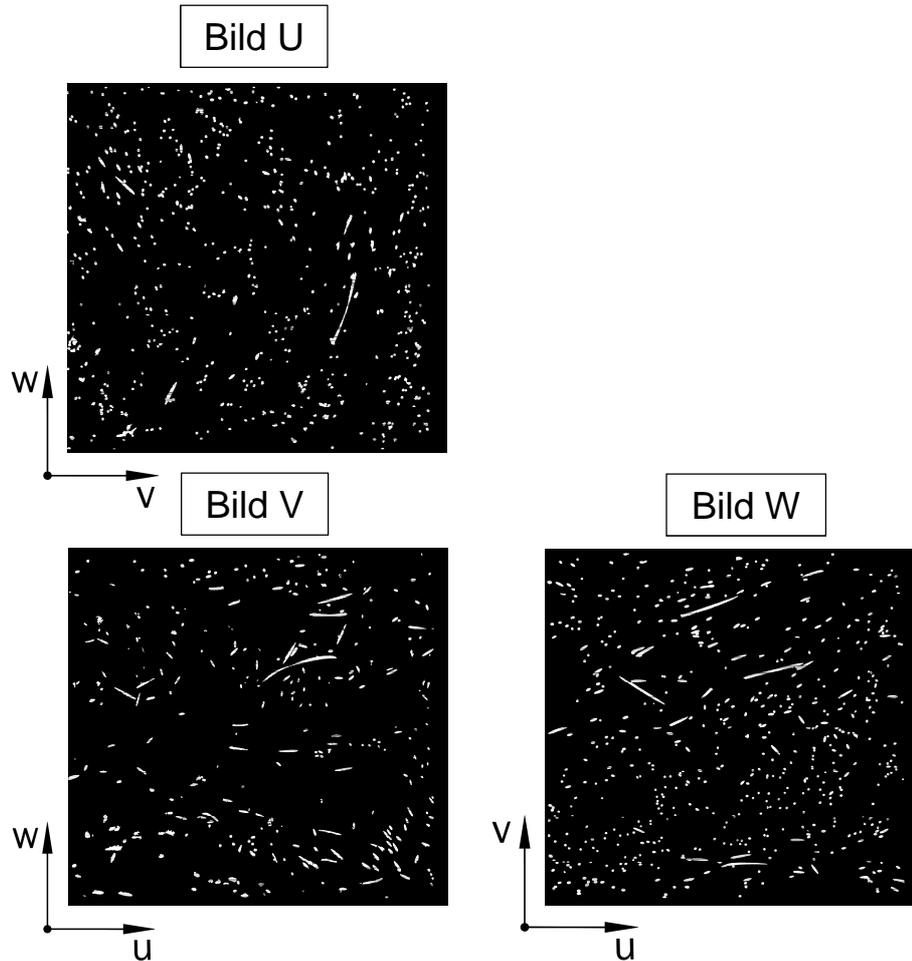


Abbildung 55: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_3.0_5.0_01

Es ist zu erkennen, dass in Bild W weitaus mehr Fasern sind, als im Bild V. Die Ausrichtung in Richtung u erfolgte beim Betonieren, da der Körper nur eine Breite von 5 cm aufweist und sich die Fasern daher in Scheibenrichtung ausrichten. Die unerklärlich starke Ausrichtung der Fasern in Richtung w entspricht nicht dem zu erwartenden Ergebnis. Normalerweise wäre von einer stärkeren Orientierung in v-Richtung und einer Schwächeren in w-Richtung auszugehen.

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_3.0_5.0_01_U	465	334	0,6332	0,4166	0,5034
FS_C03_3.0_5.0_01_V	234	59	0,7634	0,2760	0,3998
FS_C03_3.0_5.0_01_W"	501	286	0,6953	0,3307	0,4658
FS_C03_3.0_5.0_01_“NEU“		$\sum m_{neu}$	η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		679	0,6049	0,3662	0,5425

Tabelle 26: Auswertung der Probe FS_C03_3.0_5.0_01

FS_C03_1.0_5.0_01

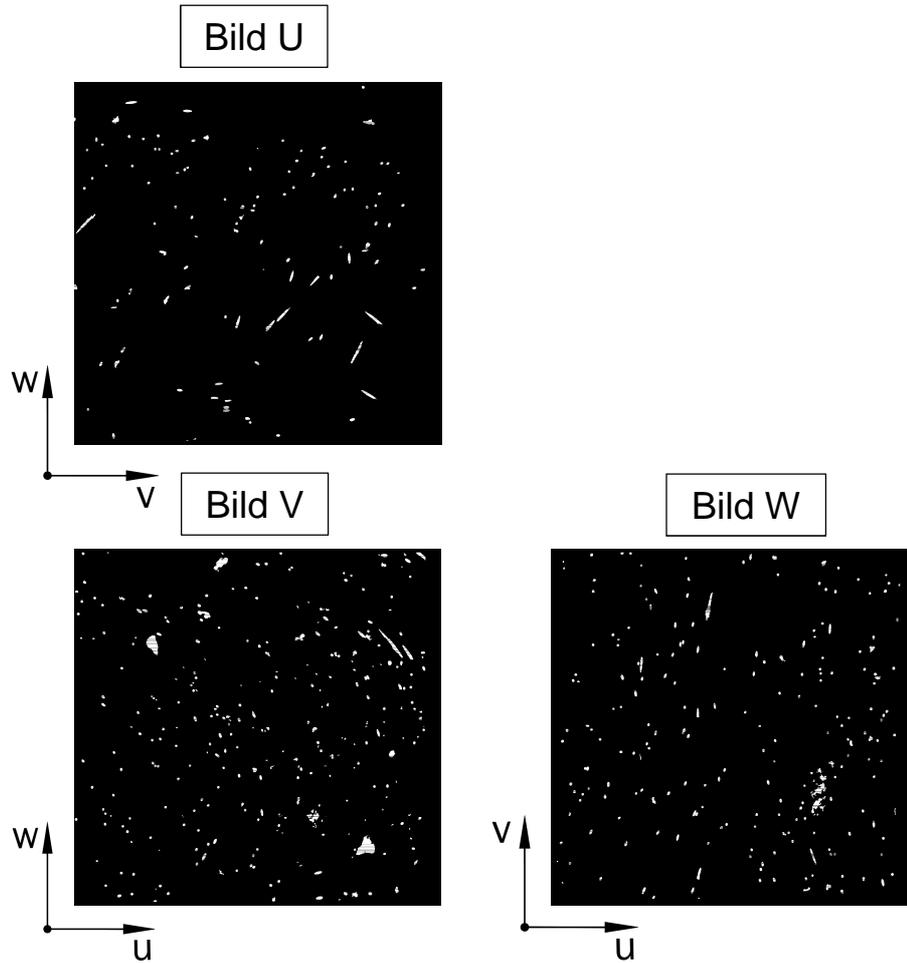


Abbildung 56: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_1.0_5.0_01

Da dieser Körper stehen betoniert wurde, ist eine sehr geringe Faseranzahl in Bild U und die stärkste Orientierung in v-Richtung festzustellen.

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_1.0_5.0_01_U	98	44	0,4171	0,5573	0,5224
FS_C03_1.0_5.0_01_V	196	145	0,4156	0,6394	0,4758
FS_C03_1.0_5.0_01_W"	186	117	0,2088	0,6646	0,6106
FS_C03_1.0_5.0_01_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	306		0,35621051	0,6106568	0,54066973

Tabelle 27: Auswertung der Probe FS_C03_1.0_5.0_01

Die folgenden zwei Probekörper wurden liegend betoniert (Abbildung 53).

FS_C03_2.0_5.0_02

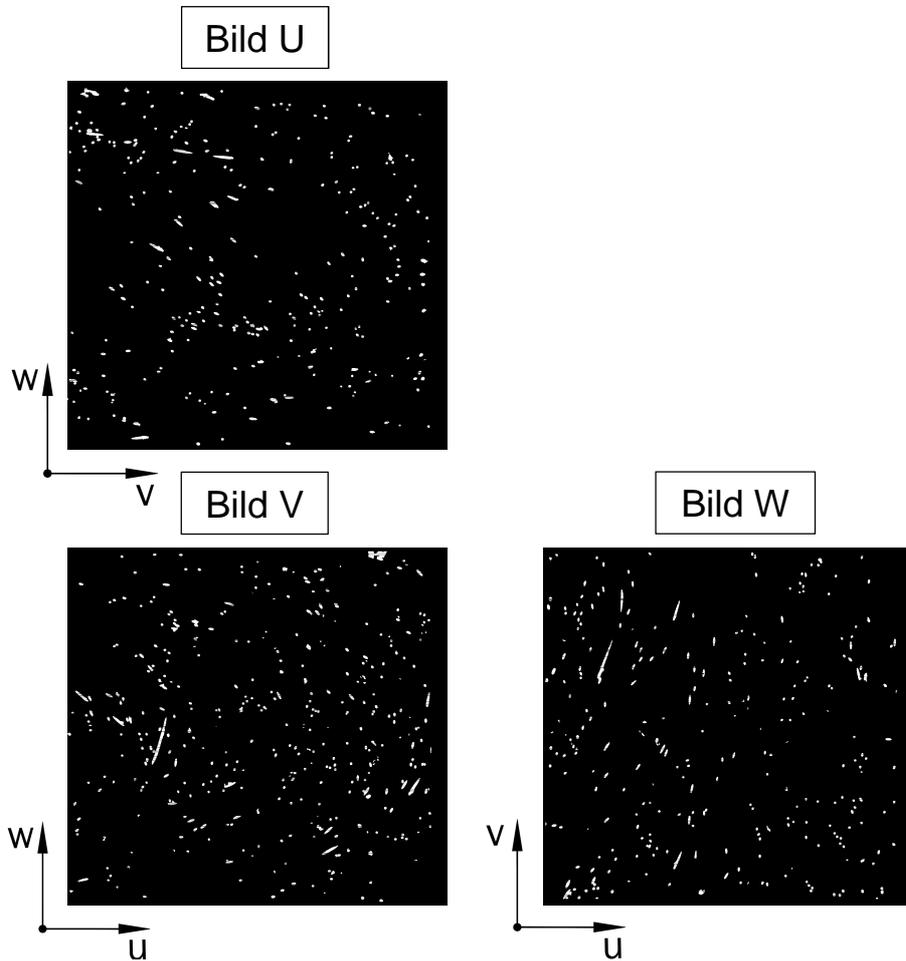


Abbildung 57: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_5.0_02

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_2.0_5.0_02_U	258	173	0,5697	0,6515	0,3039
FS_C03_2.0_5.0_02_V	294	182	0,4588	0,6115	0,4638
FS_C03_2.0_5.0_02_W"	236	125	0,3408	0,5802	0,6207
FS_C03_2.0_5.0_02_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	480		0,4925	0,5861	0,4561

Tabelle 28: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_5.0_02

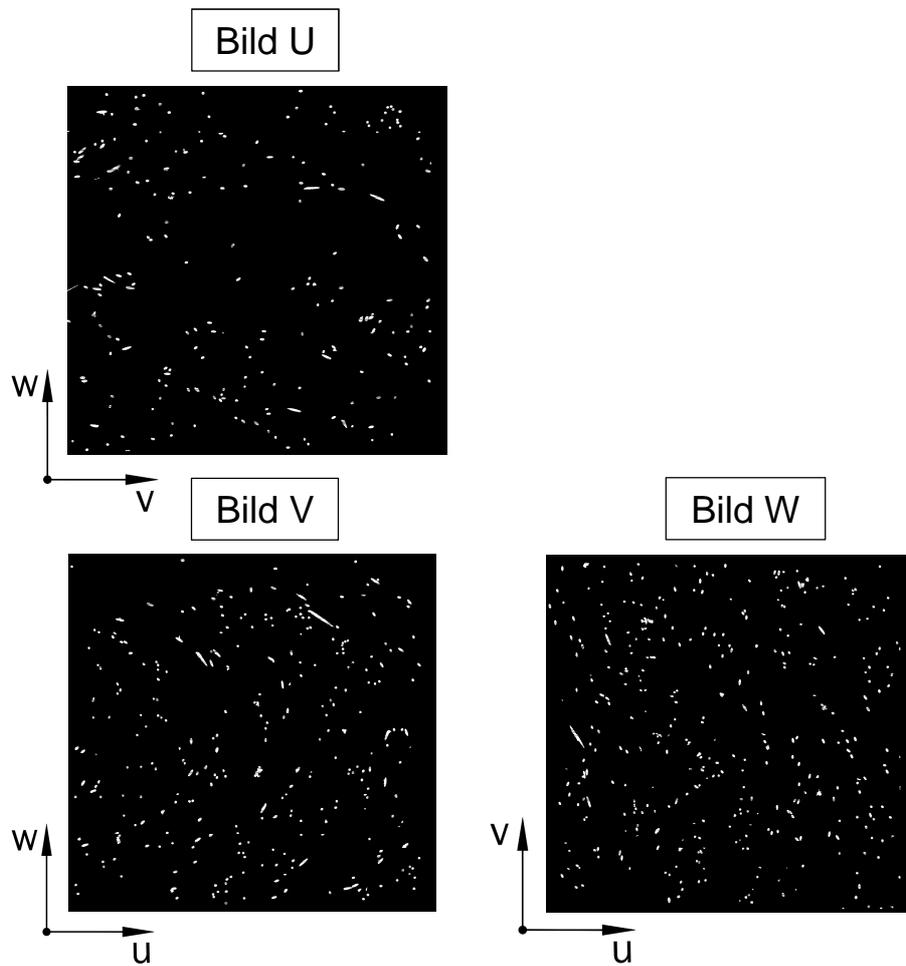
FS_C03_2.0_5.0_03


Abbildung 58: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_5.0_03

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_2.0_5.0_03_U	192	97	0,5697	0,6515	0,3039
FS_C03_2.0_5.0_03_V	269	184	0,4588	0,6115	0,4638
FS_C03_2.0_5.0_03_W"	300	171	0,3408	0,5802	0,6207
FS_C03_2.0_5.0_03_“NEU“		$\sum m_{neu}$	η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		425	0,4278	0,5674	0,5242

Tabelle 29: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_5.0_03

7.7 Probekörper FS_C03_2.0_6.0_02/03/05/08/09/10

Diese Probekörper wurden aus einem der vier Seitenteile des Rohres entnommen, welches beim Referenzversuch für die WILD-Brücke, stehend befüllt hergestellt wurde. Die Biegezugträger sind daher teilweise liegend und teilweise stehend (in Abbildung 59 grau gekennzeichnet) betoniert worden.

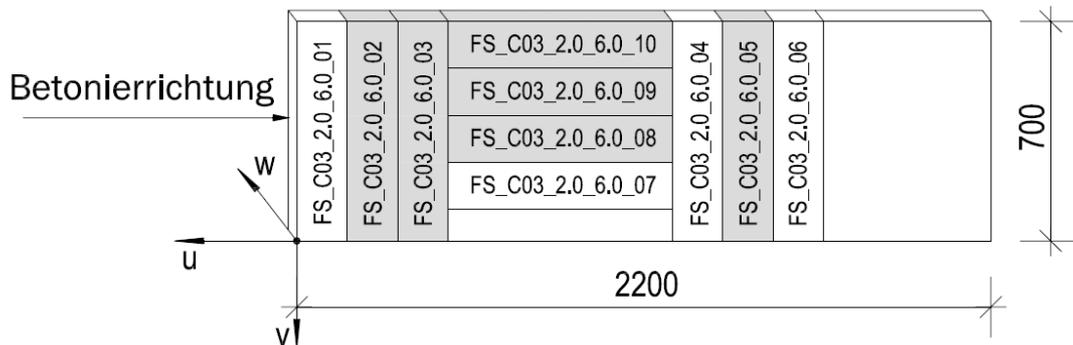


Abbildung 59: Lage der Biegezugproben im Seitenteil

Bei diesen Probekörpern, welche aus nur 6 cm starken Balken entnommen wurden, ist eine eindeutige Orientierung in u- und v-Richtung festzustellen. Die Verteilung der Fasern in diesen Richtungen ist sehr homogen. In Bild Z ist die ausgeprägte Ellipsenbildung zu sehen.

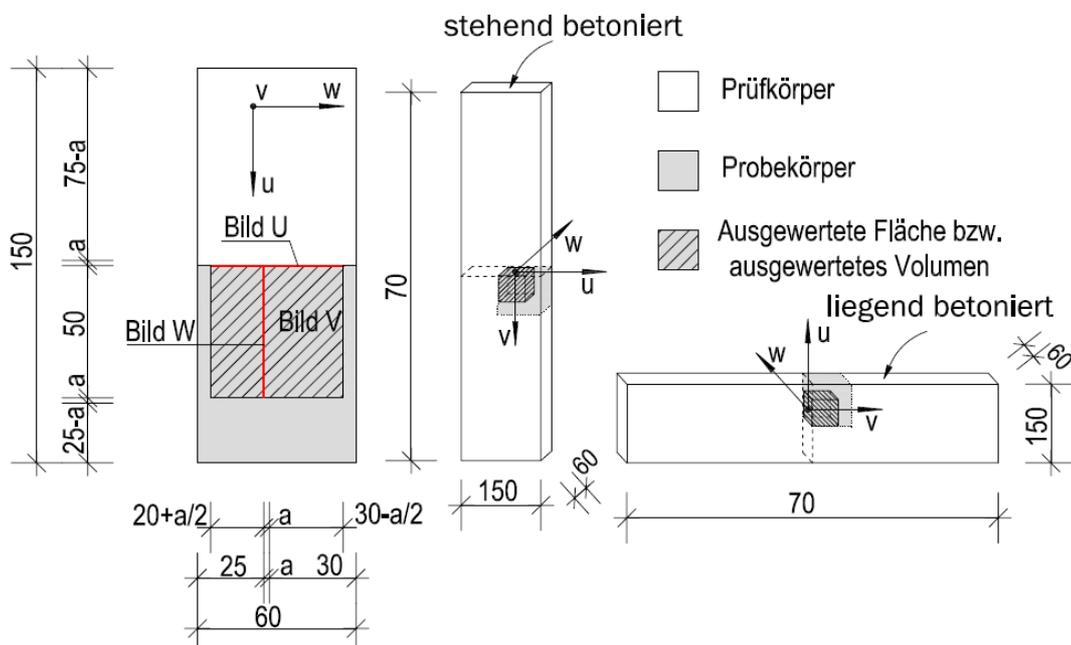


Abbildung 60: Prüfkörper FS_C03_2.0_6.0_02/03/05/08/09/10

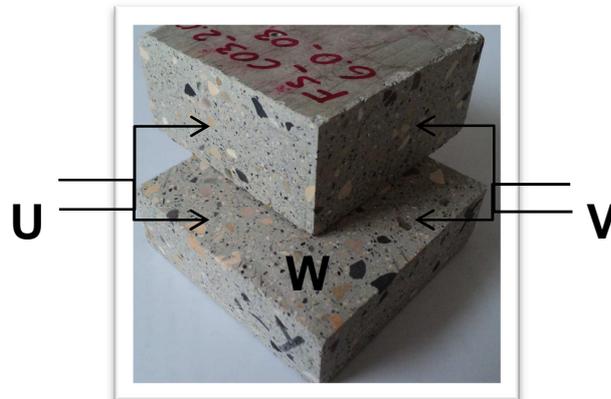


Abbildung 61: Probe Ceracem Typ 3

FS_C03_2.0_6.0_02

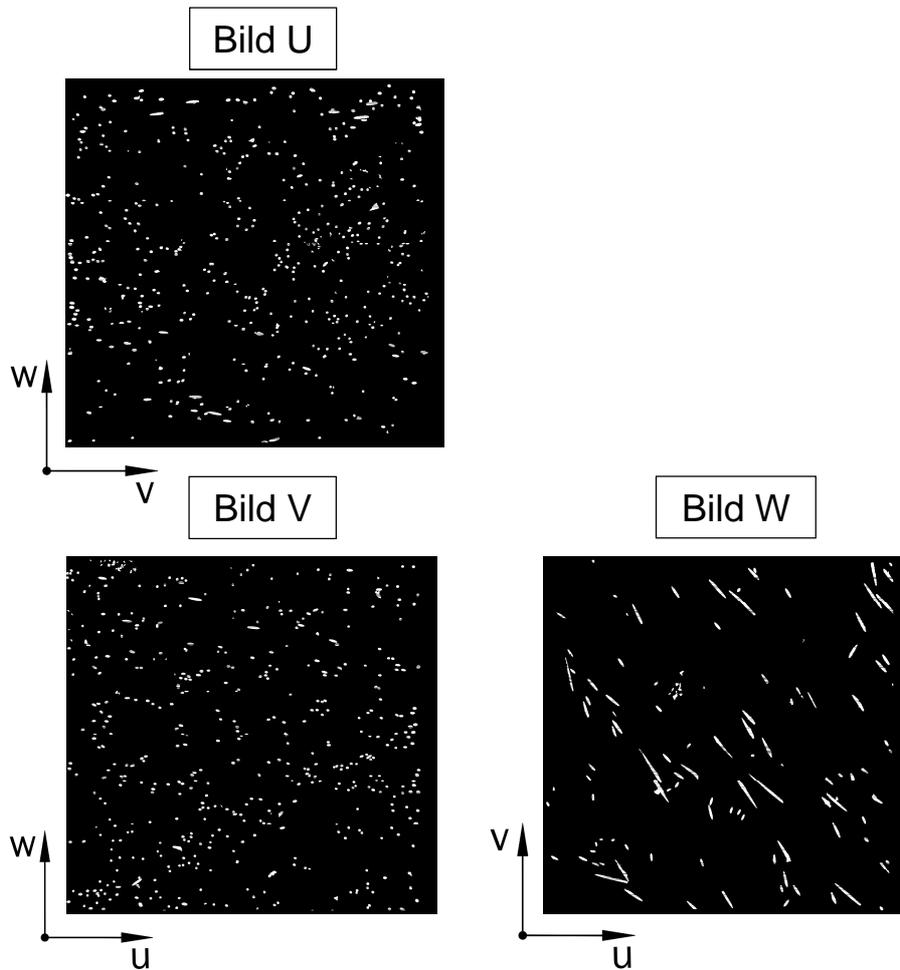


Abbildung 62: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_6.0_02

Bei der Auswertung spiegelt sich das, was sich an den schwarz-weiß Bildern zeigt wieder. Eine ausgeprägte Orientierung der Fasern in u und v-Richtung.

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_2.0_6.0_02_U	418	273	0,6751	0,6336	0,1702
FS_C03_2.0_6.0_02_V	431	240	0,6544	0,6624	0,1760
FS_C03_2.0_6.0_02_W“	96	3	0,5619	0,7475	0,1792
FS_C03_2.0_6.0_02_“NEU“	Σm_{neu}		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	516		0,6610	0,6355	0,2024

Tabelle 30: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_6.0_02

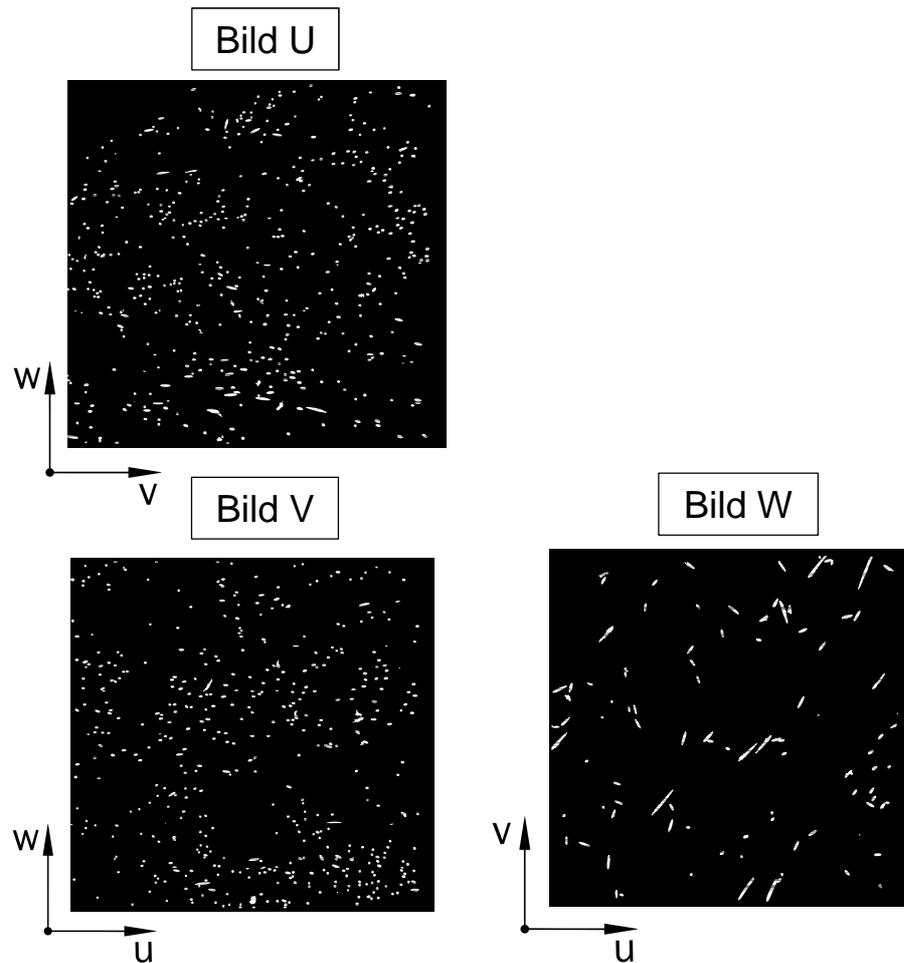
FS_C03_2.0_6.0_03


Abbildung 63: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_6.0_03

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_2.0_6.0_03_U	447	258	0,6164	0,6892	0,1624
FS_C03_2.0_6.0_03_V	430	226	0,6591	0,6485	0,1654
FS_C03_2.0_6.0_03_W“	79	10	0,5620	0,7095	0,2273
FS_C03_2.0_6.0_03_“NEU“	Σm_{neu}		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	494		0,6315	0,6533	0,1912

Tabelle 31: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_6.0_03

FS_C03_2.0_6.0_05

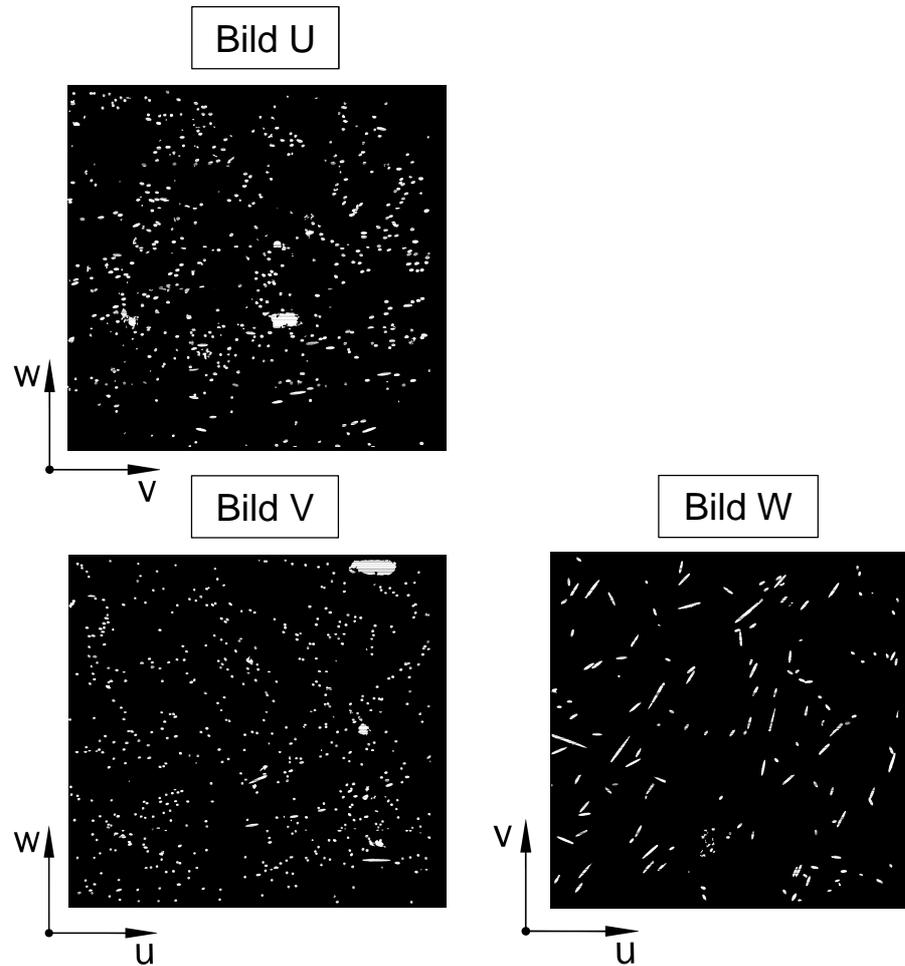


Abbildung 64: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_6.0_05

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_2.0_6.0_05_U	397	168	0,5813	0,7142	0,2017
FS_C03_2.0_6.0_05_V	503	432	0,5040	0,7602	0,2191
FS_C03_2.0_6.0_05_W"	124	4	0,6138	0,6584	0,2208
FS_C03_2.0_6.0_05_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	604		0,5521	0,6984	0,2514

Tabelle 32: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_6.0_05

FS_C03_2.0_6.0_08

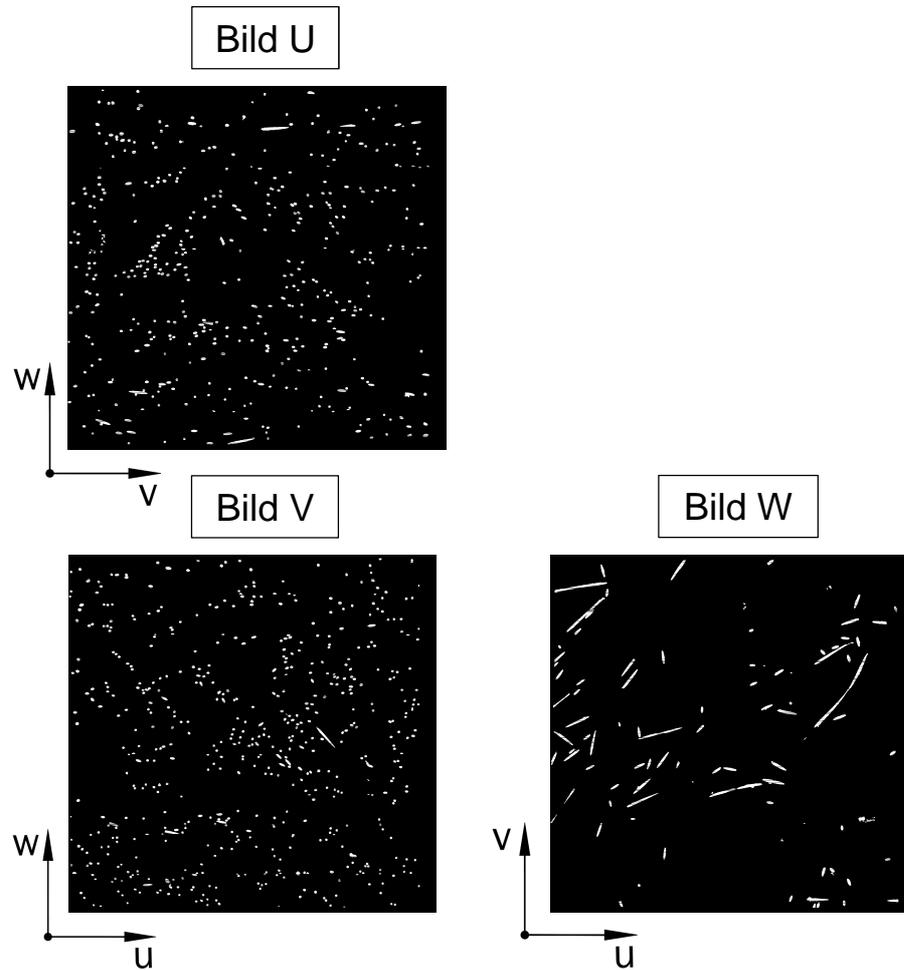


Abbildung 65: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_6.0_08

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_2.0_6.0_08_U	409	238	0,6751	0,6336	0,1702
FS_C03_2.0_6.0_08_V	534	401	0,6544	0,6624	0,1760
FS_C03_2.0_6.0_08_W“	75	2	0,5619	0,7475	0,1792
FS_C03_2.0_6.0_08_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	641		0,6317	0,6736	0,1627

Tabelle 33: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_6.0_08

FS_C03_2.0_6.0_09

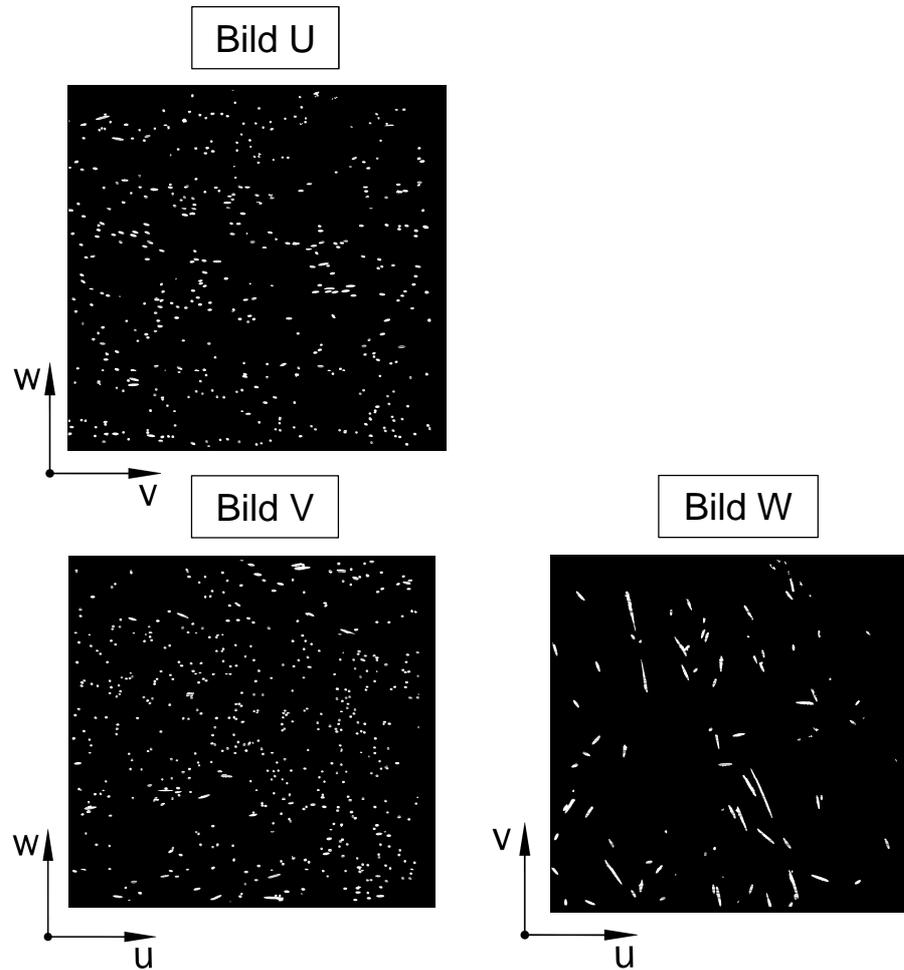


Abbildung 66: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_6.0_09

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_2.0_6.0_09_U	395	176	0,5781	0,7208	0,1674
FS_C03_2.0_6.0_09_V	460	347	0,6132	0,6814	0,1703
FS_C03_2.0_6.0_09_W"	66	8	0,4763	0,7645	0,2047
FS_C03_2.0_6.0_09_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	531		0,5824	0,6975	0,2033

Tabelle 34: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_6.0_09

FS_C03_2.0_6.0_10

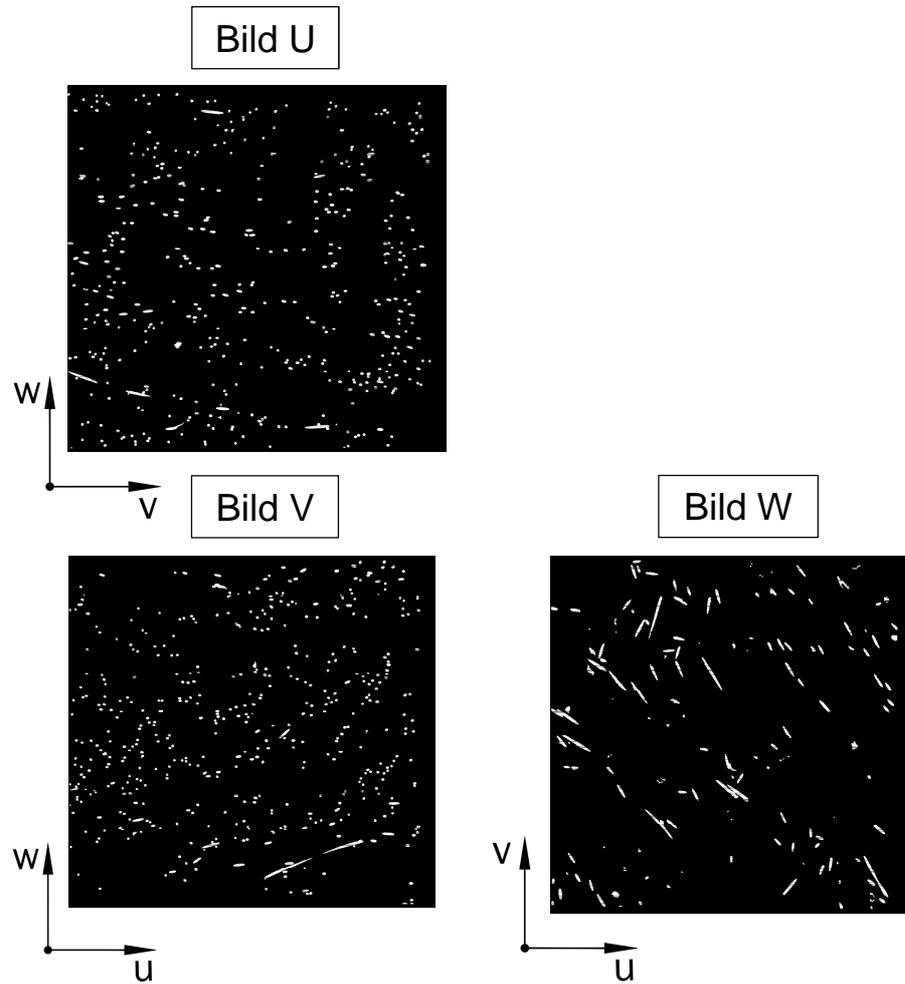


Abbildung 67: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_6.0_10

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_2.0_6.0_10_U	372	200	0,6150	0,6821	0,1697
FS_C03_2.0_6.0_10_V	431	297	0,6291	0,6562	0,1903
FS_C03_2.0_6.0_10_W"	91	3	0,5488	0,7292	0,1982
FS_C03_2.0_6.0_10_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	500		0,6091	0,6632	0,2218

Tabelle 35: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_6.0_10

Bei allen sechs ausgewerteten Proben der Stärke von 6 cm ist dasselbe Ergebnis der Faserorientierung mit geringen Abweichungen zu beobachten.

7.8 Probekörper FS_C03_2.0_2.5_01 und FS_C03_3.0_2.5_06

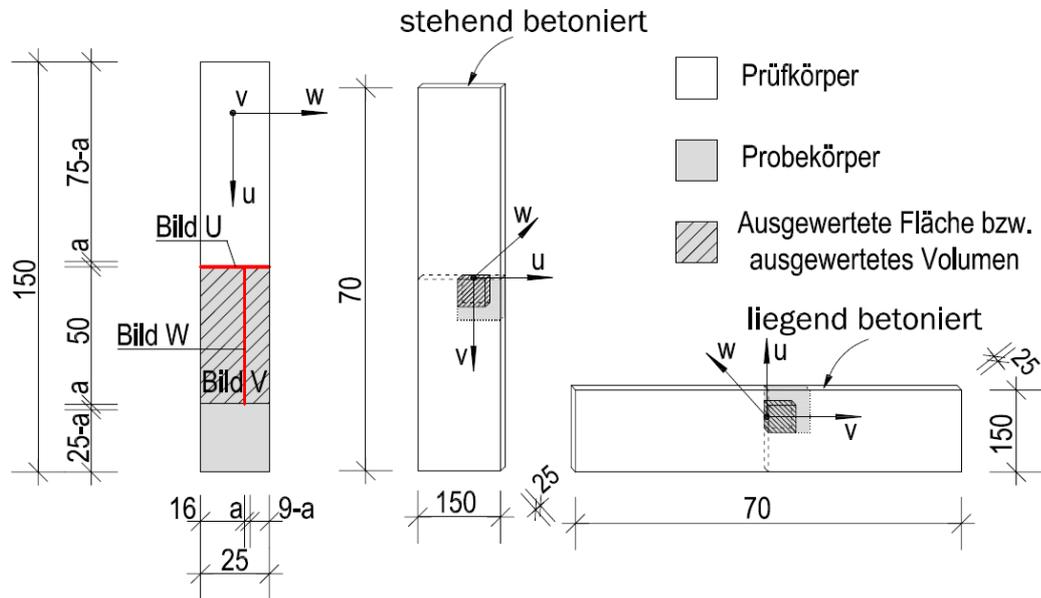


Abbildung 68: Prüfkörper FS_C03_2.0_2.5_01 und FS_C03_3.0_2.5_06

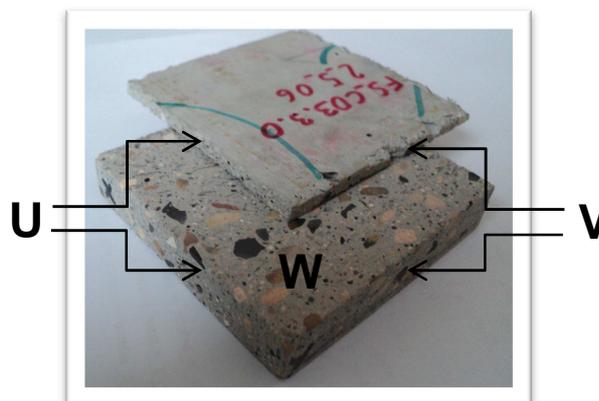


Abbildung 69: Probe Ceracem Typ 4

FS_C03_2.0_2.5_01

Dieser Biegezugträger ist mit einer Stärke von 2,5 cm stehend betoniert worden. Der hier geprüfte Probekörper ist anschließend aus dem Träger geschnitten worden.

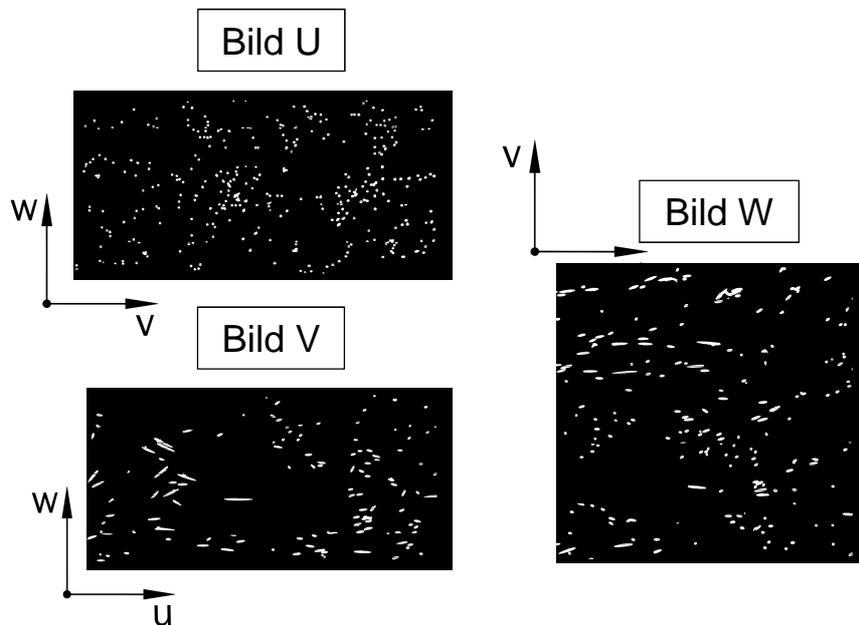


Abbildung 70: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_2.5_01

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_2.0_2.5_01_U	294	276	0,8353	0,3978	0,2314
FS_C03_2.0_2.5_01_V	106	14	0,8529	0,3194	0,2547
FS_C03_2.0_2.5_01_W	156	43	0,8202	0,2169	0,3978
FS_C03_2.0_2.5_01_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	333		0,7930	0,3819	0,2935

Tabelle 36: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_2.5_01

FS_C03_3.0_2.5_06

Dieser Probekörper stammt aus einem Biegezugträger, welcher für das FibreScan-Projekt mit einer Stärke von 2,5 cm liegend betonierte wurde.

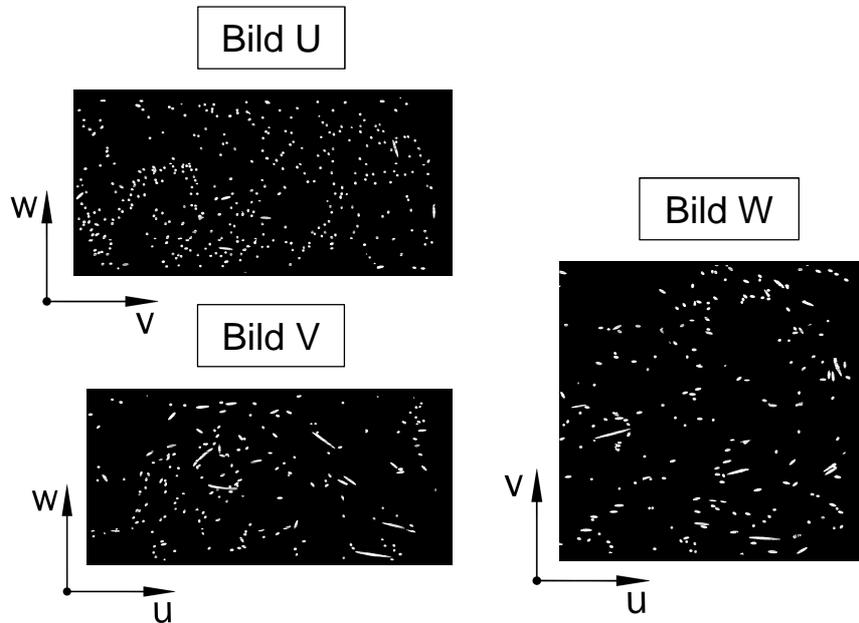


Abbildung 71: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_3.0_2.5_06

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_C03_3.0_2.5_06_U	337	287	0,7533	0,4241	0,3145
FS_C03_3.0_2.5_06_V	163	79	0,6766	0,4701	0,3592
FS_C03_3.0_2.5_06_W	179	56	0,7224	0,3016	0,4491
FS_C03_3.0_2.5_06_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	422		0,7084	0,4294	0,3715

Tabelle 37: Auswertung der Probe FS_C03_3.0_2.5_06

7.9 Probekörper FS_D_2.0_5.0_01/02/03/04/05/06

Die nachfolgenden Probekörper sind aus Biegezugträgern entnommen worden, welche aus einer betonierten Wand geschnitten wurden. Diese 70 cm langen Biegezugproben sind stehend befüllt worden (Wand liegend befüllt). Die bei der Abbildung 72 grauen Biegezugträger wurden ausgewertet.

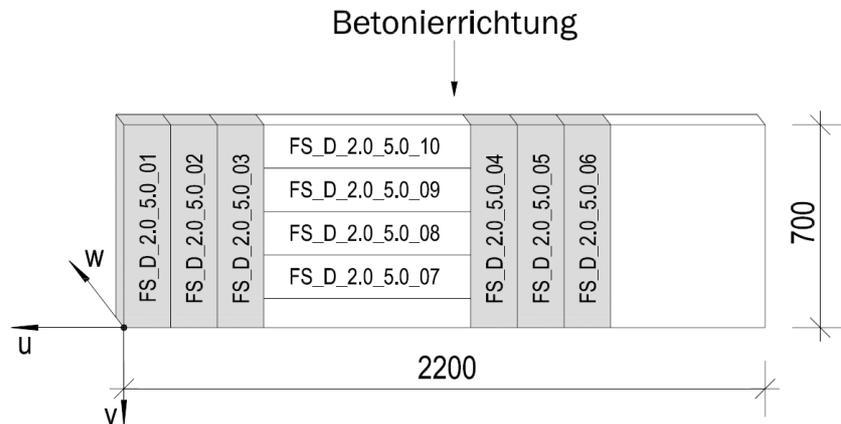


Abbildung 72: Lage der Biegezugproben (Ductal)

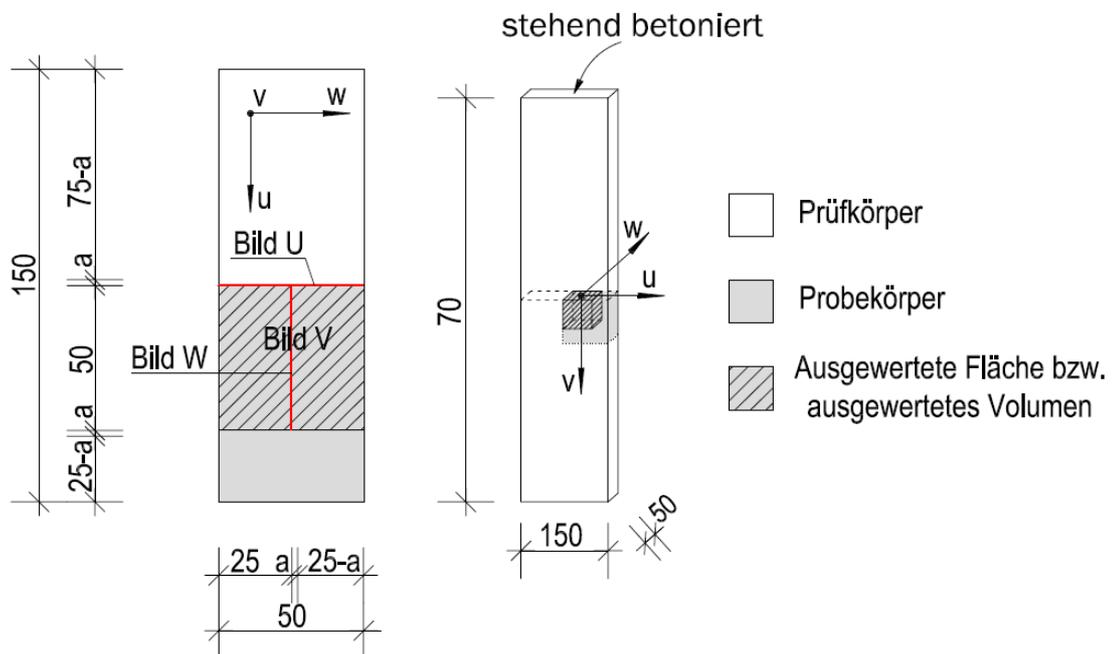


Abbildung 73: Prüfkörper FS_D_2.0_5.0_01/02/03/04/05/06

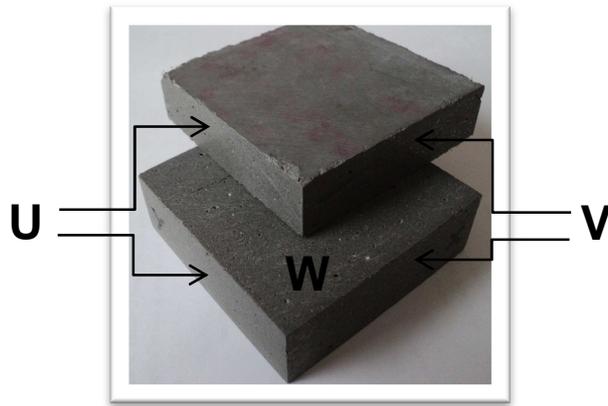


Abbildung 74: Probe Ductal

FS_D_2.0_5.0_01

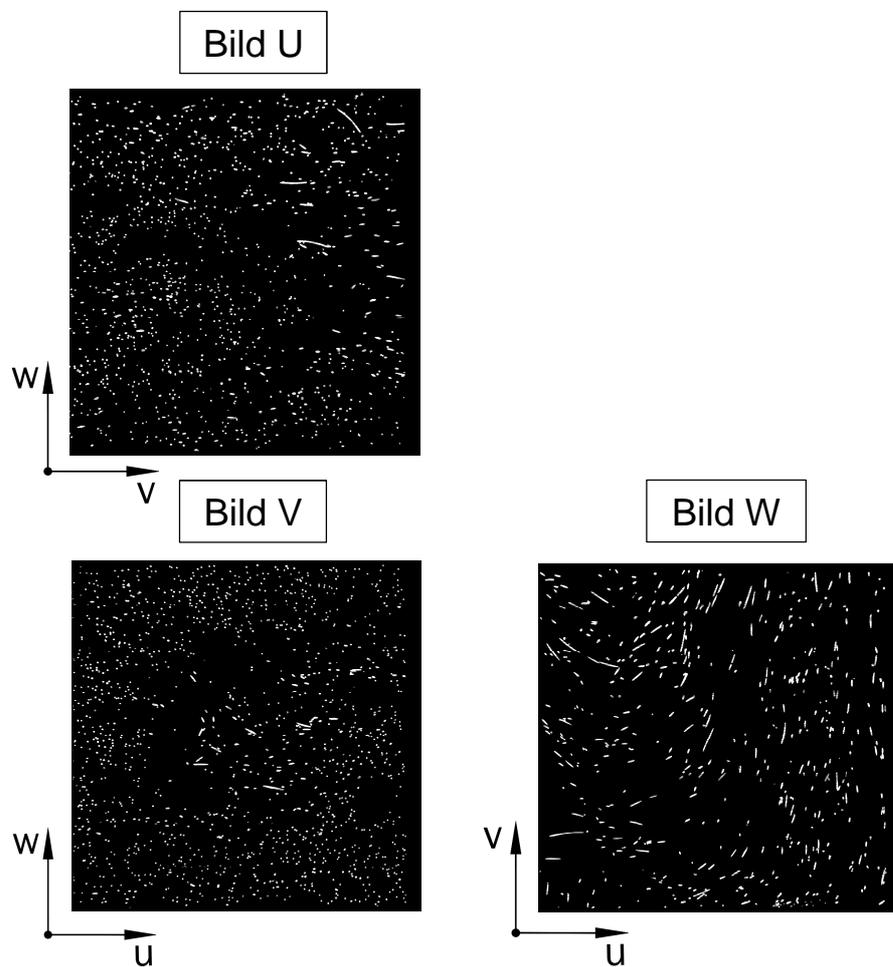


Abbildung 75: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_D_2.0_5.0_01

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_D_2.0_5.0_01_U	1020	672	0,6137	0,5973	0,2697
FS_D_2.0_5.0_01_V	1318	1038	0,5468	0,6919	0,2888
FS_D_2.0_5.0_01_W"	447	52	0,4963	0,6850	0,2542
FS_D_2.0_5.0_01_“NEU“	Σm_{neu}		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	1762		0,5646	0,6390	0,2745

Tabelle 38: Auswertung der Probe FS_D_2.0_5.0_01

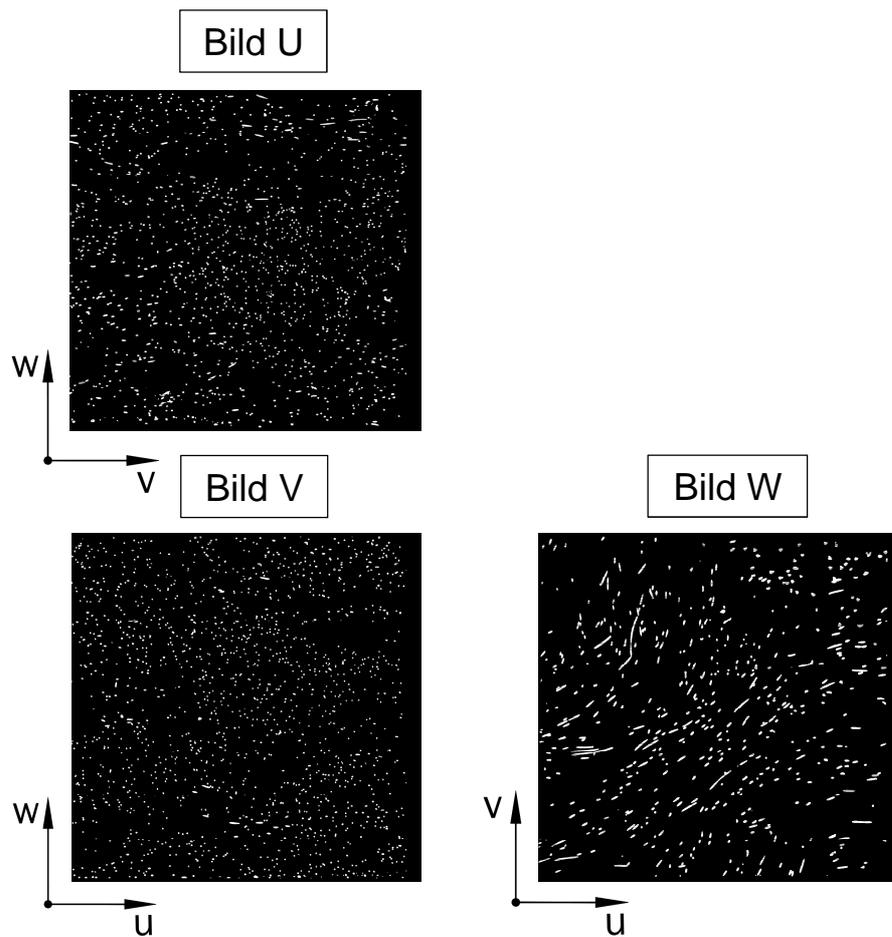
FS_D_2.0_5.0_02


Abbildung 76: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_D_2.0_5.0_02

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_D_2.0_5.0_02_U	1219	721	0,6015	0,6908	0,1779
FS_D_2.0_5.0_02_V	1391	1121	0,4504	0,7444	0,2973
FS_D_2.0_5.0_02_W"	486	59	0,6521	0,5401	0,2813
FS_D_2.0_5.0_02_“NEU“	Σm_{neu}		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	1901		0,5382	0,6773	0,2375

Tabelle 39: Auswertung der Probe FS_D_2.0_5.0_02

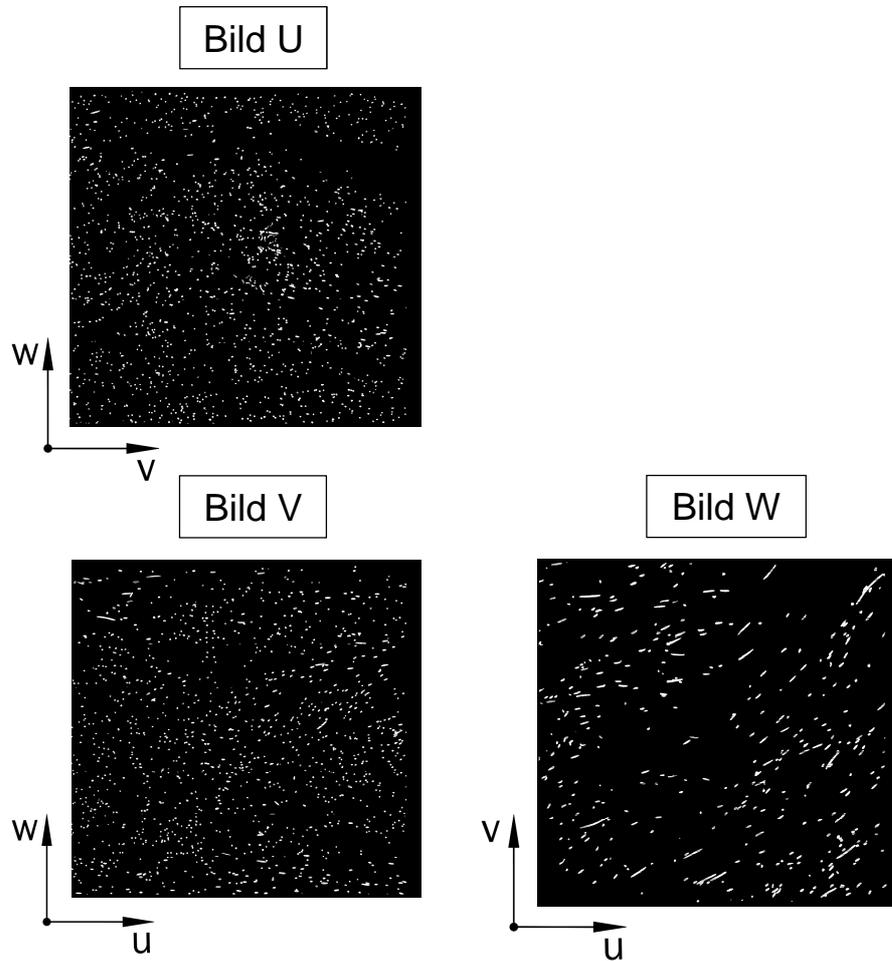
FS_D_2.0_5.0_03


Abbildung 77: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_D_2.0_5.0_03

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_D_2.0_5.0_03_U	1249	907	0,6990	0,5484	0,2603
FS_D_2.0_5.0_03_V	1123	635	0,6572	0,6003	0,2437
FS_D_2.0_5.0_03_W"	321	30	0,7835	0,4516	0,2654
FS_D_2.0_5.0_03_“NEU“		$\sum m_{neu}$	η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
		1572	0,6583	0,5783	0,2371

Tabelle 40: Auswertung der Probe FS_D_2.0_5.0_03

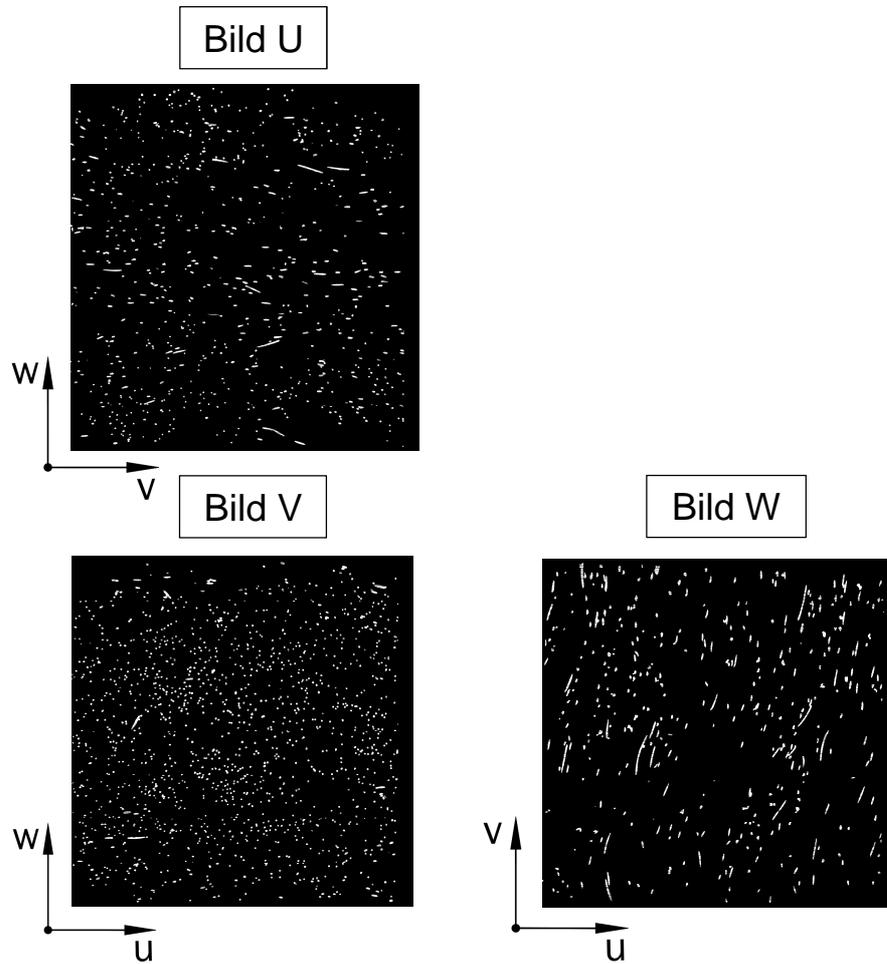
FS_D_2.0_5.0_04


Abbildung 78: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_D_2.0_5.0_04

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_D_2.0_5.0_04_U	668	301	0,4551	0,7613	0,2092
FS_D_2.0_5.0_04_V	1281	1050	0,4595	0,7145	0,3398
FS_D_2.0_5.0_04_W"	333	24	0,2459	0,8908	0,2589
FS_D_2.0_5.0_04_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	1375		0,4488	0,7311	0,2895

Tabelle 41: Auswertung der Probe FS_D_2.0_5.0_04

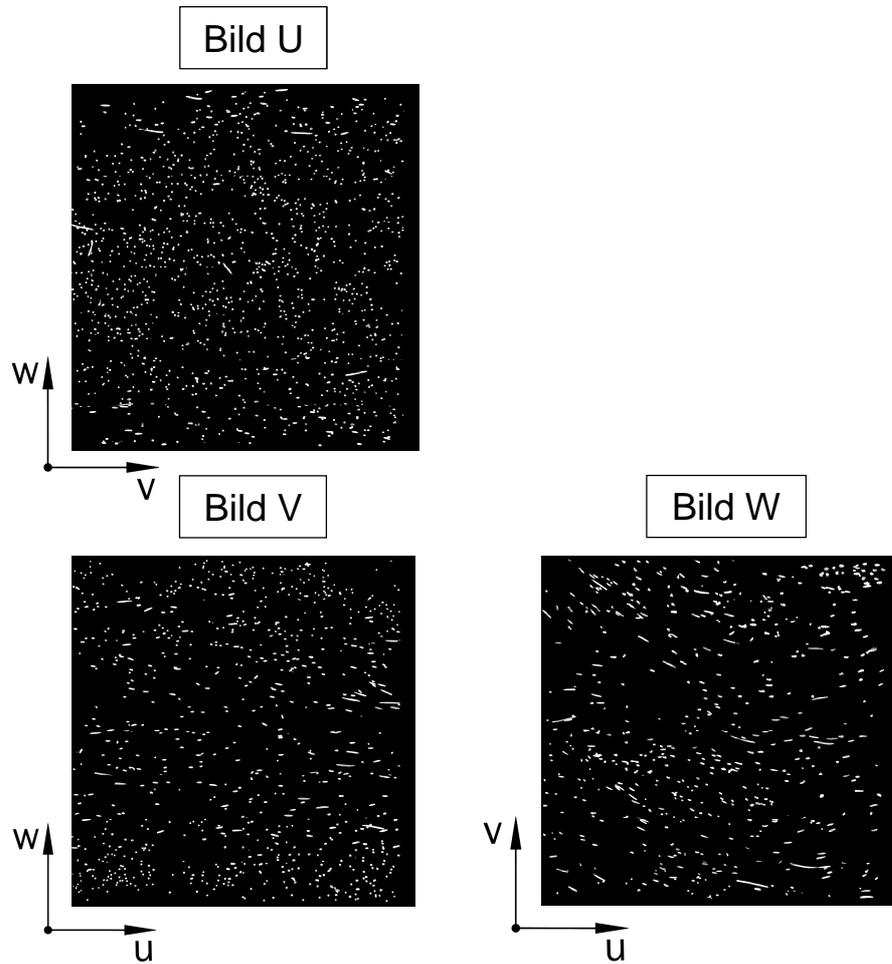
FS_D_2.0_5.0_05


Abbildung 79: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_D_2.0_5.0_05

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_D_2.0_5.0_05_U	1148	879	0,6534	0,5547	0,2815
FS_D_2.0_5.0_05_V	754	377	0,7334	0,4755	0,2224
FS_D_2.0_5.0_05_W“	479	67	0,8466	0,2889	0,3023
FS_D_2.0_5.0_05_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	1323		0,6831	0,5025	0,2837

Tabelle 42: Auswertung der Probe FS_D_2.0_5.0_05

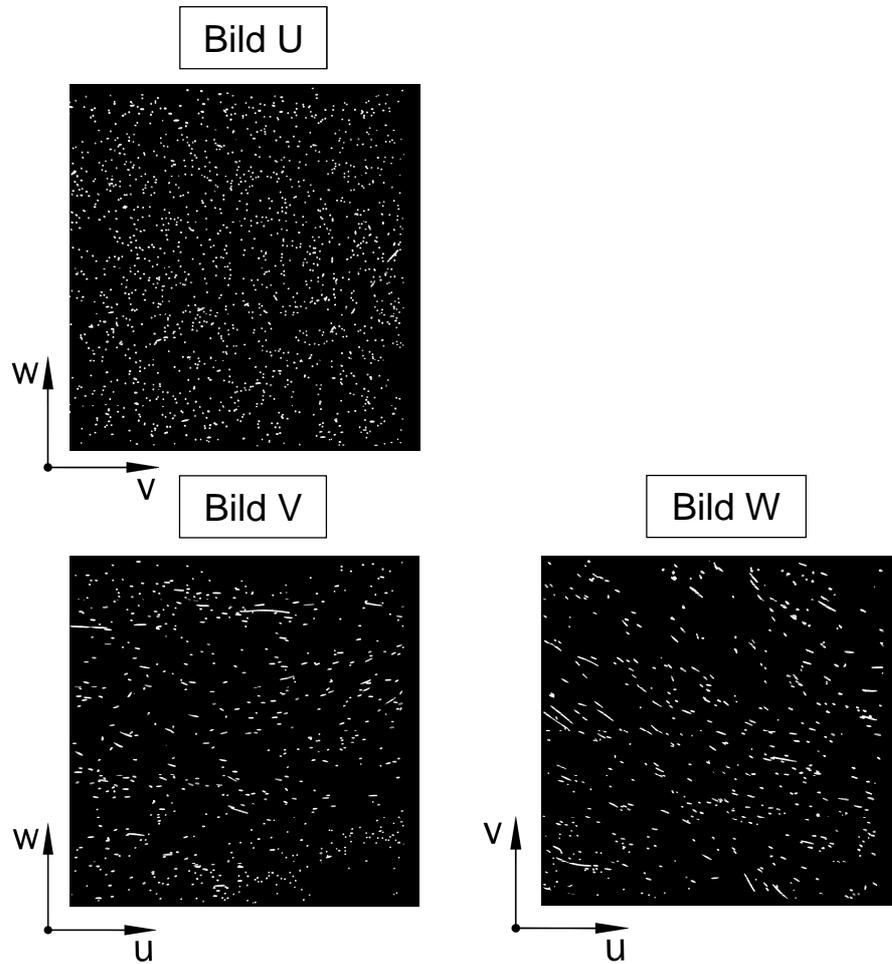
FS_D_2.0_5.0_06


Abbildung 80: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_D_2.0_5.0_06

Bezeichnung	m_{alt}	m_{neu}	η_u	η_v	η_w
FS_D_2.0_5.0_06_U	1433	1203	0,7501	0,4064	0,3310
FS_D_2.0_5.0_06_V	580	203	0,8021	0,4139	0,2235
FS_D_2.0_5.0_06_W"	422	65	0,7958	0,4204	0,2898
FS_D_2.0_5.0_06_“NEU“	$\sum m_{neu}$		η_{uges}	η_{vges}	η_{wges}
	1471		0,7796	0,3762	0,2918

Tabelle 43: Auswertung der Probe FS_D_2.0_5.0_06

8 Orientierungshäufigkeitsverteilung der Fasern

Die Orientierungsverteilung beschreibt, wie viele Fasern jeweils in eine bestimmte Richtung zeigen. Man stellt sich eine Faser vor, die durch den Mittelpunkt des Grundkreises einer gedachten Halbkugel verläuft und diese an der Oberfläche durchstößt. Je nach Orientierung wird die Faser die Halbkugeloberfläche an einer anderen Stelle durchstoßen. Um alle möglichen Richtungen im Raum vernünftig darstellen zu können, behilft man sich, indem man eine Halbkugel betrachtet und deren Oberfläche in gleich große Teile zerlegt. Jeden dieser gleich großen Teile an der Halbkugeloberfläche bezeichnet man als eine Klasse, in der alle Fasern, die dieses Halbkugeloberflächenteil durchstoßen zusammengefasst werden. Mit Hilfe dieser so ermittelten Faseranzahl pro Klasse können Orientierungshäufigkeitsverteilungen dargestellt werden.

8.1 Klasseneinteilung

Die Klasseneinteilung kann durch drei Kriterien auf die Betrachtung der Oberfläche einer Viertelkugel reduziert werden.

Alle Fasern eines Volumens können an der Oberfläche einer Halbkugel dargestellt werden. Betrachtet man eine Ellipse an einer Schnittfläche betrachtet, ist die Orientierung dieser nicht erkennbar. Sie kann die Oberfläche der Halbkugel an zwei Stellen durchstoßen. Diese Zweideutigkeit der Ellipsen ist in Abbildung 81 ersichtlich.

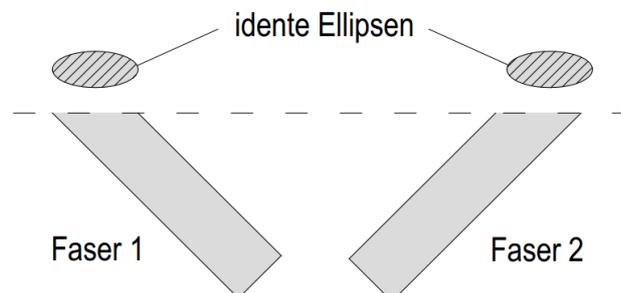


Abbildung 81 Zweideutigkeit der Ellipsen

Verläuft eine Hauptorientierungsrichtung normal auf die Schnittfläche, und wird eine isotrope Faserverteilung angenommen, ist es möglich die Orientierungsverteilung an der Viertelkugeloberfläche darzustellen. Dabei wird angenommen dass die Fasern welche die Halbkugeloberfläche an einer Seite (Viertelkugeloberfläche) durchstoßen symmetrisch an der zweiten Viertelkugeloberfläche vorhanden sind. Durch diese Annahme der Symmetrie ist nur mehr die Oberfläche einer Viertelkugel zu betrachten, an der alle möglichen Faserrichtungen in Klassen zusammengefasst dargestellt werden können. Die berechnete Faseranzahl wird dabei halbiert (Symmetrie).

Jeden Punkt der Viertelkugeloberfläche wird mit Hilfe der Winkel φ und α beschrieben. φ beschreibt den Winkel zwischen Nordpol und Äquator der Kugel. Der Winkel α beschreibt von $+90^\circ$ bis -90° die am Äquator geschnittene Halbkugel an der Schnittfläche.

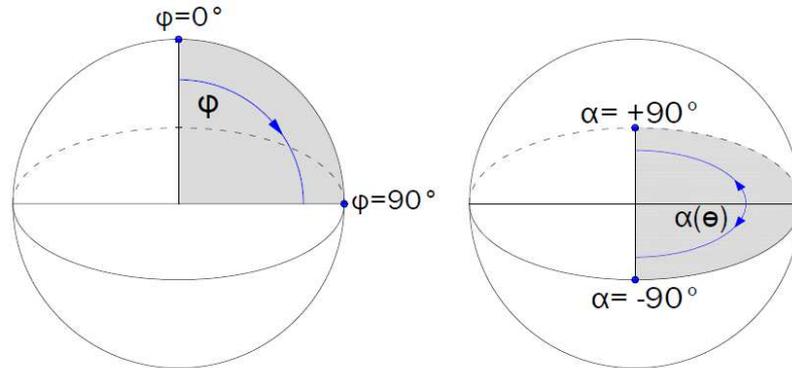


Abbildung 82: Definition der möglichen Faserrichtungen

Für eine statistisch richtige Darstellung wird die Oberfläche der Viertelkugel in gleich große Klassen aufgeteilt. Folgende Vorgangsweise zur Aufteilung wird hierzu verwendet:

- Teilung der Kugel zwischen Nordpol und Äquator in Schichten (wobei $\Delta\varphi =$ konstant)
- Berechnen der Mantelfläche der Kugelscheiben
- Berechnen der Klassenanzahl in jeder Kugelscheibe
- Berechnen von $\Delta\alpha$ für jede Kugelscheibe

Die gesamte Berechnung wird an einer Kugel mit dem Radius = 1 durchgeführt.

8.1.1 Teilung der Kugel zwischen Nordpol und Äquator in Schichten

Die Kugelschichten, welche die Klassen enthalten (Abbildung 84) wurden so gewählt, dass alle 18° eine neue beginnt. Damit die Orientierungshäufigkeitsverteilungsflächen später korrekt dargestellt werden können, besitzen die Kugelschicht 1 und 6 ihre Mitte bei $\varphi = 0^\circ$ und bei $\varphi = 90^\circ$. Das bedeutet, dass die Kugelschicht 6 den Bereich von -9° bis $+9^\circ$ und die Kugelschicht 1 den Bereich von 81° bis 99° umfassen (Abbildung 83).

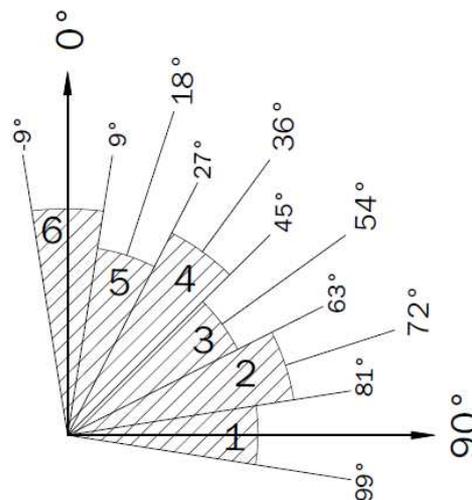


Abbildung 83: Klassen zwischen Nordpol und Äquator

An der Abbildung 83 sieht man die Winkelbereiche der sechs Kugelschichten von -9° bis 9° bis 81° - 99° . Die später bei den Verteilungsfunktionen verwendeten Punkte sind bei 0° , 18° ... 90° . Zur besseren Unterscheidung ist jede zweite Kugelschicht in der Darstellung etwas hervorgehoben. Die Oberflächen müssen natürlich alle den gleichen Abstand = 1 von Mittelpunkt der Kugel besitzen.

8.1.2 Berechnen der Mantelfläche der Kugelschichten

Um die Flächen auf der Viertelkugel gleichmäßig groß zu erhalten müssen zuerst die Mantelflächen der einzelnen Kugelschichten berechnet werden.

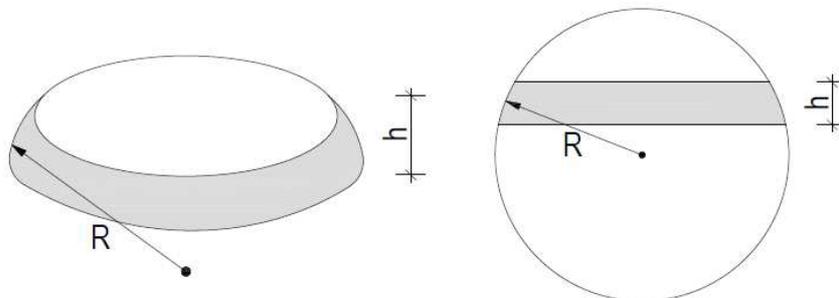


Abbildung 84: Kugelscheibe

Mantelfläche der Kugelschichte:

$$M = 2\pi R h \quad (7.1)$$

Die Höhe h der ersten Kugelschicht oberhalb des Äquators errechnet sich aus dem Sinus des Winkels φ . Ab der zweiten muss das Ergebnis der Höhe aus dem Sinus des Winkels φ vom Ergebnis der darunterliegenden Kugelschichtenhöhe abgezogen werden um h dieser Kugelschicht zu erhalten. Abbildung 85 dient zum besseren Verständnis.

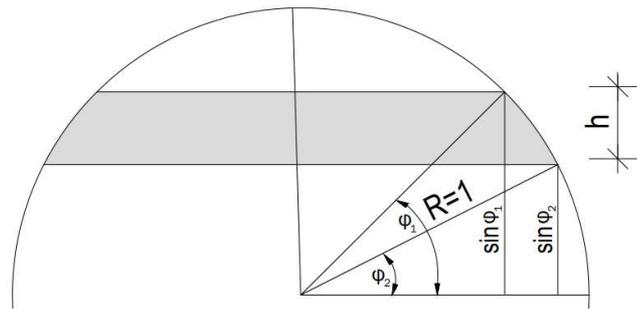


Abbildung 85: Berechnung von h

$$h = \sin \varphi_1 - \sin \varphi_2 \quad (7.2)$$

Höhen h der Kugelschichten:

$$0^\circ - 9^\circ = \sin(9) = 0,1564$$

$$9^\circ - 27^\circ = \sin(27) - \sin(9) = 0,2976$$

$$27^\circ - 45^\circ = \sin(45) - \sin(27) = 0,2531$$

$$45^\circ - 63^\circ = \sin(63) - \sin(45) = 0,1839$$

$$63^\circ - 81^\circ = \sin(81) - \sin(63) = 0,0967$$

$$81^\circ - 90^\circ = \sin(90) - \sin(81) = 0,0123$$

Mantelflächen der Kugelschichten:

MF1 ist die Fläche der Kugelschicht die am Äquator liegt und MF6 ist die Fläche der nördlichen Polkappe.

$$MF1 = 2\pi * 0,1564 = 0,9827$$

$$MF2 = 2\pi * 0,2976 = 1,8699$$

$$MF3 = 2\pi * 0,2531 = 1,5903$$

$$MF4 = 2\pi * 0,1839 = 1,1555$$

$$MF5 = 2\pi * 0,0967 = 0,6076$$

$$MF6 = 2\pi * 0,0123 = 0,0773$$

8.1.3 Berechnung der Klassenanzahl in jeder Kugelschicht

MF6 ist die Fläche der gesamten Polkappe. Das wird als Größe aller Klassen festgelegt. Die Mantelflächen MF2 – MF5 müssen halbiert werden, da sich nur die halbe Fläche auf der Viertelkugel befindet (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). MF1 ist bereits nur die Hälfte der Klasse, da sie sich am Äquator befindet. Alle anderen Mantelflächen werden in Klassen aufgeteilt, deren Flächen ca. der Polkappenfläche entsprechen. Um die jeweilige Häufigkeit der Fasern an den Stellen $\alpha = -90^\circ$ und $\alpha = +90^\circ$ sowie am Äquator bei $\varphi = 90^\circ$ darstellen zu können muss sich die Klassenmitte dort befinden. Daher wird an diesen Randbereichen der Viertelkugeloberfläche ein Stück der angrenzenden Kugeloberfläche mitberücksichtigt. Dieses Stück entspricht je Seite Randklasse die halbe Polkappenfläche.

Durch das Runden der Flächen und das Berücksichtigen der angrenzenden Oberfläche umfasst nun α nicht 180° sondern:

$$MF1 = 14^\circ \cdot 14 = 196^\circ, MF2 = 15^\circ \cdot 13 = 195^\circ, MF3 = 18^\circ \cdot 11 = 198^\circ,$$

$$MF4 = 26^\circ \cdot 8 = 208^\circ, MF5 = 45^\circ \cdot 5 = 225^\circ \text{ und } MF6 = 360^\circ$$

8.2 Auswertung

Die Auswertung erfolgt nur an den W-Bildern der Prüfkörper. Denn nur an diesen Seiten gelten die drei Kriterien für die Klasseneinteilung. Beim Referenzprobekörper mit 2 % Faseranteil werden, dennoch alle sechs Seiten dargestellt.

Korrektur der Faseranzahl

Die Anzahl jeder erfassten Faser wird wie in 4.2 dementsprechend erhöht. Damit betrachtet man alle Fasern in einem Volumen von der Größe des Schnittbildes mal der Dicke der Faserlänge. Diese Vorgehensweise ist dieselbe wie bei der Berechnung von $m \rightarrow n$ (Gleichung 4.10)

Anzahl der Fasern

Für die Richtigkeit der Faserhäufigkeit muss die Faseranzahl der einzelnen Klassen halbiert werden, da nur die Hälfte der Fasern die Viertelkugeloberfläche durchstößt (8.1). Bei den in Abbildung 86 dargestellten Randklassen wird bis auf den zwei an den Ecken unten die gesamte Faseranzahl der halben grauen Klassen verwendet. Die Faseranzahl der beiden Eckklassen bei $\varphi = 90^\circ$ werden verdoppelt.

Darstellung der Verteilungsflächen

Die Koordinaten für die Darstellung der Verteilung sind an der

als blaue Punkte dargestellt. Sie sind die Klassenmittelpunkte. In Excel wird anschließend die Häufigkeit aller Klassen berechnet und anschließend mit Mathematica zur Darstellung der Orientierungsverteilungsflächen eingelesen. Um die Darstellungen unabhängig von der Faseranzahl vergleichen zu können, wird das Volumen unter der Verteilungsfläche mittels einer Normierungskonstante C multipliziert.

Da das Volumen unter der Verteilungsfläche den Wert eins annimmt muss gelten:

$$Volumen = 1 = \sum_{i=1}^K A_{Ki} * P_{Ki} \quad (7.3)$$

K = Klassen

A_{Ki} = Fläche der Klassen

P_{Ki} = Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Klassen

Da alle Klassen annähernd dieselbe Größe besitzen folgt:

$$1 = A_K \sum_{i=1}^K P_{Ki} \quad (7.4)$$

A_K = Gesamtfläche aller Klassen(Halbkuigel)

Die zu berechnende Konstante C ergibt sich folgendermaßen:

(7.5)

$$C = \frac{P_{Ki}}{n_i}$$

C = Konstante für die Normierung

n_i = Faseranzahl der einzelnen Klassen

Aus den Gleichungen 7.4 und 7.5 kann nun die Konstante C berechnet werden:

$$C = \frac{1}{A_K * \sum_{i=1}^n n_i} = \frac{1}{A_K * N} \quad (7.6)$$

N = Gesamtfaseranzahl im Volumen

Die Wahrscheinlichkeit P der Klasse berechnet sich aus Faseranzahl / (Halbkugeloberfläche*Gesamtfaseranzahl). Lässt man anschließend die Verteilungsflächen darstellen ergibt sich, unabhängig von der Anzahl der Fasern, das Volumen unter der Fläche zu eins.

Orientierungsverteilungen und deren Aussagekraft

Mit den Koordinaten der Punkte, welche in

blau dargestellt sind, werden mittels der Software Mathematica die Verteilungsflächen dargestellt. An den Orientierungsverteilungsflächen entspricht der Winkel $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 180^\circ$ dem Winkel von -90° von der Auswertung von Matlab (5.4.1) in den Excel Files.

8.2.1 Referenzprobekörper(2% Faseranteil)

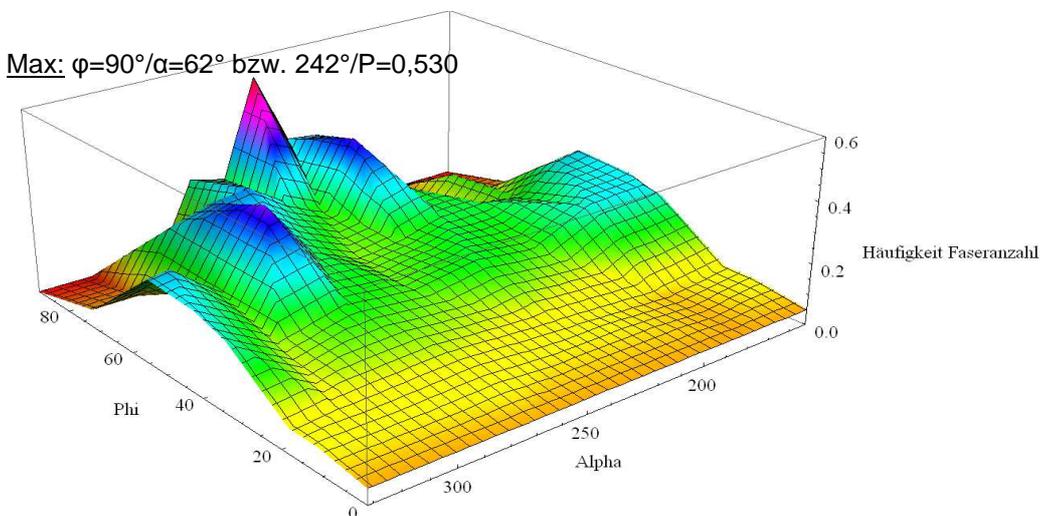


Abbildung 87: Verteilungsfläche U1

Die Grundfläche der Orientierungsverteilungen stellt mit Hilfe von α und φ die Oberfläche der Viertelkugel dar. Normal auf diese Fläche sieht man die Wahrscheinlichkeit (Faserhäufigkeit). Es ist bereits an der Orientierungsverteilung der ersten Seite des Referenzprobekörpers zu sehen, dass die Fasern keine gleichmäßige Verteilung aufweisen. Wenig steile Fasern ($\varphi = 0^\circ$ - 20°) und unregelmäßig verteilte flache Fasern ($\varphi = 20^\circ$ - 90°). φ ist in allen Abbildungen von 0° - 90° dargestellt. α ist ein 180° großer Ausschnitt von 0° - 360° entnommen. Dafür wurden die ausgewerteten 180° zweimal nebeneinander dargestellt und der Ausschnitt, in der die maximale Faserhäufigkeit in der Mitte der α -Skala liegt, dargestellt. Beträgt p bei $\varphi = 0^\circ$ den Wert

0 bedeutet das, es gibt keine einzige annähernd kreisrunde Faser in der Schnittfläche. Bei isotroper Orientierungsverteilung nimmt p den Wert 0,20 an. Folgend werden die weiteren sechs Seiten der Referenzprobe dargestellt.

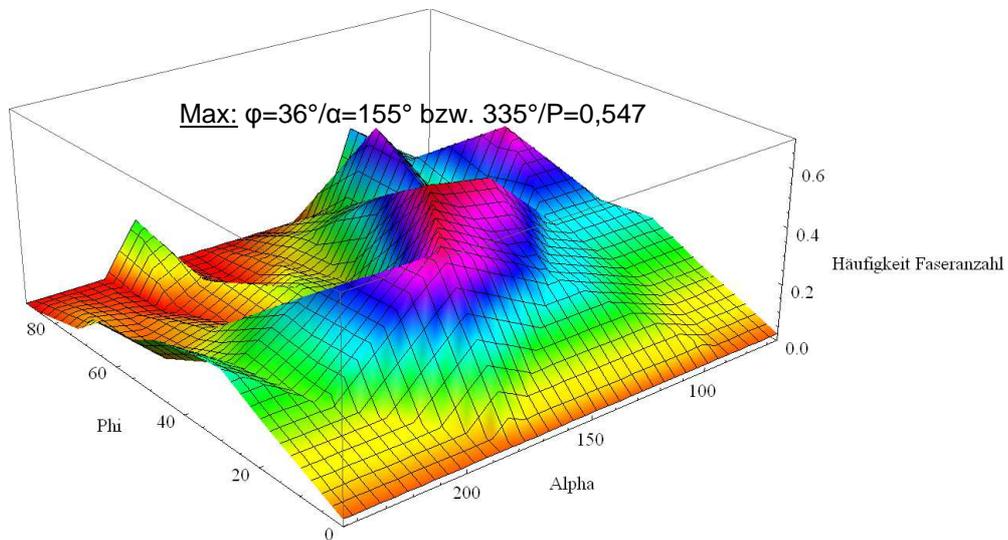


Abbildung 88: Verteilungsfläche U2

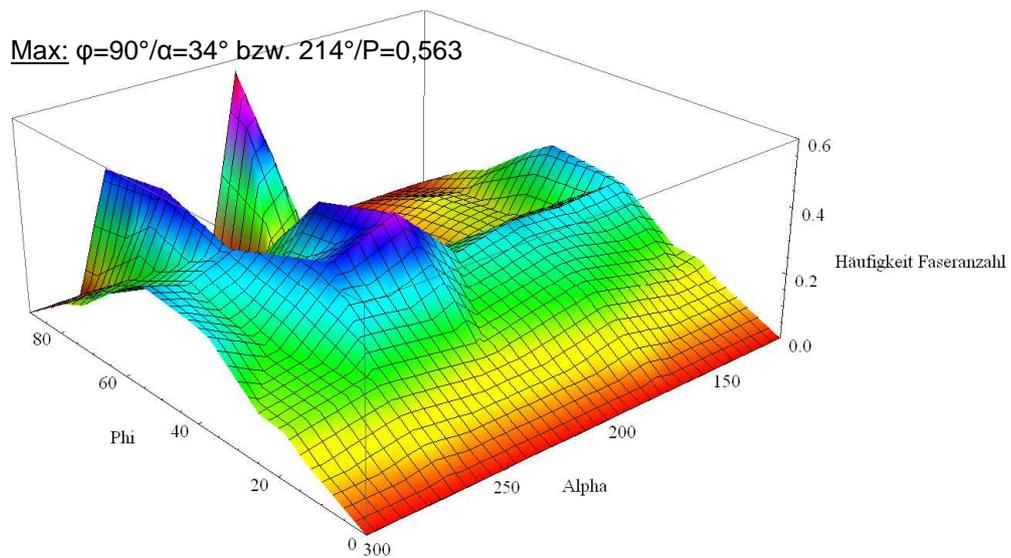


Abbildung 89: Verteilungsfläche V1

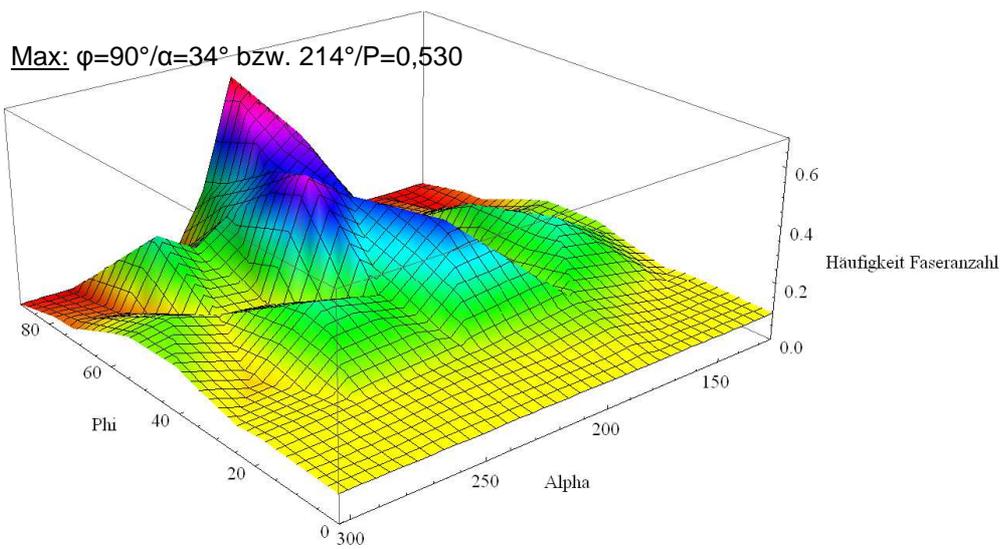


Abbildung 90: Verteilungsfläche V2

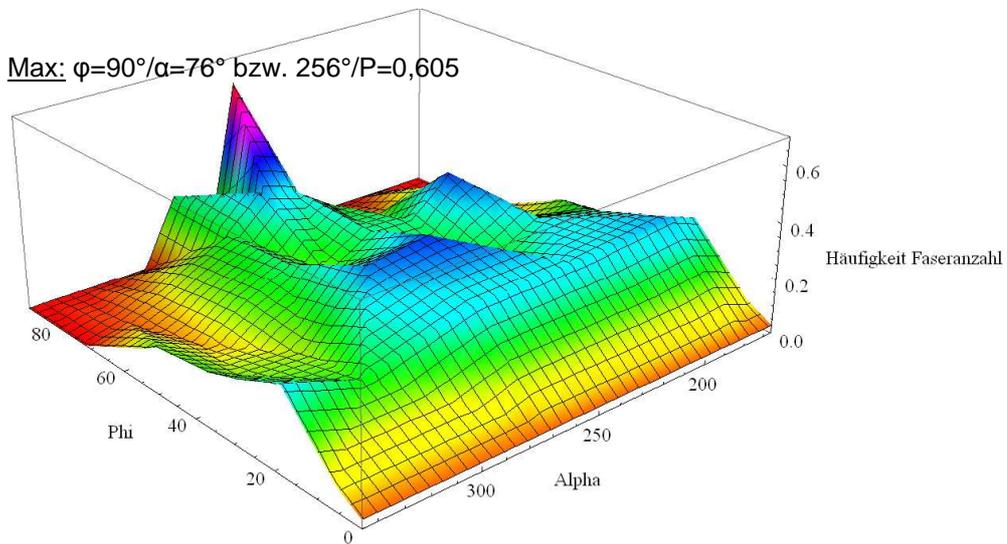


Abbildung 91: Verteilungsfläche W1

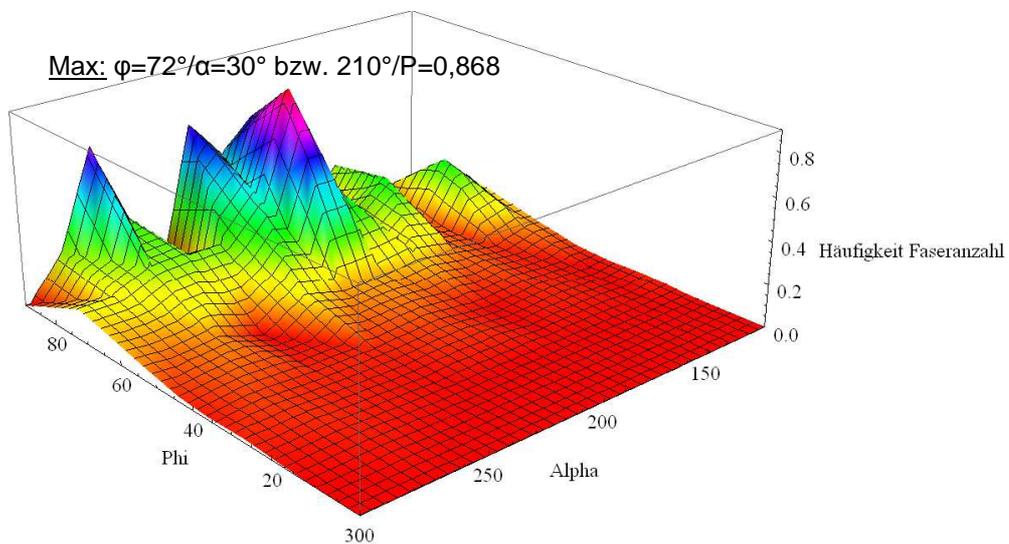


Abbildung 92: Verteilungsfläche W2

Alle Seiten der Referenzprobe haben sehr unregelmäßige Verteilungen. Das Ziel eine möglichst gleichmäßige Verteilung zu erreichen wurde somit nicht erreicht. Eine Verbesserung kann sich durch Herstellen eines größeren Referenzprobekörpers und somit Betrachten einer großen Fläche ergeben. Damit würden Fehler durch lokale Inhomogenität viel geringer ausfallen. Die Richtigkeit der Darstellung der sechs Seiten ist nicht gegeben, da keine Hauptrichtung bekannt ist. Die Darstellung müsste an der Halbkugel erfolgen, da die Ellipsen als nicht gleichmäßig verteilt angenommen werden können. Aber auch ohne diesen Fehler ändert sich nichts am Umstand der starken Unregelmäßigkeit der Fasern.

8.2.2 Ceracemproben

An den folgenden Probekörpern wurde nur die Seite W dargestellt, da normal auf dieser Seite eine Hauptrichtung angenommen wird. Die erste Hauptorientierungsrichtung ist jene, in der die größte Faserorientierung auftritt. Die zweite steht in einem Winkel von 90° auf die erste und hat in der Ebene in der sie liegt die größte Faserorientierung. Die dritte Hauptorientierungsrichtung steht im rechten Winkel auf die von den ersten beiden Hauptorientierungen aufgespannten Fläche.

Probekörper FS_C03_2.0_10_03_W

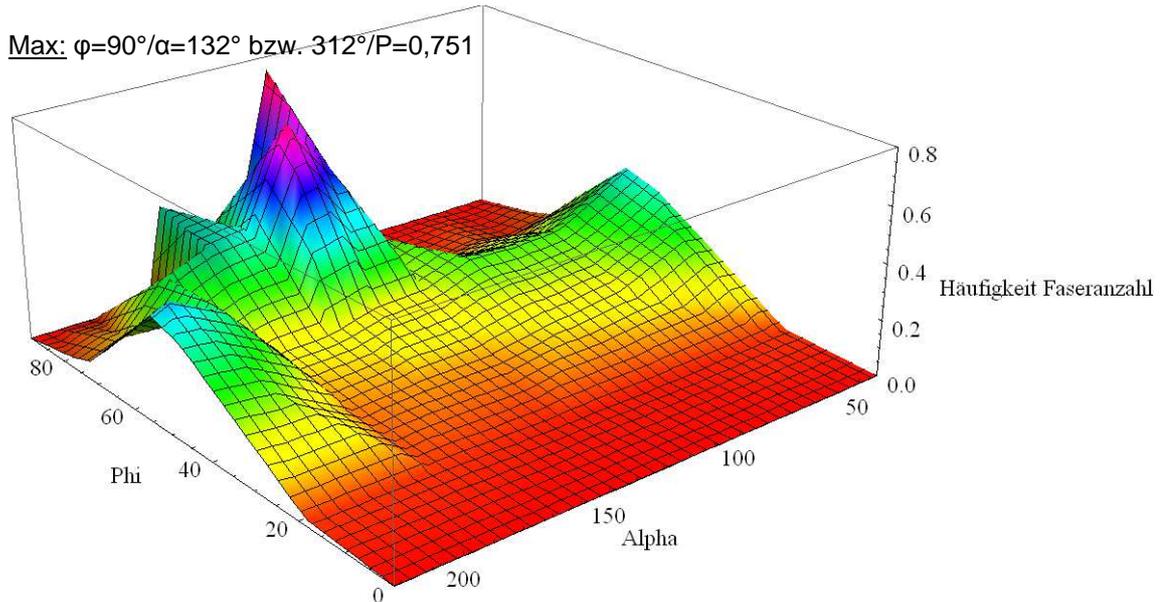


Abbildung 93: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_10_03_W

Bei der Probe, welche in Abbildung 93 dargestellt ist sind zwei ausgeprägte Neigungen der Fasern erkennbar. Eine ist bei $\varphi = 90^\circ$ und die zweite befindet sich bei φ ist 60° .

Probekörper FS_C03_2.0_20_01_W

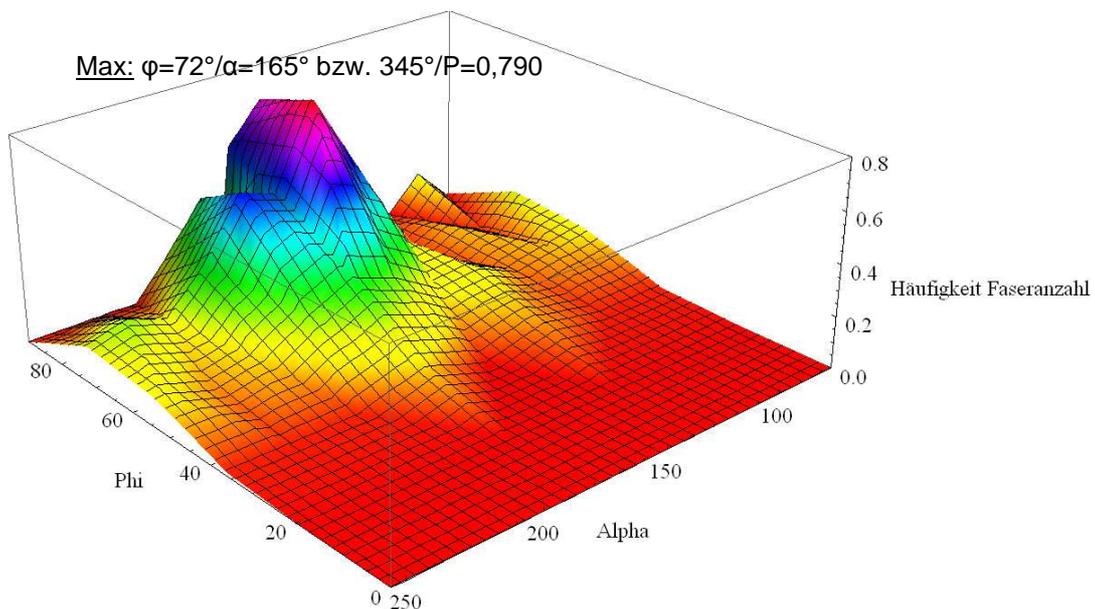


Abbildung 94: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_20_01_W

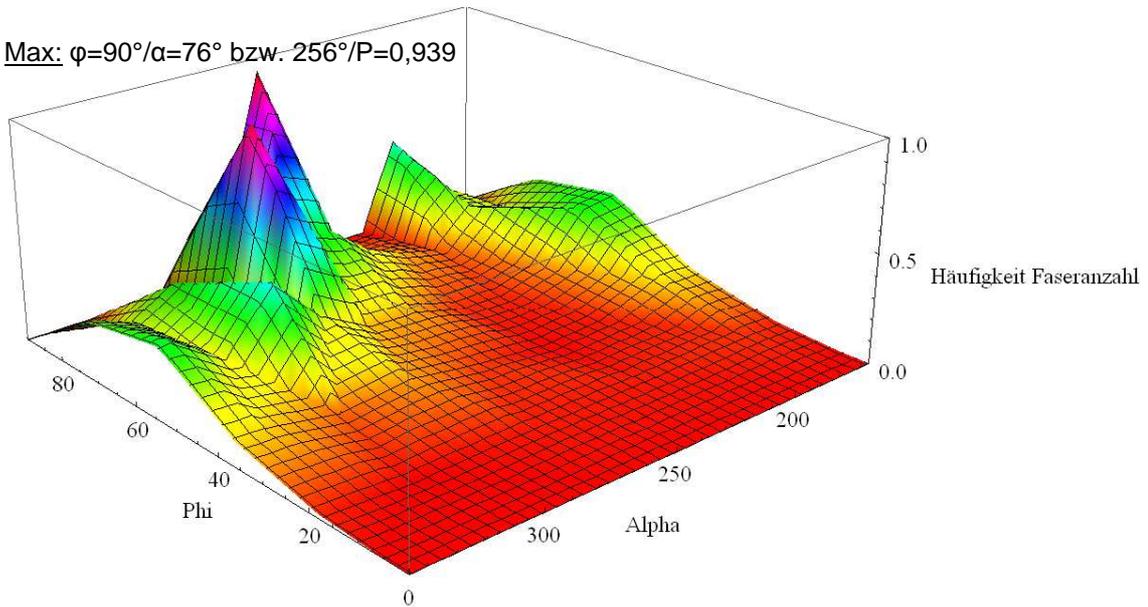
Probekörper FS_C03_2.0_20_03_WMax: $\varphi=90^\circ/\alpha=76^\circ$ bzw. $256^\circ/P=0,939$ 

Abbildung 95: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_20_03_W

Die Fasern der Probe FS_C03_2.0_20_01/03 sind gänzlich flach (in Richtung der Ebene des Bildes W) mit ausgeprägter Hauptorientierung verteilt.

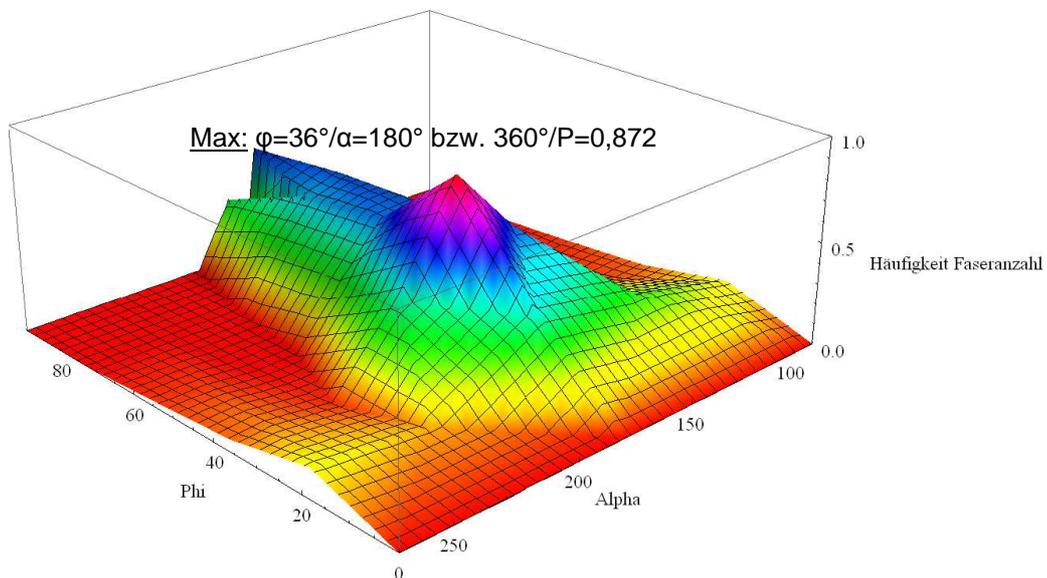
Probekörper FS_C03_1.0_5.0_01

Abbildung 96: Verteilungsfläche_FS_C03_1.0_5.0_01_W

An dieser Probe ist die Hauptorientierung der Fasern in einem Winkel φ von 45° gegeben. Sie ist aber schwach ausgeprägt, da die Häufigkeit der Fasern auf einer großen Fläche einen hohen Wert annimmt. Auf der ausgewerteten Fläche sind keine senkrechten Fasern vorhanden.

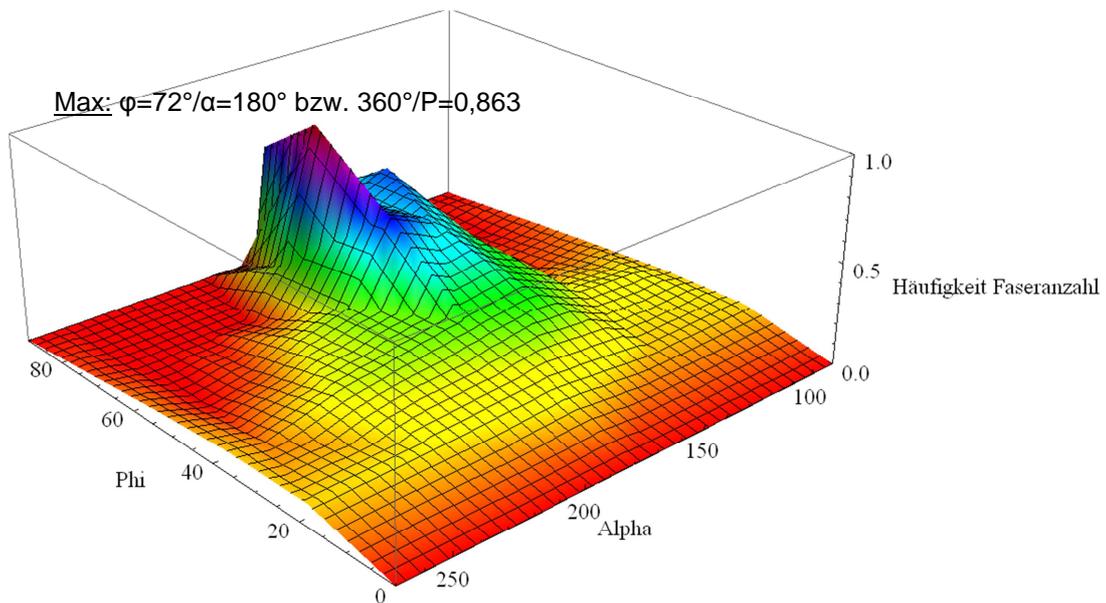
Probekörper FS_C03_2.0_5.0_02_W

Abbildung 97: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_5.0_02_W

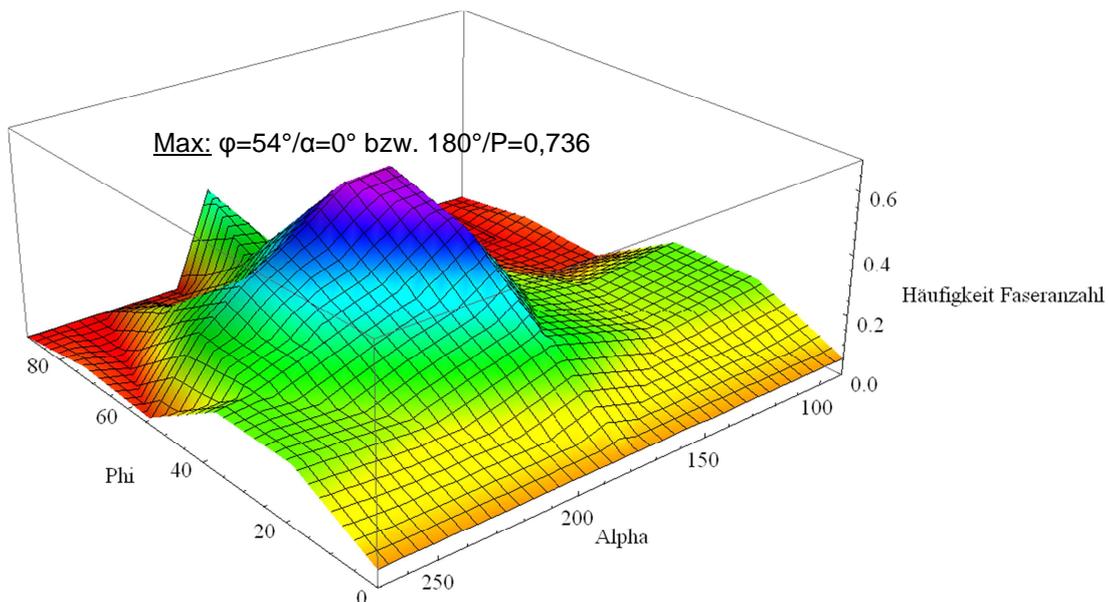
Probekörper FS_C03_2.0_5.0_03_W

Abbildung 98: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_5.0_03_W

Auch an Abbildung 98 ist gut die Hauptorientierungsrichtung zu erkennen. Sie liegt hier nicht wie erwartet in der Bildebene, sondern die Fasern orientieren sich in einem Winkel $\varphi = 50^\circ$.

Probekörper FS_C03_2.0_6.0_02_W

Max: $\varphi=90^\circ/\alpha=34^\circ$ bzw. $214^\circ/P=2,131$

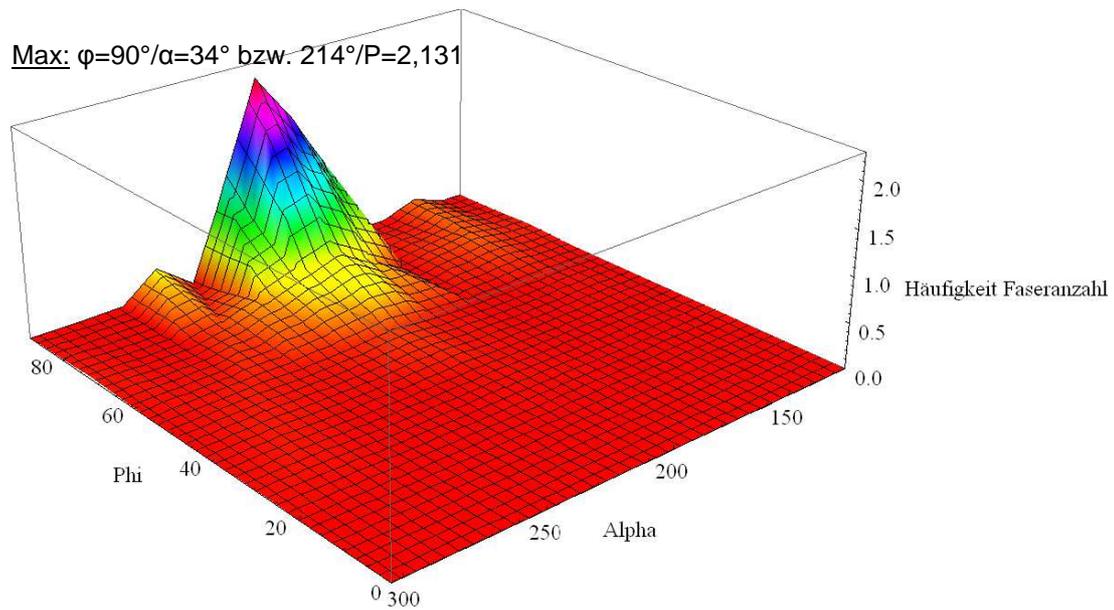


Abbildung 99: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_6.0_02_W

Bei den Probekörpern von sechs cm Stärke ist eine eindeutige Faserorientierungshauptrichtung feststellbar. Dies zeigen auch die folgenden Orientierungsverteilungsflächen.

Probekörper FS_C03_2.0_6.0_03_W

Max: $\varphi=90^\circ/\alpha=132^\circ$ bzw. $312^\circ/P=2,774$

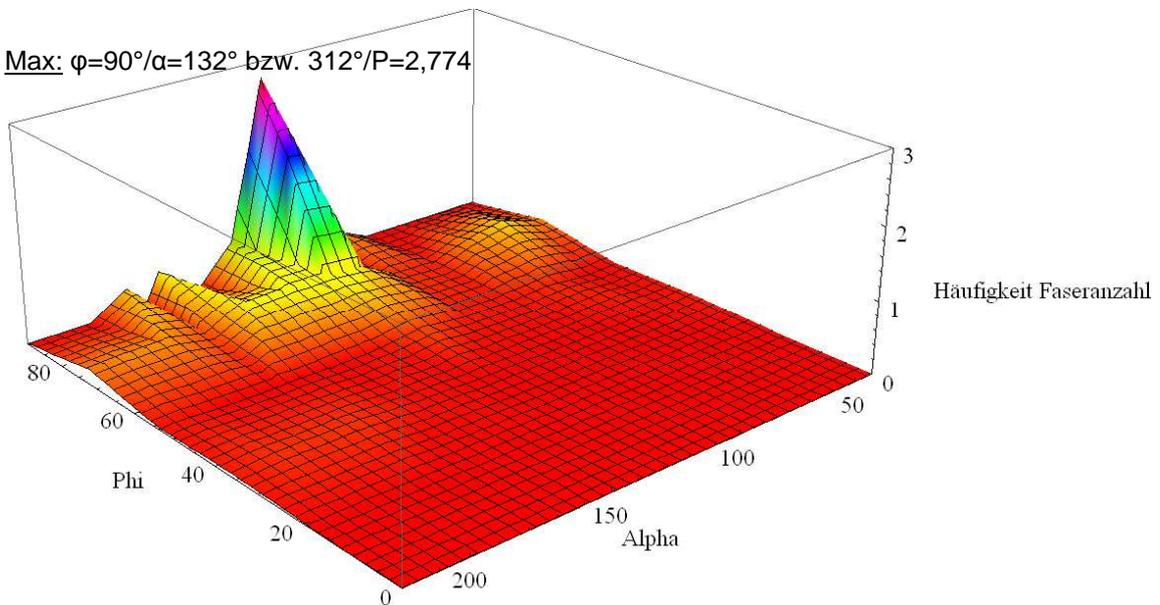


Abbildung 100: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_6.0_03_W

Probekörper FS_C03_2.0_6.0_05_W

Max: $\varphi=90^\circ/\alpha=132^\circ$ bzw. $312^\circ/P=1,425$

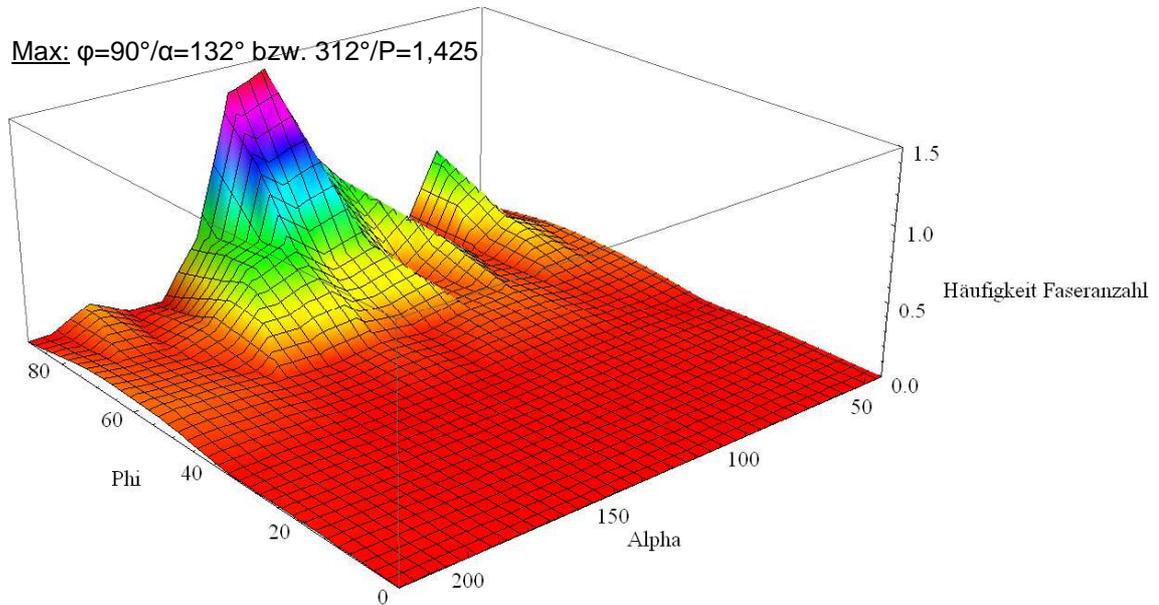


Abbildung 101: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_6.0_05_W

Probekörper FS_C03_2.0_6.0_08_W

Max: $\varphi=90^\circ/\alpha=104^\circ$ bzw. $284^\circ/P=1,805$

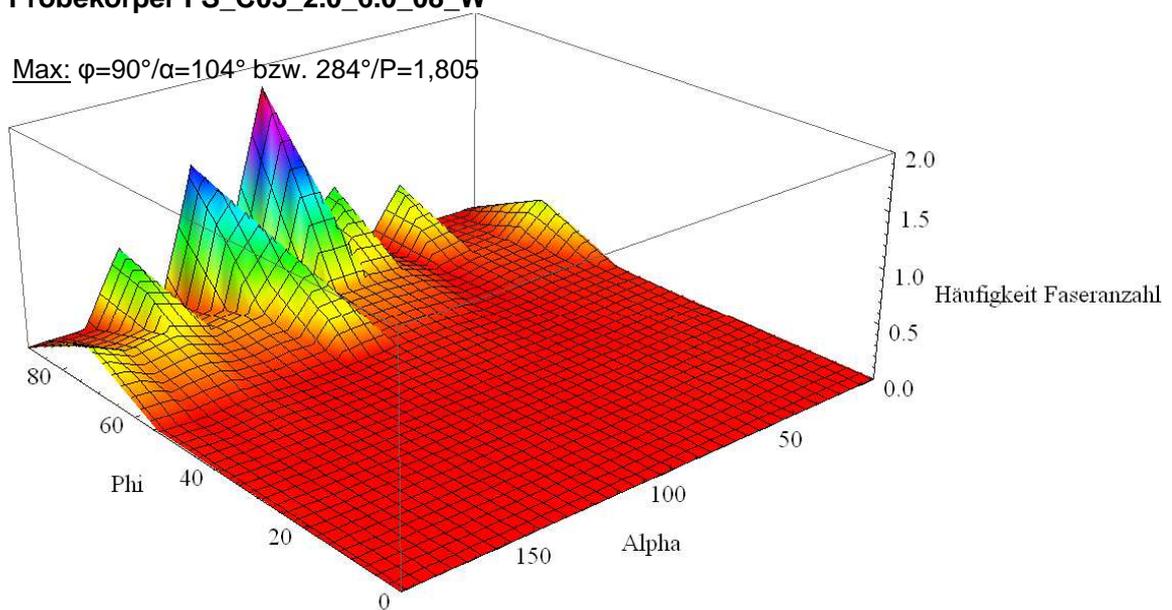


Abbildung 102: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_6.0_08_W

Hier sind alle Fasern flach orientiert. Durch die geringe Faseranzahl in der Schnittfläche ist keine eindeutige Orientierung der Fasern ersichtlich.

Probekörper FS_C03_2.0_6.0_09_W

Max: $\varphi=90^\circ/\alpha=20^\circ$ bzw. $200^\circ/P=1,988$

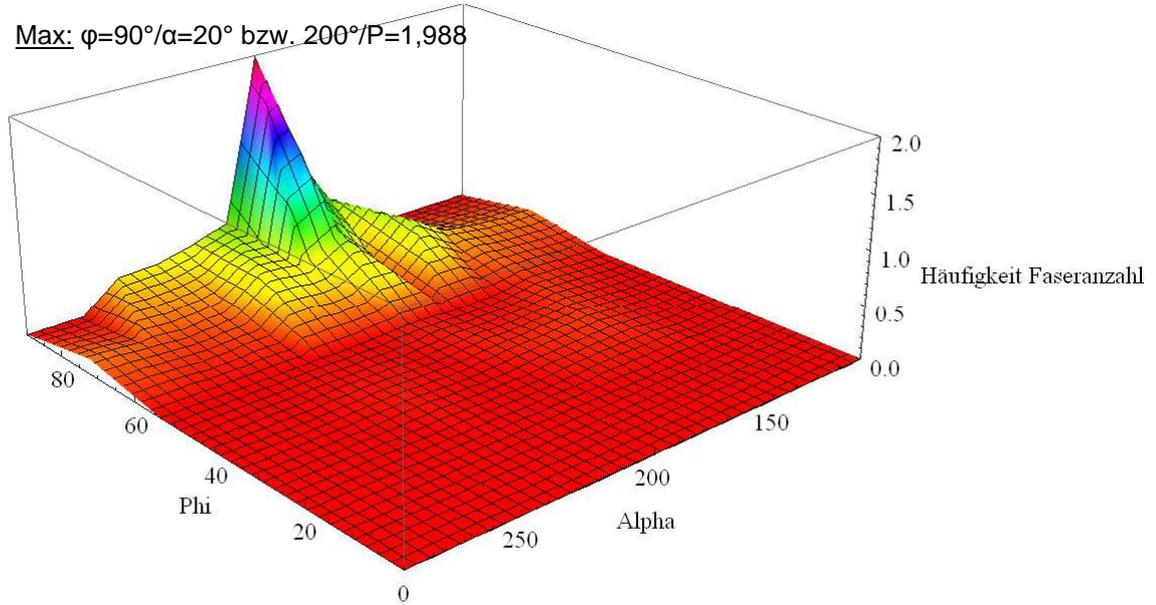


Abbildung 103: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_6.0_09_W

Probekörper FS_C03_2.0_6.0_10_W

Max: $\varphi=90^\circ/\alpha=20^\circ$ bzw. $200^\circ/P=1,966$

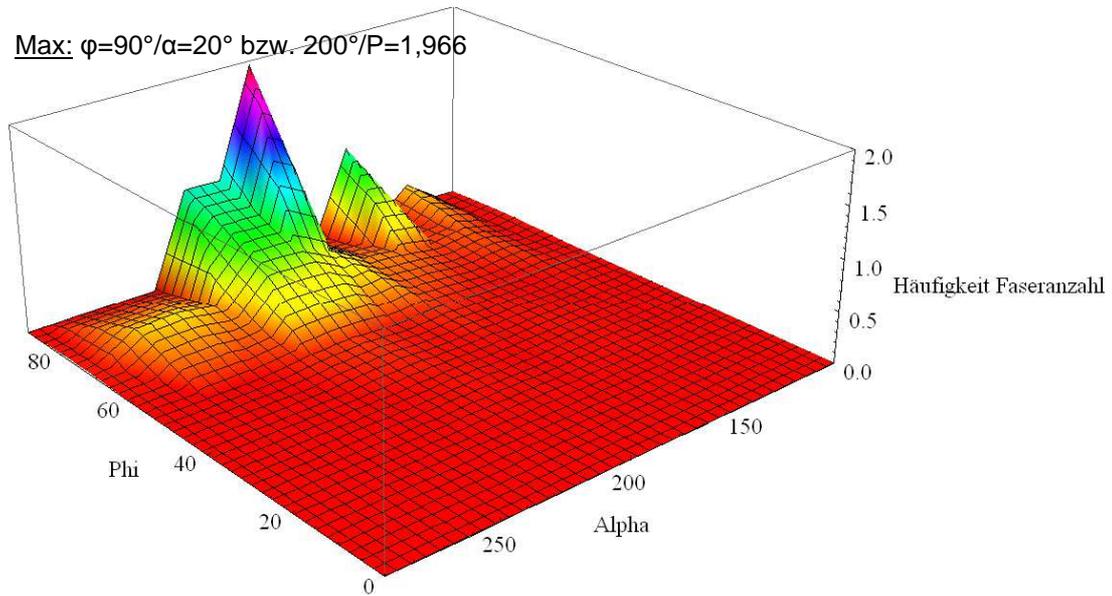


Abbildung 104: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_6.0_10_W

Probekörper FS_C03_2.0_2.5_01

Max: $\varphi=72^\circ/\alpha=90^\circ$ bzw. $270^\circ/P=1,449$

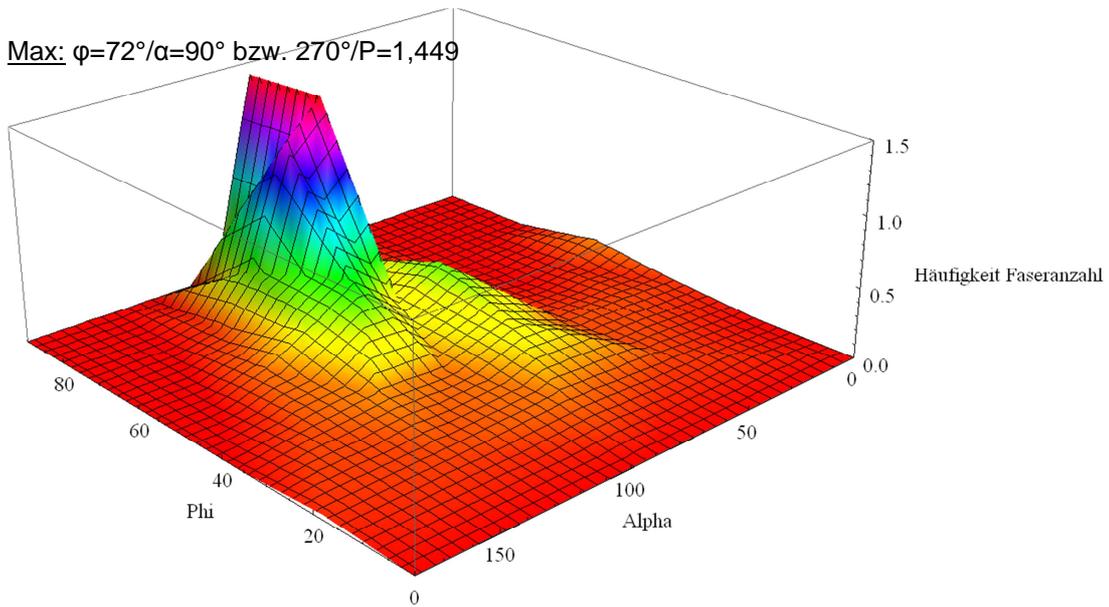


Abbildung 105: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_2.5_01_W

Eine eindeutige Faserausrichtung ist zu erkennen und daher ein hoher Wert der Faserhäufigkeit.

Probekörper FS_C03_3.0_2.5_06_W

Max: $\varphi=72^\circ/\alpha=90^\circ$ bzw. $270^\circ/P=0,879$

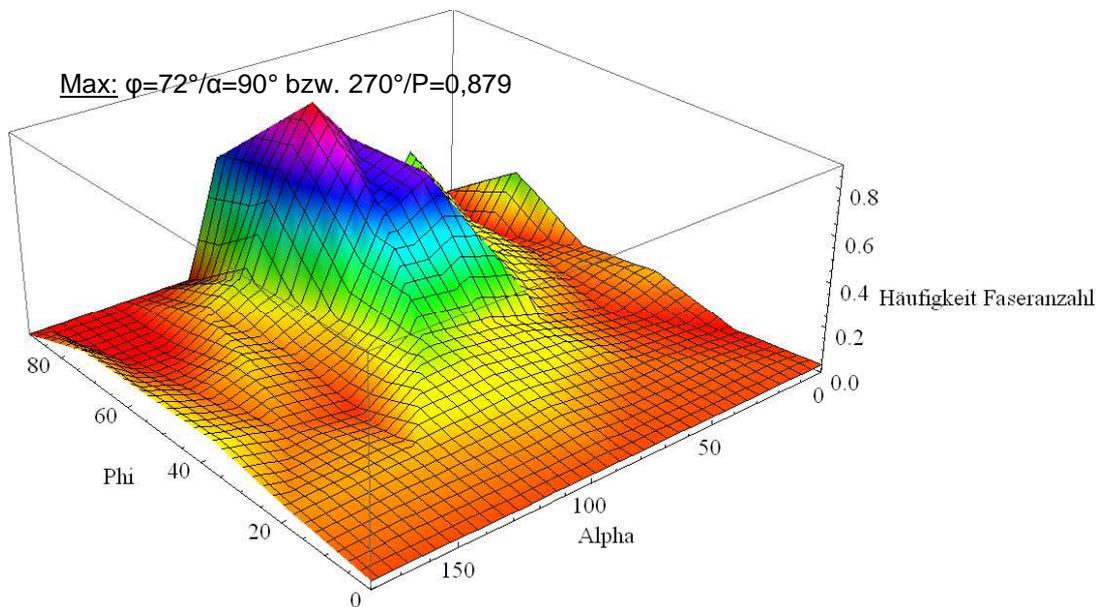


Abbildung 106: Verteilungsfläche_FS_C03_3.0_2.5_06_W

Probekörper FS_C03_3.0_5.0_01_W

Max: $\varphi=90^\circ/\alpha=104^\circ$ bzw. $284^\circ/P=0,567$

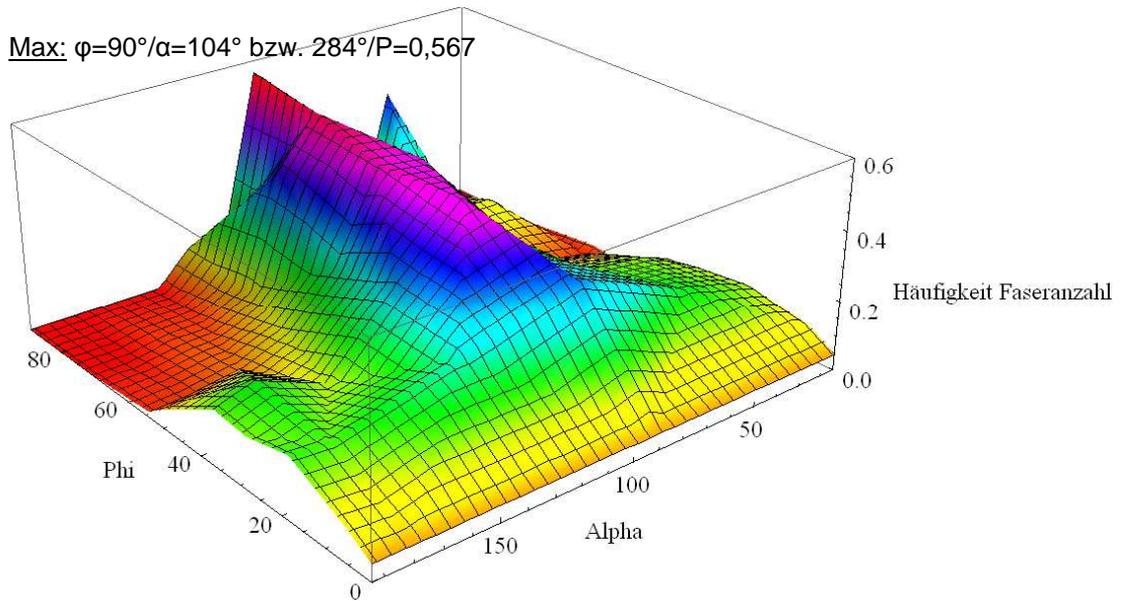


Abbildung 107: Verteilungsfläche_FS_C03_3.0_5.0_01_W

8.2.3 Ductalproben

Probekörper FS_D_2.0_5.0_01_W

Max: $\varphi=90^\circ/\alpha=174^\circ$ bzw. $354^\circ/P=0,869$

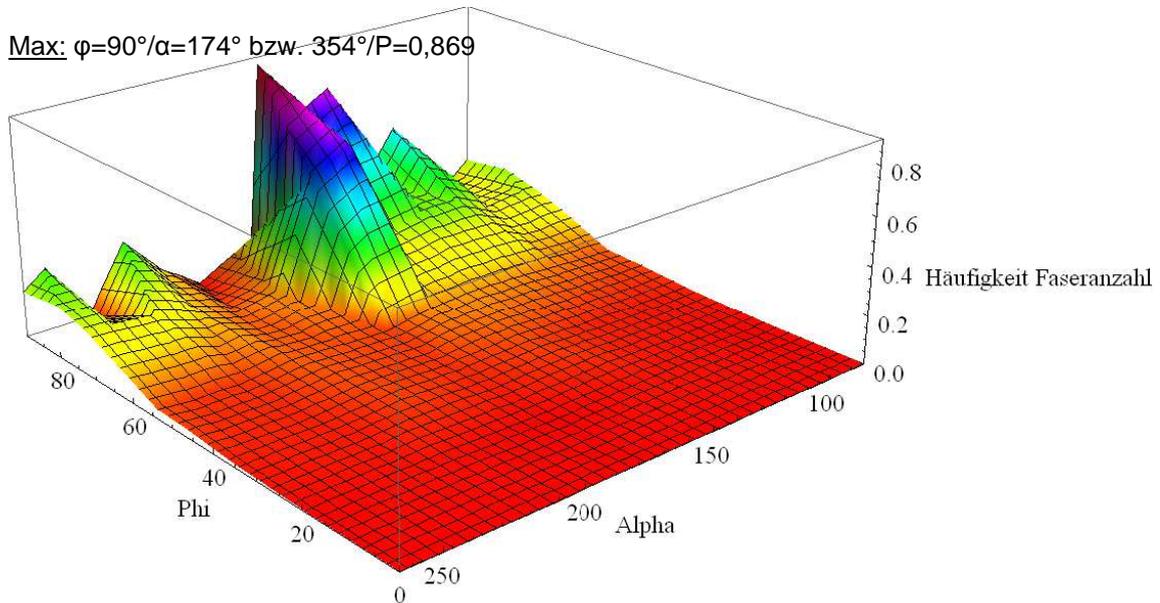


Abbildung 108: Verteilungsfläche_FS_D_2.0_5.0_01_W

Diese Ductalprobe besitzt hauptsächlich flache Fasern die ungleichmäßig verteilt mit erkennbarer Hauptorientierungsrichtung angeordnet sind.

Probekörper FS_D_2.0_5.0_02_W

Max: $\varphi=72^\circ/\alpha=120^\circ$ bzw. $300^\circ/P=0,875$

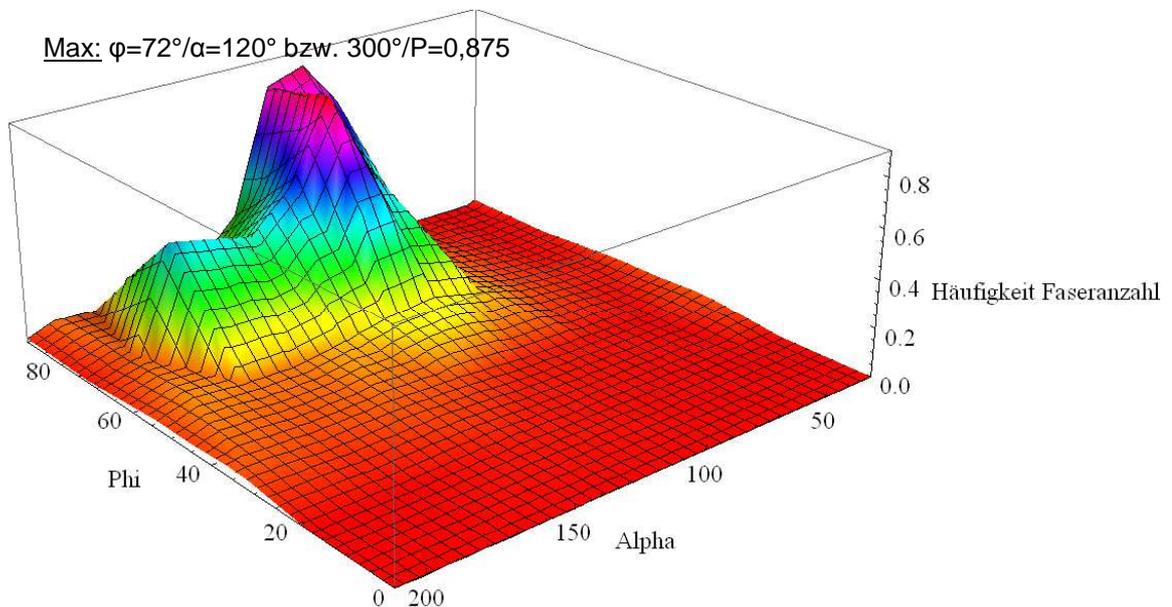


Abbildung 109: Verteilungsfläche_FS_D_2.0_5.0_02_W

Bei dieser wie auch den weiteren vier Ductalproben ist eine ausgeprägte Orientierung der Fasern erkennbar.

Probekörper FS_D_2.0_5.0_03_W

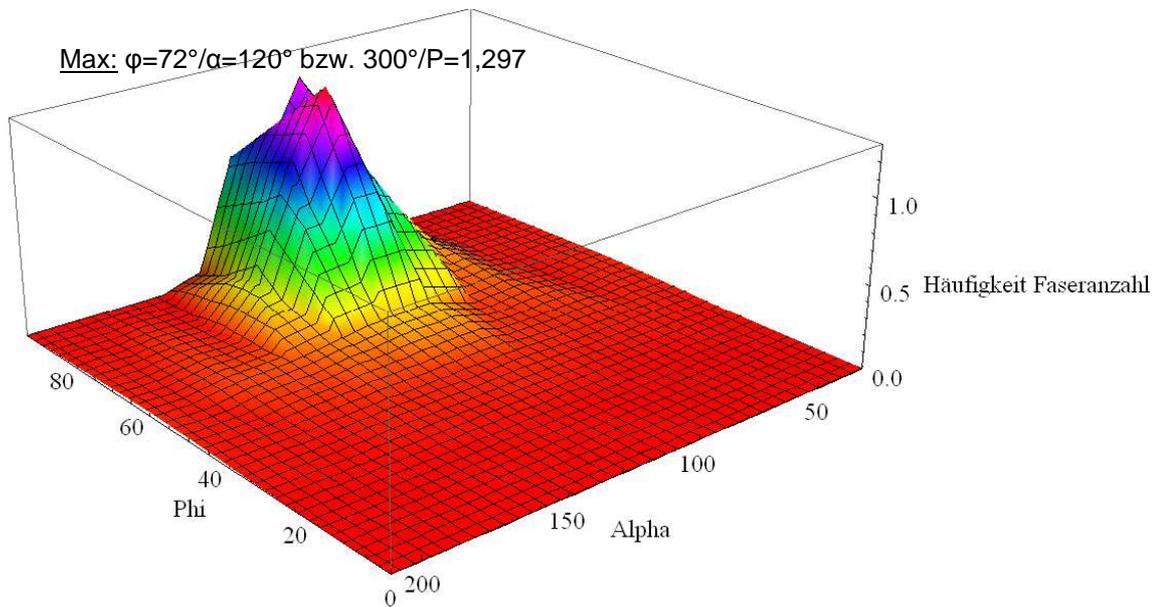


Abbildung 110: Verteilungsfläche_FS_D_2.0_5.0_03_W

Probekörper FS_D_2.0_5.0_04_W

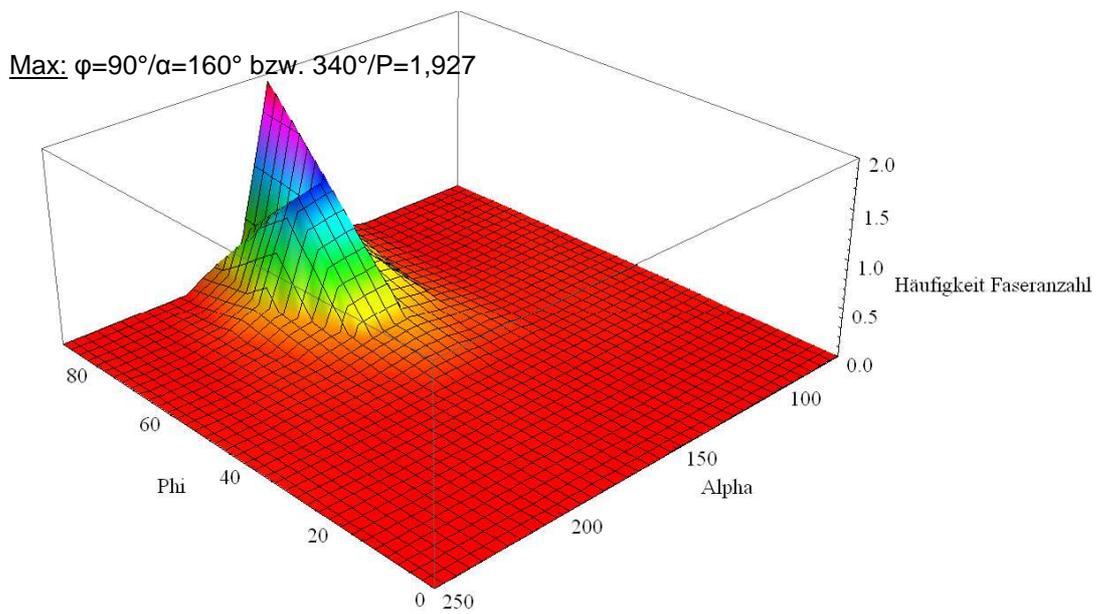


Abbildung 111: Verteilungsfläche_FS_D_2.0_5.0_04_W

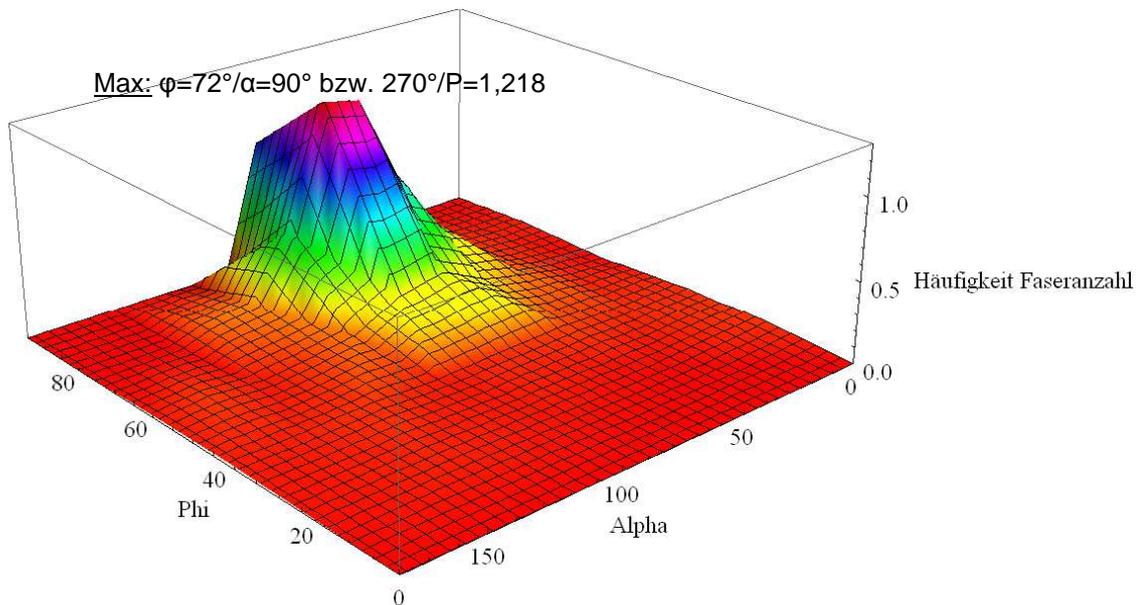
Probekörper FS_D_2.0_5.0_05_W

Abbildung 112: Verteilungsfläche_FS_D_2.0_5.0_05_W

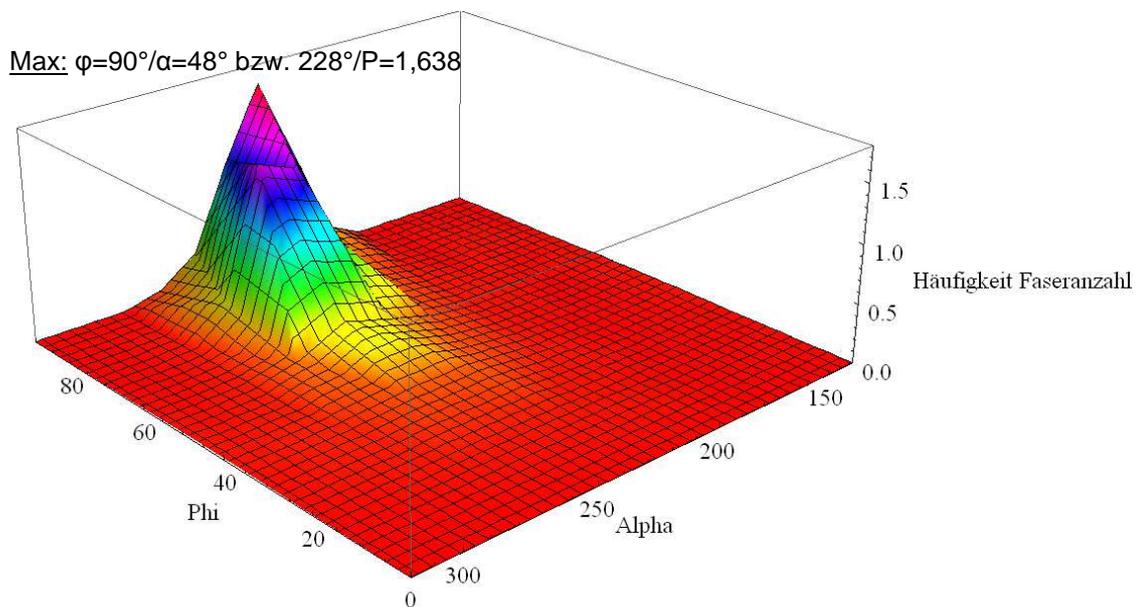
Probekörper FS_D_2.0_5.0_06_W

Abbildung 113: Verteilungsfläche_FS_D_2.0_5.0_06_W

Resümee:

Die anfangs dargestellten Orientierungsverteilungsflächen des Referenzprobekörpers haben entgegen der Erwartungen eine sehr große Streuung und zeigen nicht die erwünschte Gleichmäßigkeit an. Es ist aber zu erkennen, dass es keine ausgeprägten Hauptorientierungen der Fasern gibt. Bei den Ceracem- und Ductalproben ist beim Betrachten der Bilder W wie erwartet als Ergebnis die größte Faserhäufigkeit bei sehr großem φ . Zusätzlich ist bei fast allen Bildern eine ausgeprägte Faserorientierung dieser flach geneigten Fasern zu erkennen.

9 Gesammelte Ergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Auswertung der 21 Probekörper zusammengefasst dargestellt.

Probekörper Nr.	Stärke [cm]	Gesamtorientierungen			P_{\max}	Hauptorientierung		Fasergehalt [%]	
		Π_{uges}	Π_{vges}	Π_{wges}		α [°]	φ [°]	Nennwert	Ist-Wert
FS_C03_2.0_10_03	10	0,3156	0,7529	0,4423	0,751	132	90	2,0	2,60
FS_C03_2.0_20_01	20	0,5137	0,6124	0,4046	0,790	165 (345)	72	2,0	2,42
FS_C03_2.0_20_03	20	0,6055	0,5726	0,3121	0,939	76 (256)	90	2,0	1,84
FS_C03_3.0_5.0_01	5	0,6049	0,3662	0,5425	0,567	104 (284)	90	3,0	3,05
FS_C03_1.0_5.0_01	5	0,6049	0,3662	0,5425	0,872	180 (360)	36	1,0	1,24
FS_C03_2.0_5.0_02	5	0,4925	0,5861	0,4561	0,863	180 (360)	72	2,0	1,68
FS_C03_2.0_5.0_03	5	0,4278	0,5674	0,5242	0,736	0 (180)	54	2,0	1,46
FS_C03_2.0_6.0_02	6	0,6610	0,6355	0,2024	2,131	34 (214)	90	2,0	2,10
FS_C03_2.0_6.0_03	6	0,6315	0,6533	0,1912	2,774	132 (312)	90	2,0	1,99
FS_C03_2.0_6.0_05	6	0,5521	0,6984	0,2514	1,425	132 (312)	90	2,0	2,47
FS_C03_2.0_6.0_08	6	0,6317	0,6736	0,1627	1,805	104 (284)	90	2,0	2,04
FS_C03_2.0_6.0_09	6	0,5824	0,6975	0,2033	1,988	20 (200)	90	2,0	1,91
FS_C03_2.0_6.0_10	6	0,6091	0,6632	0,2218	1,966	20 (200)	90	2,0	2,12
FS_C03_2.0_2.5_01	2,5	0,7930	0,3819	0,2935	1,449	90 (270)	72	2,0	2,34
FS_C03_3.0_2.5_06	2,5	0,7084	0,4294	0,3715	0,879	90 (270)	72	3,0	2,55
FS_D_2.0_5.0_01	5	0,5646	0,6390	0,2745	0,869	174 (354)	90	2,0	2,17
FS_D_2.0_5.0_02	5	0,5382	0,6773	0,2375	0,875	120 (300)	72	2,0	2,25
FS_D_2.0_5.0_03	5	0,6583	0,5783	0,2371	1,297	120 (300)	72	2,0	2,05
FS_D_2.0_5.0_04	5	0,4488	0,7311	0,2895	1,927	160 (340)	90	2,0	1,9
FS_D_2.0_5.0_05	5	0,6831	0,5025	0,2837	1,218	90 (270)	72	2,0	2,02
FS_D_2.0_5.0_06	5	0,7796	0,3762	0,2918	1,638	48 (228)	90	2,0	1,96

Tabelle 44: Zusammenfassung der Ergebnisse

An den Ergebnissen der Gesamtorientierung bei den Proben ist auch bei gleicher Probenstärke und Herstellung eine große Schwankungsbreite festzustellen. Bei der Auswertung ist der Einfluss der Fließrichtung der Fasern beim Betonieren gut erkennbar.

Nimmt der Wert P_{\max} bei den Verteilungsflächen einen großen Wert an, gibt es eine sehr ausgeprägte Faserorientierungsrichtung. Ist der Wert hingegen niedriger, bedeutet es eine Ausrichtung der Fasern in einem größeren Bereich (von φ und α begrenzt).

Liegt der Wert der maximalen Faserhäufigkeit bei $\varphi = 90^\circ$ bedeutet es, dass die Annahme der einen Hauptorientierungsrichtung normal auf die Schnittfläche W korrekt war. In den anderen Fällen weicht diese Hauptorientierungsrichtung von der Annahme

ab. Im Fall $\varphi = 90^\circ$ sind die weiteren zwei Hauptorientierungen bestimmbar. Eine liegt an der Stelle von P_{\max} und die andere errechnet sich indem man den Winkel α an der Stelle von P_{\max} um 90° erhöht oder verringert.

Der Ist-Wert des Fasergehaltes ist aus den Ergebnissen der Einzelergebnisse der drei ausgewerteten Schnittflächen der Probekörper gemittelt.

10 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit, welche Teil des Projektes FibreScan ist, war es, die Auswertung der Faserorientierung anhand dreier Seiten eines Probekörpers aus UHPFRC zu erarbeiten. In der Vergangenheit sind bereits Auswertungen an einer Schnittfläche durchgeführt worden. Diese Ergebnisse waren aber sehr ungenau, da sehr flache Fasern in dieser Auswertung durch ihre bearbeitungsbedingten Unförmigkeit ausgeschieden wurden. Zusätzlich ist die Wahrscheinlichkeit eine derartige Faser zu schneiden sehr gering. Auch wenn sie nicht geschnitten wird, ist sie häufig im Volumen vorhanden. In der Drei-Bild-Auswertung werden flache Fasern einer Schnittfläche in den zwei anderen Schnittflächen ausgewertet, um diesen Fehler zu eliminieren.

Die erste Aufgabe bestand in der Probenvorbereitung. Dabei wurden Probekörper aus den biegezuggeprüften Trägern des FibreScan-Projektes herausgeschnitten. Sie haben das Format 7,5*7,5 cm und variieren in der dritten Richtung da Biegezugträger unterschiedlicher Stärke hergestellt wurden.

Da durch den Zuschnitt die Probenoberfläche sehr verschmierte, und für die Auswertung unbrauchbare, Faserellipsen aufwies, musste die Oberfläche der Probekörper bearbeitet werden. Zunächst konnten nur zwei Schnittflächen bearbeitet werden, da sich die dritte in Dickenrichtung befindet. Der erste Schritt dieser Bearbeitung wurde mit einem Roboter durchgeführt. Dieser schliff die für die Auswertung benötigten Oberflächen zuerst mit einer Schrubbscheibe plan und bearbeitete diese anschließend mit einer Schlichtscheibe zur Verbesserung der Ellipsendarstellung. Da trotz Roboterbearbeitung Ausfransungen an den Ellipsen zu verzeichnen waren, sind diese mit einem Handschleifgerät durch polieren verringert worden.

Die schnittflächenbearbeiteten Oberflächen werden anschließend hochauflösend fotografiert. Für diese Fotoaufnahmen wurde ein eigens dafür konstruiertes Foto Set-up aufgebaut. An dieser Aluminiumkonstruktion befinden sich 8 Halogenstrahler und in deren Mitte eine Aufnahme für die Kamera. Nachdem an den Probekörpern die ersten zwei Schnittflächen für die Auswertung aufgenommen wurden, sind die Probekörper normal zur Probenstärke durchgesägt worden. Die dritte benötigte Schnittfläche war so zu sehen. Sie wurde anschließend derselben Prozedur unterzogen wie die ersten beiden Auswertungsfelder um das dritte Foto der Proben zu erhalten.

Um nun die Auswertung durchführen zu können, wurde die Theorie erarbeitet. Im ersten Schritt wurde die Auswertung an einer Schnittfläche überarbeitet und verbessert. An dieser Auswertung schließt die neue Drei-Bild-Auswertung an. Dieses neue Verfahren wertet alle Fasern im Volumen aus, indem es in jeder der drei Schnittflächen nur einen bestimmten Teil der Fasern berücksichtigt. Das sind jene Fasern eines Schnittbildes, deren Projektion auf die Achse normal zur Schnittebene länger ist als die auf die zwei anderen Achsen.

Mit dieser Theorie wurde ein neues Matlab-Skript erstellt, welches auf die drei Ergebnisse der Einzelauswertungen zugreift und damit für 3 Richtungen der Faserorientierungsbeiwert ermittelt.

Um dieses Verfahren zu testen wurden zwei Referenzprobekörper hergestellt. Dazu wurden im Labor zwei Prismen mit den Abmessungen 15*15*10 cm betoniert und die

Referenzproben anschließend in der Größe von ca. 6*6*6 cm herausgesägt. Der Stahlfasergehalt der Proben beträgt 1,5 und 2 %. An diesen Referenzproben wurde die Faserorientierung bei der Auswertung von einer Schnittfläche durch Zählen der Fasern an der sägerauen und an der polierten Oberfläche bestimmt und verglichen. Im Anschluss wurden die Einzelseitenauswertungen an den polierten Schnittflächen mittels der Software durchgeführt und mit dem Ergebnis der Handzählung verglichen. Zuletzt wurde durch Kombination von je drei Seiten dieser Referenzproben die Drei-Bild-Auswertung durchgeführt und die Auswertungsergebnisse miteinander verglichen.

An den 21 ausgewählten Probekörpern aus dem FibreScan-Projekt ist im Anschluss die Drei-Bild-Auswertung durchgeführt worden.

Eine weitere Aufgabe in diesem Projekt bestand darin, Orientierungshäufigkeitsverteilungen darzustellen. Um dies zu erreichen mussten Annahmen getroffen werden, um alle möglichen Faserorientierungsrichtungen im Raum einfach darstellen zu können.

Schließlich wurden auf der Oberfläche einer Viertelkugel Klassen gleicher Größe gebildet. Jede dieser Klassen umfasst einen kleinen Flächenbereich auf der Viertelkugeloberfläche.

Bei der Bestimmung der Klassengröße wurde zunächst eine Halbkugel zwischen Nordpol und Äquator mit Hilfe des Winkels φ in Schichten geteilt. Anschließend wurde die Oberfläche dieser Schichten berechnet. Die dabei entstehende Polkappenfläche wurde als Klassengröße deklariert. Die Oberflächen aller weiteren Kugelschichten sind in Teile (durch φ und α begrenzt) der Größe der Polkappenoberfläche aufgeteilt worden. Damit erhält man 52 Klassen annähernd gleicher Größe. Alle Fasern, die in der Verlängerung ihrer Längsachse die Oberfläche der Viertelkugel in einer bestimmten Klasse durchstoßen, werden zu dieser gezählt.

In der Software Mathematica sind anschließend die Orientierungsverteilungsfächen mit Hilfe der Koordinaten φ , α und der Faserhäufigkeit dargestellt.

Quellenverzeichnis

- [1] Technische Universität Dresden: „Publikationen 2011“. Institut für Massivbau, Druck-Zug-Versuch, S. 30.
- [2] Breyer, C.: „Faserverteilung im ultrahochfesten Beton“. Eingereicht am Institut für Betonbau, Technische Universität Graz, Oktober 2008.
- [3] Leutbecher, T.: „Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfestem Beton (UHPC)“. Universität Kassel, Dissertation, November 2007.
- [4] Lin, Y.: „Tragverhalten von Stahlfaserbeton“. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Beuth Verlag GmbH, Heft 494, Berlin, 1999.
- [5] Mechtcherine, V.: „Bauen im Bestand-Hochleistungsbetone“. Teil 2 Faserbeton, Modul 4-12, Institut für Baustoffe. Technische Universität Dresden, SS 2012, S. 18.
- [6] Freytag, B. ; Heinzle, G. ; Sparowitz, L. ; Reichel, M. ; Juhart, J. ; Santner, G. ; Linder, J.: „Zerstörungsfreie Methode zur Feststellung der richtungsabhängigen Zugtrageigenschaften“. Technische Universität Graz, Antrag 2009.
- [7] Heinzle G.: „Zerstörungsfreie Bestimmung von Faserorientierung und Fasergehalt mittels Induktion“. Technische Universität Graz, März 2012, Folie 5.
- [8] Schönlin K.: „Ermittlung und Orientierung, Menge und Verteilung der Fasern in faserbewehrten Beton“, Beton- und Stahlbetonbau, 1988.
- [9] Lin, Y.-Z.: „Tragverhalten von Stahlfaserbeton“. Diss., Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe, 1996.
- [10] Heinzle, G.: „Optimale Beleuchtung“. Technische Universität Graz, Jänner 2012.
- [11] Heinzle, G.: „Schleifen/Polieren von UHPC“. Technische Universität Graz, April 2012.
- [12] Schneider, J. ; Schlatter H.P.: „Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen“. Grundwissen für Ingenieure, Zürich, 2. überarbeitete Auflage 1996.
- [13] Lüftenegger, M.: „Ermittlung der Stahlfaserorientierung an scheibenartigen Bauteilen aus ultrahochfesten Beton und Erfassen des Einflusses unterschiedlicher Herstellungsmethoden“. Diplomarbeit, Eingereicht am Institut für Betonbau an der TU-Graz, Jänner 2007.
- [14] Heinzle, G.: „Ermitteln eines durchschnittlichen Faserorientierungsbeiwertes aus einer Schnittfläche“. Technische Universität Graz, 2011.
- [15] Heinzle, G.: „Ermitteln eines durchschnittlichen Faserorientierungsbeiwertes aus drei orthogonalen Schnittflächen“. Technische Universität Graz, 2011.
- [16] Freytag, B. ; Heinzle, G.: „Bestimmung von Fasergehalt und -orientierung mittels fotografischem Verfahren - Theorie und Anwendung“. FFG-Projekt 813129/621, Endbericht Teil 3/7, Technische Universität Graz, 2009.
- [17] Tue, N.V. ; Henze, S. ; Küchler, M. ; Schenk, G. ; Wille, K.: „Ein optoanalytisches Verfahren zur Bestimmung der Faserverteilung und -orientierung in stahlfaserverstärktem UHFB“. Ernst und Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co.KG, Berlin, 2007, Heft 10

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: hochfeste Stahlfasern	10
Abbildung 2: Fasern im Teilvolumen.....	12
Abbildung 3: Rissüberbrückung durch Stahlfasern.....	14
Abbildung 4: Bezugs- und Faserrichtung mit deren eingeschlossenen Winkel [2].....	15
Abbildung 5: Infinitesimal dünne Scheibe	16
Abbildung 6: Koordinatensystem mit Winkelbezeichnungen und Faserprojektionen [7]	20
Abbildung 7: Faserauswahl.....	22
Abbildung 8: Winkel φ_y	22
Abbildung 9: I_D -Berechnung	23
Abbildung 10: I_x und I_z	23
Abbildung 11: Winkel zur x bzw. z-Achse	24
Abbildung 12: Referenzprobekörper 2 % gesägt	25
Abbildung 13: Schrub- und Schlichtscheibe	25
Abbildung 14: Schleifen einer Probe (Ceracem).....	25
Abbildung 15: Geschliffene Probe(Ceracem)	26
Abbildung 16: Luftdruckhandschleifgerät zum Polieren.....	27
Abbildung 17: Polierte Probe (Ceracem)	27
Abbildung 18: Helligkeitsunterschied	28
Abbildung 19: Foto Set up.....	29
Abbildung 20: Kamera.....	30
Abbildung 21: Bildbearbeitungsprogramm	32
Abbildung 22: Ellipsenkorrektur	33
Abbildung 23: Einfluss der Schleifrichtung (nach dem Polieren per Hand mit einer 30 μ Schleifscheibe).....	34
Abbildung 24: Faservergrößerung durch Belichtung und Poliervorgang	35
Abbildung 25: Fasern in oder neben Luftporen.....	36
Abbildung 26: Hobart II.....	37
Abbildung 27: Probe mit 1,5 % (links) und 2 % (rechts) Stahlfaseranteil	38
Abbildung 28: Referenzkörperzuschnitt	39
Abbildung 29: Markieren der gezählten Fasern	40
Abbildung 30: Globales Koordinatensystem mit Bildzuordnung	40
Abbildung 31: Zugehörige Orientierungen	44
Abbildung 32: Darstellung und Benennung der 6 Referenzprobeseiten (2 % Fasergehalt)..	45
Abbildung 33: Oberfläche Referenzprobekörper	46
Abbildung 34: Referenzprobekörper 2 %	47
Abbildung 35: Binäre schwarz weiß Bilder U1, V1 und W1 des 2 %igen Probekörpers (sägerau).....	47

Abbildung 36: Binäre schwarz weiß Bilder U2, V2 und W2 des 2 %igen Probekörpers (sägerau)	48
Abbildung 37: Binäre schwarz weiß Bilder U1, V1 und W1 des 2 %igen Probekörpers (poliert)	49
Abbildung 38: Binäre schwarz weiß Bilder U2, V2 und W2 des 2 %igen Probekörpers (poliert)	50
Abbildung 39: Faserorientierungsbeiwerte von 3-Bildauswertungen.....	52
Abbildung 40: Referenzprobekörper 1,5 %	53
Abbildung 41: Binäre schwarz weiß Bilder U1, V1 und W1 des 1,5 %igen Probekörpers (sägerau)	53
Abbildung 42: Binäre schwarz weiß Bilder U2, V2 und W2 des 1,5 %igen Probekörpers (sägerau)	54
Abbildung 43: Binäre schwarz weiß Bilder U1, V1 und W1 des 1,5 %igen Probekörpers (poliert)	55
Abbildung 44: Binäre schwarz weiß Bilder U2, V2 und W2 des 1,5 %igen Probekörpers (poliert)	56
Abbildung 45: Beispielkörper mit gekennzeichnete intakter Seite zur Entnahme des Probekörpers.....	60
Abbildung 46: Probekörperentnahme	60
Abbildung 47: Ceracem Typ 1.....	61
Abbildung 48: Prüfkörper FS_C03_2.0_10_03	61
Abbildung 49: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_10_03	62
Abbildung 50: Prüfkörper FS_C03_2.0_20_01/03	63
Abbildung 51: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_20_01	63
Abbildung 52: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_20_03	64
Abbildung 53: Prüfkörper FS_C03_3.0_5.0_01 und FS_C03_2.0_5.0_02/03	65
Abbildung 54: Probe Ceracem Typ 2	65
Abbildung 55: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_3.0_5.0_01	66
Abbildung 56: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_1.0_5.0_01	67
Abbildung 57: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_5.0_02	68
Abbildung 58: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_5.0_03	69
Abbildung 59: Lage der Biegezugproben im Seitenteil.....	70
Abbildung 60: Prüfkörper FS_C03_2.0_6.0_02/03/05/08/09/10.....	70
Abbildung 61: Probe Ceracem Typ 3.....	71
Abbildung 62: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_6.0_02	71
Abbildung 63: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_6.0_03	72
Abbildung 64: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_6.0_05	73
Abbildung 65: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_6.0_08	74
Abbildung 66: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_6.0_09	75
Abbildung 67: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_6.0_10	76
Abbildung 68: Prüfkörper FS_C03_2.0_2.5_01 und FS_C03_3.0_2.5_06.....	77
Abbildung 69: Probe Ceracem Typ 4.....	77

Abbildung 70: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_2.0_2.5_01	78
Abbildung 71: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_C03_3.0_2.5_06	79
Abbildung 72: Lage der Biegezugproben (Ductal)	80
Abbildung 73: Prüfkörper FS_D_2.0_5.0_01/02/03/04/05/06	80
Abbildung 74: Probe Ductal	81
Abbildung 75: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_D_2.0_5.0_01	81
Abbildung 76: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_D_2.0_5.0_02	82
Abbildung 77: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_D_2.0_5.0_03	83
Abbildung 78: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_D_2.0_5.0_04	84
Abbildung 79: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_D_2.0_5.0_05	85
Abbildung 80: Binäre schwarz-weiß Bilder der Probe FS_D_2.0_5.0_06	86
Abbildung 81 Zweideutigkeit der Ellipsen	87
Abbildung 82: Definition der möglichen Faserrichtungen	88
Abbildung 83: Klassen zwischen Nordpol und Äquator	89
Abbildung 84: Kugelscheibe.....	89
Abbildung 85: Berechnung von h	90
Abbildung 86: Klasseneinteilung	91
Abbildung 88: Verteilungsfläche U1	93
Abbildung 89: Verteilungsfläche U2.....	94
Abbildung 90: Verteilungsfläche V1	94
Abbildung 91: Verteilungsfläche V2	95
Abbildung 92: Verteilungsfläche W1	95
Abbildung 93: Verteilungsfläche W2	95
Abbildung 94: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_10_03_W.....	97
Abbildung 95: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_20_01_W.....	97
Abbildung 96: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_20_03_W.....	98
Abbildung 97: Verteilungsfläche_FS_C03_1.0_5.0_01_W.....	98
Abbildung 98: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_5.0_02_W.....	99
Abbildung 99: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_5.0_03_W.....	99
Abbildung 100: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_6.0_02_W.....	100
Abbildung 101: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_6.0_03_W.....	100
Abbildung 102: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_6.0_05_W.....	101
Abbildung 103: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_6.0_08_W.....	101
Abbildung 104: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_6.0_09_W.....	102
Abbildung 105: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_6.0_10_W.....	102
Abbildung 106: Verteilungsfläche_FS_C03_2.0_2.5_01_W.....	103
Abbildung 107: Verteilungsfläche_FS_C03_3.0_2.5_06_W.....	103
Abbildung 108: Verteilungsfläche_FS_C03_3.0_5.0_01_W.....	104
Abbildung 109: Verteilungsfläche_FS_D_2.0_5.0_01_W.....	105

Abbildung 110: Verteilungsfläche_FS_D_2.0_5.0_02_W.....	105
Abbildung 111: Verteilungsfläche_FS_D_2.0_5.0_03_W.....	106
Abbildung 112: Verteilungsfläche_FS_D_2.0_5.0_04_W.....	106
Abbildung 113: Verteilungsfläche_FS_D_2.0_5.0_05_W.....	107
Abbildung 114: Verteilungsfläche_FS_D_2.0_5.0_06_W.....	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergrößerung bzw. Verkleinerung von b.....	34
Tabelle 2: geschnittene Probe 2%	43
Tabelle 3: geschnittene Probe 1,5%	43
Tabelle 4: polierte Probe 2%.....	43
Tabelle 5: polierte Probe 1,5%.....	43
Tabelle 6: Auswertung der Referenzprobe 2 % (U1, V1, W1)	48
Tabelle 7: Auswertung der Referenzprobe 2 % (U2, V2, W2)	48
Tabelle 8: Auswertung der Referenzprobe 2 % (U1, V1, W1)	49
Tabelle 9: Auswertung der Referenzprobe 2 % (U2, V2, W2)	50
Tabelle 10: Auswertung der Referenzprobe 2 % poliert (V1, U2, W1)	50
Tabelle 11: Auswertung der Referenzprobe 2 % poliert (U2, V2, W1)	51
Tabelle 12: Auswertung der Referenzprobe 2 % poliert (V2, U1, W1)	51
Tabelle 13: Auswertung der Referenzprobe 2 % poliert (U1, V2, W2)	51
Tabelle 14: Auswertung der Referenzprobe 2 % poliert (U2, V1, W2)	51
Tabelle 15: Auswertung der Referenzprobe 2 % poliert (V1, U1, W2)	51
Tabelle 16: Auswertung der Referenzprobe 1,5 % (U1, V1, W1)	54
Tabelle 17: Auswertung der Referenzprobe 1,5 % sägerau	54
Tabelle 18: Auswertung der Referenzprobe 1,5 % poliert (U1, V1, W1)	55
Tabelle 19: Auswertung der Referenzprobe 1,5 % poliert (U2, V2, W2)	56
Tabelle 20: Vergleich von Handzählung und Softwareauswertung der Probe 2 %	57
Tabelle 21: Vergleich von gemittelter Handzählung und 3-Bildauswertung (U1,V1,W1)	58
Tabelle 22: Vergleich von gemittelter Handzählung und 3-Bildauswertung (U2,V2,W2)	58
Tabelle 23: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_10_03	62
Tabelle 24: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_20_01	64
Tabelle 25: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_20_03	65
Tabelle 26: Auswertung der Probe FS_C03_3.0_5.0_01	66
Tabelle 27: Auswertung der Probe FS_C03_1.0_5.0_01	67
Tabelle 28: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_5.0_02	68
Tabelle 29: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_5.0_03	69
Tabelle 30: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_6.0_02	72
Tabelle 31: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_6.0_03	72
Tabelle 32: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_6.0_05	73
Tabelle 33: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_6.0_08	74
Tabelle 34: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_6.0_09	75
Tabelle 35: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_6.0_10	76
Tabelle 36: Auswertung der Probe FS_C03_2.0_2.5_01	78
Tabelle 37: Auswertung der Probe FS_C03_3.0_2.5_06	79

Tabelle 38: Auswertung der Probe FS_D_2.0_5.0_01	82
Tabelle 39: Auswertung der Probe FS_D_2.0_5.0_02	82
Tabelle 40: Auswertung der Probe FS_D_2.0_5.0_03	83
Tabelle 41: Auswertung der Probe FS_D_2.0_5.0_04	84
Tabelle 42: Auswertung der Probe FS_D_2.0_5.0_05	85
Tabelle 43: Auswertung der Probe FS_D_2.0_5.0_06	86
Tabelle 44: Zusammenfassung der Ergebnisse	108

Anhang: Matlab Skript Erweiterungen

Dieses neue Matlab Skript greift für die Berechnung auf Daten der Excel Tabellen zu, welche mit dem bereits bestehenden Programm namens „Faserorientierung_eine_Seite“, für die Faserorientierungsberechnung erstellt werden. Einzugeben sind hierfür nur die drei Bezeichnungen der Ergebnisfiles für die Auswertung der Einzelseiten und die Graustufen, welche bei dieser Einzelseitenauswertung verwendet wurden. Die Orientierung der drei Bilder ist in Abbildung 31 dargestellt.

Dateinamen einfügen:

Damit das Programm weiß, welche drei Excel Dateien für die weitere Berechnung benötigt werden, müssen die Dateinamen in der Reihenfolge Bild U, Bild V und zuletzt Bild W eingegeben werden.

```
filename = [
'U_geschnitten_2%';...
'V_geschnitten_2%';...
'W_geschnitten_2%'];
```

Grauwert einfügen:

Der Grauwert der drei Excel Dateien, welcher in der Einzelseitenauswertung verwendet wurde, muss angegeben werden damit Matlab die Tabellen mit diesem verwendeten Grauwert später einliest.

```
grauwert = {'160',...
            '160',...
            '160'};
```

Hier wird dem Programm gesagt mit welcher Bezeichnung es die Ergebnisse speichern soll. Falls die Datei bereits besteht, soll sie gelöscht und eine neue angelegt werden.

```
file_ending = '.xls';
excel_file = strcat(filename(1,:), '_endergebnis', file_ending);
if exist(excel_file,'file');
    delete(excel_file);
end
```

Index der benötigten Spalten einfügen

Beschreibt aus welchen Spalten des bestehenden Files später die Werte eingelesen werden sollen.

```
index_Eingabe = 1;
index_dpi = 6;
index_minor = 6;
index_major = 7;
index_orientations = 8;
index_krit_all = 21;
```

Tabellen in denen Die Ergebnisse gespeichert werden. (Für die Ausgabe)

```
Tabellenblattname = ['Ergebnisse Bild X';...
                    'Ergebnisse Bild Y';...
                    'Ergebnisse Bild Z'];
```

Variablen deklarieren

```
ZRdf(1) = 0.3;
```

```
eta_x_summe = zeros(1,3);
```

```
eta_y_summe = zeros(1,3);
```

```
eta_z_summe = zeros(1,3);
```

```
etai = zeros(1,3);
```

```
anzahl = 0;
```

Diese for-Schleife führt alle Befehle vom `for` bis zum `end` für die drei Bilder einer Probe aus.

```
for picture_counter = 1:3
```

Lesen der Excel Dateien

Excel Dateien werden eingelesen.

```
[data,text,alldata] = xlsread(strcat(filename(picture_counter,:),
file_ending),strcat(filename(picture_counter,),'_',char(grauwert
(picture_counter)))));
```

Heraussuchen der Eingabedaten der drei Bilder

Bildbeschreibung aus den Excel Files

```
Eingabewerte_Bild = alldata(:,index_Eingabe);
```

Heraussuchen der kurzen Achsenwerte

```
Kurze_Achsen = data(:,index_minor);
```

Heraussuchen der langen Achsenwerte

```
Lange_Achsen = data(:,index_major);
```

Heraussuchen von Alpha (Orientations)

```
Alpha = data(:,index_orientations);
```

Heraussuchen der Bildpunkte

```
dpi = data(index_dpi-1,index_Eingabe);
```

Korrektur der Überbelichtung, Aufweitung der Faserschnittfläche infolge des Betonschneidens

Umrechnung dpi in mm

```
minor_mm = (Kurze_Achsen*25.4)/dpi;
```

```
major_mm = (Lange_Achsen*25.4)/dpi;
```

Fehlerkorrektur jeder Faser:

Da die Fasern eine kurze Achse haben, sollten die den Faserdurchmesser entsprechen. Mittels Fehlerkorrektur wird die vom Programm gemessene kurze Achse korrigiert.

```
Fehlerkorrektur_i = ZRdf(1)./minor_mm;
delta_b = (minor_mm-ZRdf(1));
major_korr = major_mm-delta_b;
```

Berechnen der Orientierungsbeiwerte in Abhängigkeit von phi

Berechnen des Faserorientierungsbeiwertes in y-Richtung.

```
etai = ZRdf(1)./major_korr;
```

a: Winkel zwischen Faser und y-Achse.

```
phi_y = acosd(etai);
```

b: Längen zur Berechnung der weiteren Winkel ermitteln.

```
l_u = sind(phi_y);
l_z = sind(Alpha) .* l_u;
l_x = cosd(Alpha) .* l_u;
```

c: Winkel zwischen Faser und x-Achse und Orientierung in x-Richtung berechnen.

```
phi_x = acosd(l_x);
etax = cosd(phi_x);
```

d: Winkel zwischen Faser und z-Achse und Orientierung in z-Richtung berechnen.

```
phi_z = acosd(abs(l_z));
etaz = cosd(phi_z);
```

Auswahl kleinstes phi_y

```
phi_min = min([phi_x,phi_y,phi_z],[],2);
ausgewertete_fasern = 1.*eq(phi_min,phi_y);
```

Anzahl der ausgewerteten Fasern pro Volumen n

Aufsummieren der ausgewerteten Fasern.

```
anzahl = anzahl + sum(1./etai.*ausgewertete_fasern);
```

Orientierung der Anzahl der Fasern pro Bild m

Berechnen der Faserorientierung der ausgewerteten Fasern in Richtung der drei Achsen.

```
eta_x_summe(picture_counter) =
sum(etax./etai.*ausgewertete_fasern);
eta_y_summe(picture_counter) = sum(ausgewertete_fasern);
eta_z_summe(picture_counter) = sum(etaz./etai.*ausgewertete_fasern);
```

Beschriftungszeile der Excel Tabellen.

```
header =
{'a','b','Alpha','etai','etax','etaz','ausgewertete_fasern','Fehlerkorrektur_i'};
```

Daten in die Excel Tabellen schreiben.

```

xlswrite(excel_file, Eingabewerte_Bild,
Tabellenblattname(picture_counter,:), 'A1');
xlswrite(excel_file, header,
Tabellenblattname(picture_counter,:), 'B1');
xlswrite(excel_file, Lange_Achsen,
Tabellenblattname(picture_counter,:), 'B2');
xlswrite(excel_file, Kurze_Achsen,
Tabellenblattname(picture_counter,:), 'C2');
xlswrite(excel_file, Alpha, Tabellenblattname(picture_counter,:),
'D2');
xlswrite(excel_file, etai, Tabellenblattname(picture_counter,:),
'E2');
xlswrite(excel_file, etax, Tabellenblattname(picture_counter,:),
'F2');
xlswrite(excel_file, etaz, Tabellenblattname(picture_counter,:),
'G2');
xlswrite(excel_file, ausgewertete_fasern,
Tabellenblattname(picture_counter,:), 'H2');
xlswrite(excel_file, Fehlerkorrektur_i,
Tabellenblattname(picture_counter,:), 'I2');
end
    
```

Ausrechnen der Gesamtorientierung:

Die Orientierungen aller Fasern eines Körpers werden zusammengefasst, um die Faserorientierung in Richtung der drei Achsen zu erhalten.

```

gesamt_eta_u = (eta_y_summe(1) + eta_x_summe(2) +
eta_x_summe(3))/anzahl;
gesamt_eta_v = (eta_x_summe(1) + eta_y_summe(2) +
eta_z_summe(3))/anzahl;
gesamt_eta_w = (eta_z_summe(1) + eta_z_summe(2) +
eta_y_summe(3))/anzahl;
    
```

Beschriftungszeile in der Excel Tabelle Gesamtauswertung.

```

header2 = {'gesamtorientierungsbeiwerte', 'gesamt_eta_u', '
gesamt_eta_v', 'gesamt_eta_w'};
    
```

Gesamtfaserorientierungen in die Excel Tabelle Gesamtauswertung schreiben.

```

Tabellename = 'Endergebnis';
xlswrite(excel_file, header2, Tabellename, 'A1');
xlswrite(excel_file, gesamt_eta_u, Tabellename, 'B2');
xlswrite(excel_file, gesamt_eta_v, Tabellename, 'C2');
xlswrite(excel_file, gesamt_eta_w, Tabellename, 'D2');
    
```