



Technische Universität Wien

Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen - Maschinenbau
Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie

Morphologische Analyse von Faserverbunden mittels Schliiffverfahren

für das Erlangen des akademischen Grades
- Diplom Ingenieur-

vorgelegt von:

Hermann Pesendorfer

Matrikelnummer: 0926860

Steingasse 7, 1030 Wien

Referent: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont.

Vasiliki-Maria Archodoulaki

Koreferent: Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Koch

Betreuung: Dipl. Ing. Martin Palmstingl

Abgabetermin: 19.06.2015

Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Masterarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	4
2.1	Fasereigenschaften	4
2.1.1	Fasermaterialien	4
2.1.2	Weitere Verbundeigenschaften	6
2.2	Herstellungsverfahren von Kurzfaserverbunden	8
2.3	Faserorientierung	10
2.3.1	Orientierungstensor	11
2.3.2	Faser und Matrix	13
3	Bestimmung von Faserorientierung und Faserlänge	15
3.1	Probe	15
3.2	2D-Schnittverfahren	15
3.2.1	Probenpräparation 2-D Schnittverfahren	16
3.2.2	Abtragshöhe und Schichteinteilung	17
3.2.3	Vorgehensweise Schnittverfahren	18
3.2.4	Resultate Schnittverfahren	20
3.3	“Two Section“ Method	30
3.3.1	Berechnungsgrundlagen der “Two Section“ Method	30
3.3.2	Probenvorbereitung	33
3.3.3	Vorgehensweise “Two Section“ Method	34
3.3.4	Analyse mit MATLAB	35
3.3.5	Resultate “Two Section“ Method	52
3.4	Veraschungsverfahren	57
3.4.1	Vorgehensweise Veraschungsverfahren	57
3.4.2	Resultate Veraschungsverfahren	58
4	Zusammenfassung	59

5	Tabellenverzeichnis	61
6	Abbildungsverzeichnis	62
7	Literaturverzeichnis	64

Abstract

Fiber composites are defined as materials containing fibers embedded in a matrix. The orientation of the fibers and the length of these are important properties of fiber composites. All these points have a significant influence on the mechanical, thermal and environmental properties of a fiber composite material. The present work deals with the orientation and the length determination of fibers by using an alternative method.

As samples, to determine the orientation and length of fibers in fiber-reinforced composites, some specimen of short glasfiber reinforced polypropylene (PP) - injection molded parts are used. These samples are divided into several layers, to make an orientation determination possible. Two different mechanical machining methods are used to remove layer by layer. In the first series the main removage is done with a grinding device and in the second series it is obtained with a milling cutter. After this several mechanical machining methods, a polishing machine improves the surface of these samples.

The determination of the length of fibers in a composite material is the main task of this thesis. In order to receive the average fiber length of the scanned images, a self-written MATLAB program is created. The calculation basis of this analysis is based on the “Two Section“ Method of Zak et al. [1]. Furthermore, a conventional fiber length determination is done with a binder burnout process. The results of the binder burnout are needed to compare and proof the results of the “Two Section“ Method.

The goal of this thesis is to allow a novel approach for an alternative way of fiber analysis.

Kurzfassung

Faserverbundwerkstoffe werden durch die verwendeten Materialien der Fasern und Matrix, der Orientierung der Fasern und deren Länge beschrieben. All diese Punkte haben einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen, thermischen und ökologischen Eigenschaften eines Faserverbundwerkstoffes. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Orientierungs- und Längenbestimmung der Fasern durch eine alternative Methode.

Als Proben zur Bestimmung der Orientierung und Länge von Fasern in Faserverbundwerkstoffen dienen Ausschnitte von Glasfaser kurzfaserverstärkten Polypropylen (PP)- Spritzgussteilen. Um eine Orientierungsbestimmung zu ermöglichen, werden die Proben jeweils in mehrere Schichten unterteilt. Anschließend wird die Schicht mittels einem mechanischen Bearbeitungsverfahren abgetragen und poliert. Für den Abtrag zwischen den Schichten werden zwei verschiedene Methoden verwendet. In der ersten Analysereihe wird der Hauptabtrag mit einem Schleifgerät und in der zweiten Analysereihe mit einem Fräser erzielt.

Die Längenbestimmung des Faserverbundwerkstoffes ist die Kernaufgabe dieser Arbeit. Es wird mithilfe eines selbstgeschriebenen MATLAB Programms automatisch die durchschnittliche Faserlänge aus den eingelesenen Bildern analysiert. Als Berechnungsgrundlage dieser Analyse dient die "Two Section" Method von Zak et al. [1]. Zudem wird zur Absicherung der Ergebnisse, welche mit MATLAB erzielt wurden, eine konventionelle Faserlängenbestimmung mittels eines Veraschungsverfahrens vollzogen.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch das selbstgeschriebene MATLAB Programm einen anderen Ansatz zur Faseranalyse und der damit einhergehenden Faserlängenbestimmung zu ermöglichen.

1 Einleitung

Den Faserverbundwerkstoffen wird seit Jahren ein Durchbruch in der Wirtschaft prognostiziert. Sogar der weltweit anerkannte Materialwissenschaftler Ashby sagte bereits in den 1980er Jahren den Durchbruch der Faserverbundwerkstoffe, wie in Abbildung 1.1 ersichtlich, voraus. Mittlerweile wurde das Jahr 2015 erreicht und das Gebiet der Faserverbunde trägt trotz ihrer großen Anwendungsvielfalt noch nicht ein derartig großes Gewicht, wie es Ashby 1987 vorhersagte.

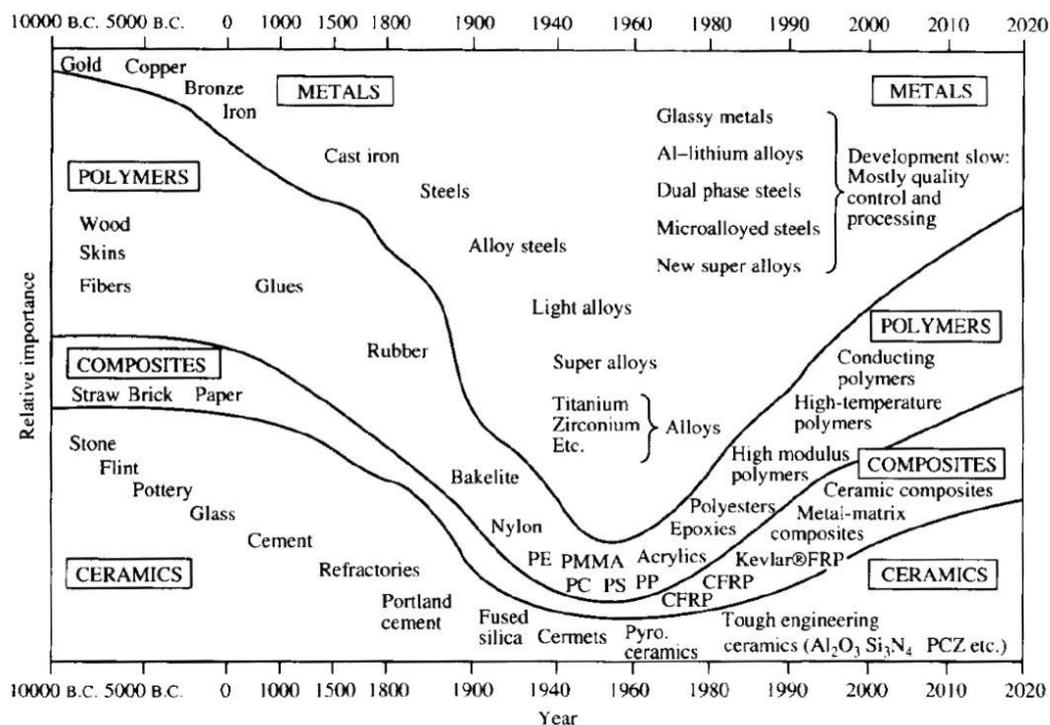


Abbildung 1.1: Materialverbrauch [2]

Die Achsen der Abbildung 1.1 zeigen in y-Richtung die relative Wichtigkeit, welche von Ashby weder mit einem Wert noch mit Gewicht beziffert wurde, und in x-Richtung die nichtlineare Zeitachse. Es ist natürlich schwierig zu bestimmen, wann das erste Mal Faserverbunde von

Menschen verwendet und hergestellt wurden. Jedoch weiß man, dass bereits im alten Testament die Verwendung von Faserverbunden dokumentiert wurde. Damals wurde zwar keine eingebettete Glasfaser in einer Kunststoffmatrix verwendet, dennoch können Strohhalme in Lehm, welche geformt zu einem Ziegel, als erste dokumentierte Faserverbundwerkstoffe angesehen werden. [3] In der Abbildung 1.1 erkennt man auch recht deutlich, dass im Zuge des ersten und zweiten Weltkrieges, die Bedeutung an Metall zugenommen hat und es ab dem Jahr 1950 eine Trendwende zu mehr Kunststoff und Faserverbunden gab.

Die Faserverbundtechnologie wird demnach immer häufiger in der Wirtschaft verwendet. Gründe dafür sind, dass zum Beispiel mit Faserverbunden der E-Modul um das 100-fache und die Festigkeit um das 5-fache gegenüber der Verwendung von Kunststoffen gesteigert werden kann. [4] In der Luft- und Raumfahrt wird seit Jahrzehnten die Faserverbundtechnologie eingesetzt um Gewicht zu sparen. Auch Automobilhersteller und Zulieferer beginnen nun mit der Fertigung von Faserverbundteilen. Dies geschieht zum Großteil um Gewicht einzusparen und/oder Steifigkeit zu erhöhen. Als Beispiele hierzu dienen der Automobilkonzern BMW, dessen Automobiltyp i3 eine Karosserie aus Faserverbunden besitzt, oder der Flugzeughersteller Airbus, der in seinem Typ A350 eine Vielzahl an Faserverbundelementen verbaut hat.

Abschließend sei noch erwähnt, dass auch ein gesellschaftlicher Wandel, nämlich zu einer Schonung der Umwelt, in den letzten Jahrzehnten geschehen ist. Zusätzlich zu den politischen Gegebenheiten stellen dies großartige Erfolgsfaktoren für die Verwendung von Faserverbunden dar, welche durch ihr Leichtbaupotential eine Schonung der Ressourcen bewirken können. [5]

Themen- und Problemstellung

Diese Arbeit beschäftigt sich in erster Linie mit der Faserorientierung und der Faserlängenverteilung bei Spritzgussfaserverbundwerkstoffen. Diese zwei Eigenschaften sind essentiell für jeden Faserverbundwerkstoff. Sie geben Auskunft über die mechanischen Eigenschaften eines Werkstückes. In einem verarbeiteten Werkstück sind diese morphologischen Eigenschaften jedoch nur mittels Tomographie zerstörungsfrei ermittelbar. Auch die Simulation am PC bietet nur eine zeitintensive überschlägige Auslegungshilfe an und kann die mechanischen Eigenschaften nur abschätzen.

Zum Ziel einer leichteren und schnelleren Auslegung von Faserverbunden wäre es von Vorteil eine andere Analysemöglichkeit der Faserverteilung bieten zu können. Auch bei einem

möglichen Schadensfall wäre es von großer Nützlichkeit, den Grund des Bruches eines Faserverbundes ohne Zerstörung ermitteln zu können.

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einer Übersicht über die Grundlagen der Faserverbundwerkstoffe (Kapitel 2). Hierbei wird insbesondere die Glasfaser und die Herstellung von Kunststoffverbunden mittels Spritzgusstechnologie beschrieben. Anschließend wird auf die Theorie der Faserorientierung eingegangen, welche die Grundlage für die darauffolgende Analyse der Längenbestimmung darstellt.

Den Schwerpunkt dieser Arbeit (Kapitel 3) bildet die Bestimmung von Faserorientierung und Faserlänge in den Verbundwerkstoffen. Hierbei wird zuerst die untersuchte Probe beschrieben und im Anschluss daran folgen die Erklärungen und Ergebnisse der unternommenen Versuche. Es wurden drei unterschiedliche Versuche durchgeführt, um ein gutes Ergebnis der Orientierung und Länge der Fasern im Probenstück zu erhalten. Dabei wird zuerst das 2D-Schnittverfahren, anschließend die "Two Section-Method und das Veraschungsverfahren thematisiert. Es wird in jedem Unterkapitel eines Versuches nochmals kurz auf versuchsspezifische Theorie eingegangen und im Anschluss daran der Versuchsaufbau und Versuchsablauf abgebildet sowie erklärt. Um eine bessere Übersicht zu gewährleisten, werden die Ergebnisse der jeweiligen Versuche gleich nach dem Versuchsablauf präsentiert.

Den Abschluss der Arbeit (Kapitel 4) bilden eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse und ein Kommentar zur Frage, ob mit der "Two Section" Method eine Längenbestimmung vorgenommen werden kann.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel dient dem grundlegenden Verständnis der Faserverbundtechnologie. Es umfasst einen kurzen Überblick über Art und Größe von Fasern sowie die möglichen Herstellungsverfahren der untersuchten Proben.

2.1 Fasereigenschaften

Grundsätzlich können Fasern hinsichtlich deren Eigenschaften, nämlich des verwendeten Materials und der Länge sowie Form unterschieden werden, worauf nun näher eingegangen wird.

2.1.1 Fasermaterialien

In der gegenständlichen Arbeit wurden ausschließlich Proben mit Kurzglasfasern analysiert, weshalb die Schwerpunkte in diesem Kapitel auf Glasfasern und auf den Herstellungsprozess von Kurzfasern gesetzt werden.

Glasfaser:

Bereits 1.500 B.C. wurden Faserverbundwerkstoffe mit Glasfasern von den Ägyptern hergestellt. Es handelte sich damals zwar erst um Glasfäden, dennoch wurden diese bereits künstlich hergestellt und können zweifelsohne als erste Glasfasern angesehen werden. [6] Selbstverständlich ist die Entwicklung von Glasfasern seither nicht stillgestanden und heutzutage werden Glasfasern in sämtlichen technischen Bereichen eingesetzt.

- Herstellung

Es wird grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Verfahren unterschieden, dem direkten Spinnen aus der Schmelze und dem zweistufigen Prozess. Beim direkten Spinnen aus der Schmelze werden die Rohstoffe in einer Schmelzwanne kontinuierlich beigemengt und bei ca. 1400 °C geschmolzen, homogenisiert und geläutert. Im zweistufigen

Prozess werden hingegen zuerst Glaspellets hergestellt, die erst in einem zusätzlichen Schritt weiterverarbeitet werden. Dieser zweistufige Prozess dient vor allem zur Herstellung von Spezialfasern für Sonderanwendungen. [7]

Der nachfolgenden Abbildung 2.1 kann man die Herstellung von Glasfasern entnehmen. Wie zu sehen ist, gibt es mehrere verschiedene Arten von Glasfasern und für die Herstellung derer, welche in den Proben dieser Arbeit verwendet wurden, muss man den Pfad bis zu den Kurzfasern folgen. Wie aus der Abbildung ersichtlich wird zuerst die Glaszusammensetzung, die bei jeder einzelnen Art von Glasfaser stark voneinander abweichen kann, im Ofen geschmolzen. Der nächste Schritt in der Glasfaserherstellung ist das geschmolzene Glas mithilfe eines Ziehprozesses durch eine Düse zu ziehen und die daraus entstehenden Filamente auf eine Spinnspule zu geben. Der letzte Schritt der Kurzfaserherstellung ist das Zerschneiden, der auf der Spinnspule befindlichen Filamente, in Kurzfasern. Die Aufteilung der Faserlänge in Kurz, Mittel und Endlosfaser wird genauer in Kapitel "Faserlänge" beschrieben.

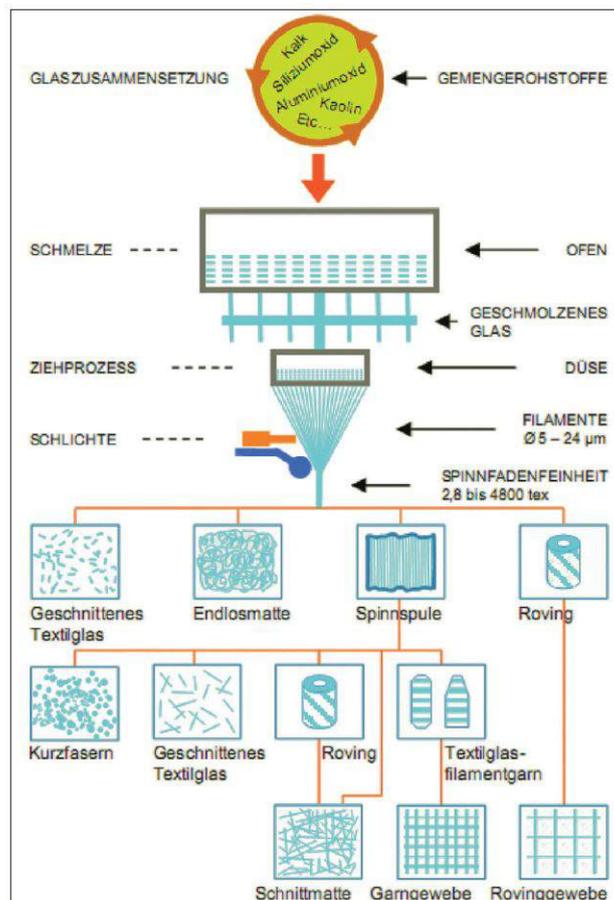


Abbildung 2.1: Herstellungsverfahren Glasfaser [7]

- Mechanische Eigenschaften

Die folgende Tabelle 2.1 zeigt die wichtigsten Eigenschaften von Glasfasern. Sie besitzen charakteristisch eine niedrige Dichte mit hoher Festigkeit. Aufgrund ihres günstigen Preis-Leistungsverhältnisses sind sie die am häufigsten eingesetzte Faserart in Kunststoffverbunden und haben eines ihrer Anwendungsgebiete in der Luft- und Raumfahrt. [7]

Tabelle 2.1: Eigenschaften Glasfaser [7]

Eigenschaften	E-Glas	E-CR-Glas	D-Glas	R-Glas	AR-Glas	C-Glas
Dichte [$\frac{g}{cm^3}$]	2,60	2,72	2,14	2,53	2,68	2,52
Zugmodul [GPa]	73	73	55	86	73	70
Bruchdehnung [%]	4,8	4,8	4,6	4,8	4,4	4,8
Erweichungspunkt [$^{\circ}C$]	846	882	775	985	773	750

Weitere Fasermaterialien:

Neben den in dieser Arbeit untersuchten Glasfasern gibt es noch etliche weitere Fasermaterialien, wie beispielsweise:

- Kohlenstofffaser,
- Aramidfaser,
- PBO-Faser,
- Polyethylenfaser,
- Naturfaser.

Diese beachtliche Varietät an Fasermaterialien bietet die Möglichkeit, dass der passende Werkstoff mit den gewünschten Eigenschaften für fast jeden Anwendungsbereich zur Verfügung gestellt werden kann.

2.1.2 Weitere Verbundeigenschaften

Die Verbundeigenschaften werden, wie zuvor schon erwähnt, auch durch ihre Form, Länge, Fasergehalt und Faserorientierung bestimmt. Der folgenden Aufzählung kann man die klassischen Einteilungsmöglichkeiten entnehmen.

- Faservolumsgehalt:

Der Faservolumsgehalt bestimmt den % Volumsgehalt an Fasern im Werkstück.

- Faserlängenverhältnis:

Das Faserlängenverhältnis gibt das Aspektverhältnis der Länge zu Durchmesser der Faser an.

- Faserorientierung:

Die Faserorientierung gibt Aufschluss über die Lage und Richtung der Faser. Dies wird noch ausführlicher in Kapitel 2.3 behandelt.

Faserlängenverhältnis

Die Faserform ist vom Verhältnis der Oberfläche zum Volumen des Körpers und dem Faserlängenverhältnis (Aspektverhältnis $a = \frac{\text{Länge}}{\text{Durchmesser}}$) abhängig. Dieses Aspektverhältnis hilft zwischen einer Faser in Plattenform oder einer klassischen länglichen Faserform zu unterscheiden. Ist das Aspektverhältnis kleiner 1 spricht man von einer Platte und größer 1 von einer Faser. Man kann in der nachstehenden Abbildung 2.2 eine Wende der Linie des Aspektverhältnisses bei ca. 1 erkennen.

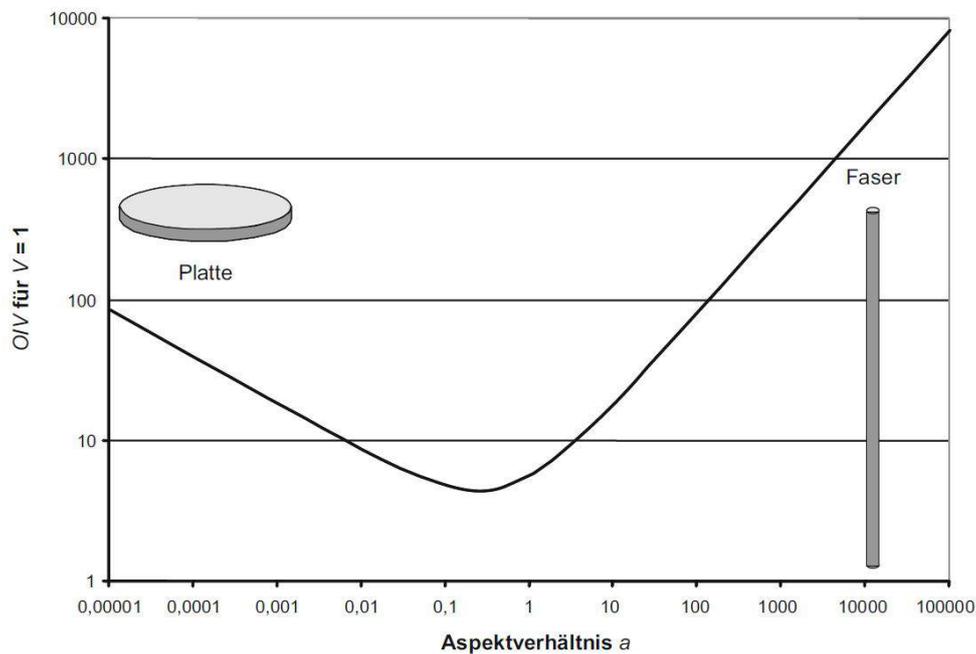


Abbildung 2.2: Faserform [4]

Des Weiteren werden Fasern nochmals hinsichtlich ihrer Länge unterteilt. Auch diese Unterteilung hat erheblichen Einfluss auf die Auswahl des jeweiligen Herstellungsverfahrens und

auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstückes, wie in Abbildung 2.3 ersichtlich ist. Man kann leicht erkennen, dass die Steifigkeit schon im Bereich von 0,1 bis 1 mm stark zunimmt. Hervorzuheben ist, dass bereits im Bereich von 0,1 bis 0,2 mm eine Zunahme von gesamt ca. 30% erfolgt. D.h. schon wenige μm haben großen Einfluss auf die Steifigkeit. Die Festigkeit steigt nahezu linear bis 10 mm an und erreicht dort ihr Niveau von 95%. Zuletzt abgebildet ist die Schlagzähigkeit, welche vor allem im Bereich von 1-10 mm stark zunimmt.

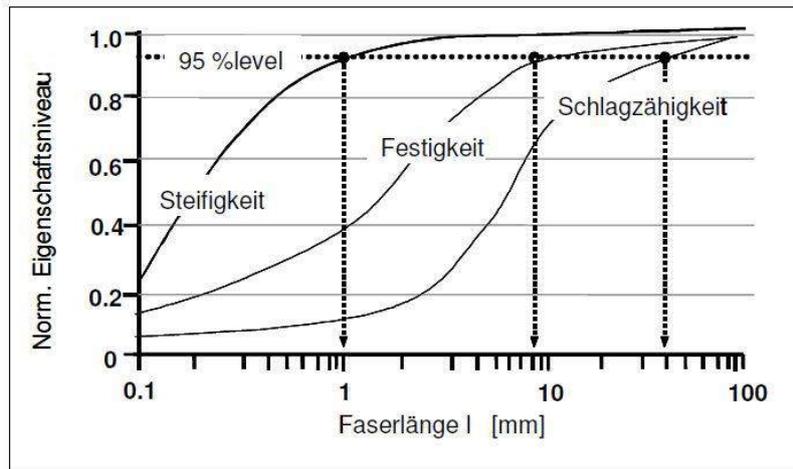


Abbildung 2.3: Schematische Fasereffektivität nach Schemme [8] bzw. Schijve [9]

Durch die Länge einer Faser ergeben sich starke Abweichungen der mechanischen Eigenschaften. Deshalb erfolgt eine Einteilung der Fasern hinsichtlich deren Länge. Radkte [10] unterteilte die Faserlängen folgendermaßen:

- Kurzfaserverstärkung: Faserlänge < 1 mm
- Mittlere Faserlänge: Faserlänge zwischen 1 mm - 5 mm
- Langfaserverstärkung: Faserlänge > 5 mm

2.2 Herstellungsverfahren von Kurzfaserverbunden

Die Wege zur Herstellung von Faserverbunden sind sehr vielfältig. Die große Anzahl an Variationen liegt den unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten von Matrix und Fasern zugrunde. Selbst wenn man die gleiche Matrix und ein gleiches Fasermaterial verwendet, kann man zwischen unterschiedlichen Herstellungsverfahren wählen. In dieser Arbeit wird nur kurz das Herstellungsverfahren vorgestellt, welches zur Herstellung der Probe in Kapitel 3 benutzt wurde - das Spritzgießen.

Spritzgießen

Seit Mitte der 80er Jahre wird in der Automobilindustrie das Verfahren des Faserverbund-spritzgusses angewendet. Faserverbundspritzgießen ist ein kontinuierlicher und beherrschbarer Prozess und lässt sich serienreif anwenden. Als klassische Beispiele der Herstellung zählen in der Automobilindustrie der Tankdeckel oder die Scheinwerfer. [11]

Der Spritzguss eines Faserverbundmaterials läuft ähnlich einem normalen Spritzguss ab, mit dem Unterschied, dass Fasern in das Granulat beigemischt oder erst später in der Schnecke hinzugefügt werden. Diese beiden Verfahren werden in den nachfolgenden Abbildungen 2.4 und 2.5 dargestellt:

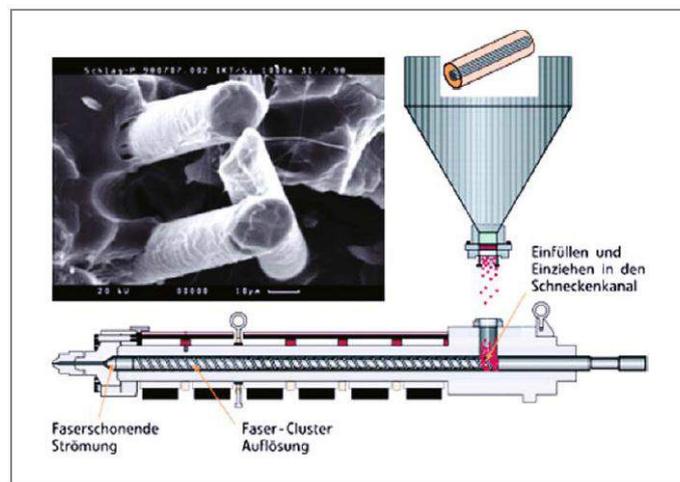


Abbildung 2.4: Aufschmelzen von Fasergranulaten in der Spritzgussmaschine [7]

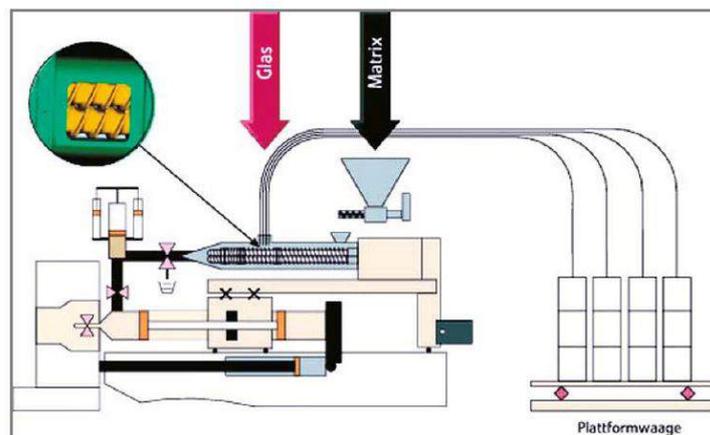


Abbildung 2.5: Prinzip der Direktverarbeitung von Glasfaserrovings [7]

In der ersten Abbildung (2.4) ist der schematische Aufbau einer Spritzgussmaschine mit Fasergranulaten ersichtlich. Die Granulate bestehen aus Fasern, welche jeweils mit der gewünschten Matrix ummantelt sind. Dieses Granulat wird in die Schnecke eingeführt und dort erhitzt, was die Matrixummantelung zum Schmelzen bringt. Das flüssige Granulat wird anschließend in die gewünschte Form gepresst und dort zum Erstarren gebracht. Zur Optimierung des Verfahrens schließt man das Formgebungswerkzeug nicht komplett, sondern behält bis zum Einspritzen einen wenigen Millimeter großen Prägespalt. Mit diesem Prägespalt kann das Material leichter und mit geringerer Scherbelastung fließen. [11]

In der zweiten Abbildung (2.5) sieht man den schematischen Aufbau einer Spritzgussmaschine mit direktverarbeiteten Glasfaserrovings. Diese Rovings stellen in der Herstellung einen Zwischenschritt zwischen Filament und Kurzfasern dar. Es wird in diesem Verfahren ein Granulat, welches nur aus der Matrix besteht, verwendet und die Fasern zu einem späteren Zeitpunkt in die Schnecke zugeführt. Diese Zuführung zu einem späteren Zeitpunkt bewirkt eine geringere Brechung der Fasern während des Spritzgussvorganges. Kamal et al. [12] bewiesen in einem herkömmlichen Spritzgussvorgang eine Brechung der zugeführten Faser auf ca. 38%, nämlich von 0,71mm auf eine Länge von 0,27mm. Auch in diesem Verfahren wird ein wenige Millimeter großer Prägespalt gehalten, um einen leichteren Fluß mit weniger Scherbelastung zu ermöglichen.

2.3 Faserorientierung

Die Faserorientierung wird hauptsächlich durch zwei Winkel (Φ & Θ) beschrieben, wobei Θ den Schrägungswinkel (“misalignment angle“) darstellt. Er beschreibt die Orientierung der Faser relativ zur Normalen der Schnittebene und wird mittels des Arcuscosinus und dem Quotienten der kleinen und der großen Halbachse der Ellipse berechnet. Θ lässt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$\Theta = \arccos\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.1)$$

Der Azimuthwinkel Φ stellt den Rotationswinkel zwischen den Hauptachsen dar. Der Azimuthwinkel lässt sich anhand der Lage der Faser in der Schnittebene definieren. Anhand der Abbildung 2.6 sind diese zwei Winkel ersichtlich:

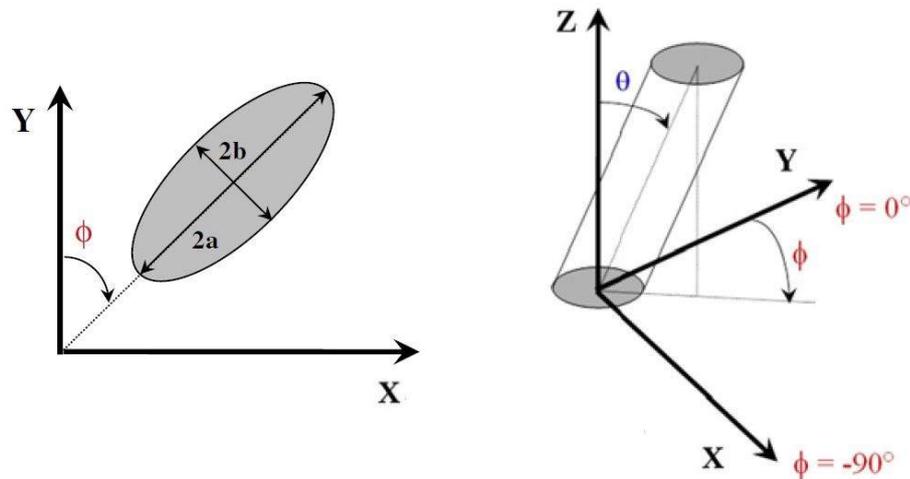


Abbildung 2.6: Azimuth- und Schrägungswinkel [13]

Mittels eines 2D Bildes kann leider nicht vorhergesehen werden, in welche Richtung die Faser in der Z-Ebene gerichtet sein wird (siehe Abbildung 2.7). Dies ist ein Problem, das insbesondere die automatische Auswertung einer Probe mit mehreren Schichtbildern erschwert. Diese Problematik wird in Kapitel 3.3 nochmals ausführlicher behandelt.

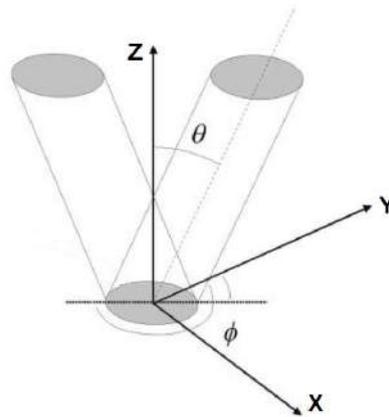


Abbildung 2.7: Faserrichtung [13]

2.3.1 Orientierungstensor

Mittels den Orientierungswerten, Azimuth und Schrägungswinkel, berechnen Advani, Bay und Tucker [14] [15] einen Orientierungstensor zweiter Ordnung (Gl. 2.2), der Aufschluss über die Ausrichtung der individuellen Faser k gibt. Der Orientierungstensor wird durch die

Diagonalkomponenten der Faserorientierung (a_{ii}) folgendermaßen beschrieben:

$$\begin{aligned}
 a_{11}^k &= \sin^2(\Theta^k) * \cos^2(\Phi^k) \\
 a_{22}^k &= \sin^2(\Theta^k) * \sin^2(\Phi^k) \\
 a_{33}^k &= \cos^2(\Theta^k) \\
 a_{12}^k &= a_{21}^k = \sin^2(\Theta^k) * \cos(\Phi^k) * \sin(\Phi^k) \\
 a_{13}^k &= a_{31}^k = \sin(\Theta^k) * \cos(\Theta^k) * \cos^2(\Phi^k) \\
 a_{23}^k &= a_{32}^k = \sin(\Theta^k) * \cos(\Theta^k) * \sin(\Phi^k)
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

In Abbildung 2.8 sind Orientierungswerte für einen Orientierungstensor ersichtlich. Eine, wie man später noch in den Proben sehen kann, isotrope Faseranordnung liegt beispielsweise bei a_{11}, a_{22} und $a_{33} = 0,33$ vor.

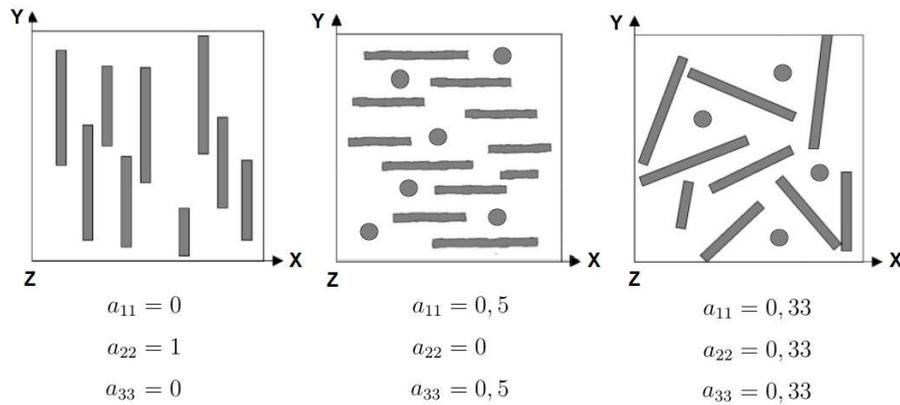


Abbildung 2.8: Orientierungswerte für Faserorientierungstensoren [16]

Bei der Berechnung der Tensoren aus 2D Bildern muss eine Korrektur der Gewichtung der Fasern erfolgen. Bei einem 2D Schnitt ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass eine senkrecht zur Schnittebene verlaufende Faser sichtbar ist als eine parallel zur Schnittebene verlaufende Faser. In der Literatur gibt es dazu verschiedene Gewichtungsansätze, einer davon ist zum Beispiel der Korrekturfaktor von Fu [17], welcher das Abschneiden einer Faser bei der Bildaufnahme korrigiert. In dieser Arbeit hingegen wird die Korrektur von Eberhardt und Clarke [16], wie in den folgenden Gleichung 2.3 zu sehen ist, verwendet. Auch dieser Ansatz berücksichtigt das Abschneiden einer Faser am Bildrand und zusätzlich den möglichen Fehler in der Abbildung einer Ellipse der Faser. In Abbildung 2.9 ist der Fehler einer nicht vollständig abgebildeten Faser zu erkennen.

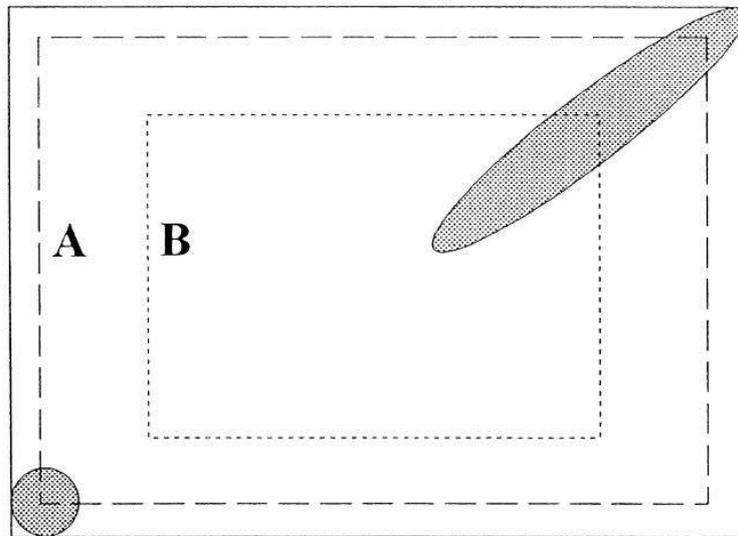


Abbildung 2.9: Nicht vollständig abgebildete Fasern [16]

Der Fall A, Abbildung 2.9, stellt eine Faser mit niedrigem Θ Winkelwert dar und Fall B eine Faser mit hohem Θ Winkelwert.

In den Gleichungen zum Gewichtungsansatz 2.3 stellt $P(\Theta)$ die Wahrscheinlichkeit eine Faser zu finden, bezogen auf ihre Länge L und Durchmesser D , dar.

$$F^k = \frac{1}{P(\Theta)} = \frac{1}{L * \cos(\Theta) + D * \sin(\Theta)} \quad (2.3)$$

$$a_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n F^k * a_{ij}^k}{\sum_{k=1}^n F^k}$$

2.3.2 Faser und Matrix

Die Lasten, die auf ein Bauteil einwirken, werden in einem Verbundwerkstoff auf zwei Komponenten, nämlich Fasern und Matrix aufgeteilt. Der Hauptanteil dieser Last wird von den Fasern getragen und die Matrix dient zur Stabilisierung der Lage und gegen ein Knicken der Fasern. Die Fasern besitzen im Gegensatz zur Matrix sehr gute mechanische Eigenschaften. Die Eigenschaften des Faserverbundes liegen meist etwas unterhalb der Fasereigenschaften. Faservolumengehalt und Fertigungsverfahren haben überdies hinaus auch wesentliche Einflussnahme auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils.

Zur Veranschaulichung der Faser, Matrix und Verbundeigenschaften dient ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abbildung 2.10. Hierbei ist hervorzuheben, dass bei einer Belastung in Richtung der Fasern (σ_{II}) die Verbundfestigkeit etwas unterhalb der reinen Faserfestigkeit liegt. Bei einer Belastung, die senkrecht zur Faserrichtung (σ_{\perp}) liegt, ist die Verbundfestigkeit sogar leicht unterhalb der Festigkeit der reinen Matrix. Grund dafür ist eine mikroskopische Kerbwirkung, durch die relativ steifen Fasern und der weichen Matrix hervorgerufen wird. [6]

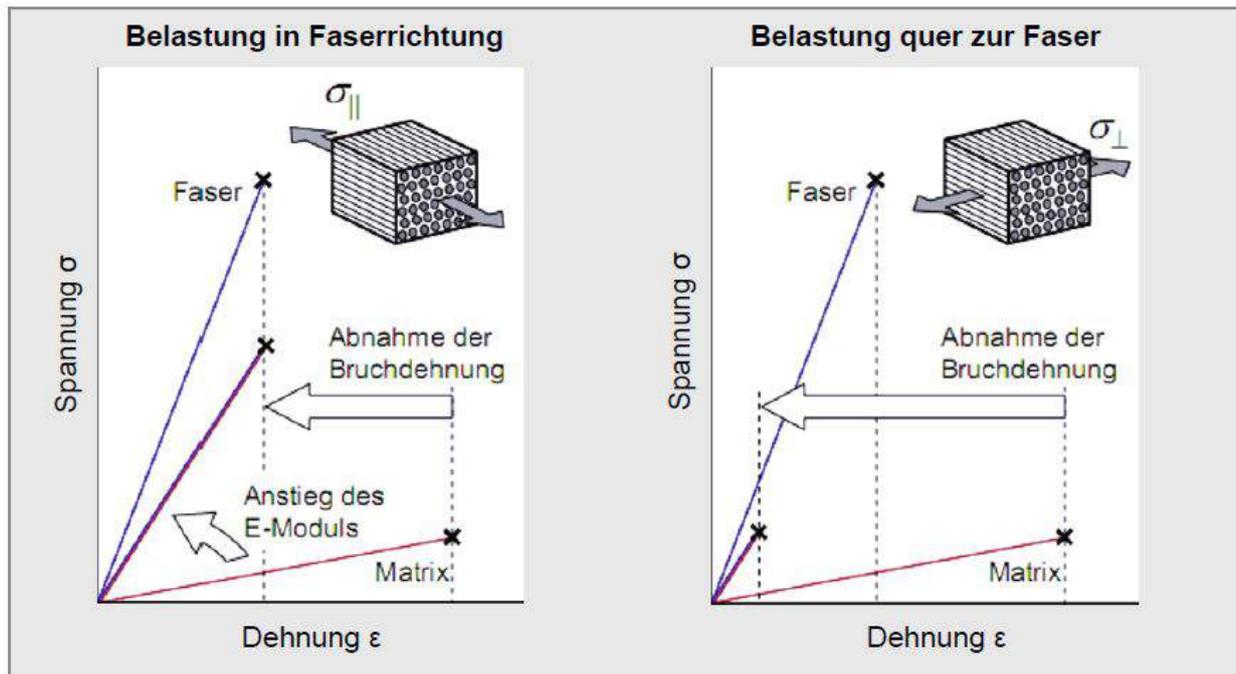


Abbildung 2.10: Qualitative Spannungs-/Dehnungsdiagramme [6]

3 Bestimmung von Faserorientierung und Faserlänge

3.1 Probe

In der gegenständlichen Arbeit wurde als Probenstück ein Glasfaser kurzfaserverstärktes Polypropylen (PP)-Spritzgussteil verwendet. Dieses wurde an mehreren unterschiedlichen Stellen untersucht, wie Abbildung 3.1 zu entnehmen ist.



Abbildung 3.1: Probenstellen

3.2 2D-Schnittverfahren

Mithilfe des 2D-Schnittverfahren erhält man eine vollständige Faser-Orientierungsverteilung (engl. "fibre orientation distribution"). [13] Die Vorgangsweise ist hierbei folgendermaßen:

- Probenpräparation,
- Unterteilung der Probe in mehreren Schichten,
- Bearbeitung der jeweiligen Schicht,
- Bildaufnahme,
- Analyse des Bildes - Bestimmung von Φ und Θ .

3.2.1 Probenpräparation 2-D Schnittverfahren

Die Proben wurden folgendermaßen erstellt:

- Probenausschnitt,
- Entfernung des Grates an der Probe,
- Einbetten der Probe mit ARALDIT[®] AY 103-1 / HY 991,
- Zusätzliche Fixierung der eingebetteten Probe auf einem Glaträger durch einen Zweikomponenten Klebstoff bei einer Fräsbearbeitung.

In Abbildung 3.2 ist die Erstellung einer Probe von links nach rechts abgebildet. Links findet man die entgratete Probe, daraufhin die eingebettete und am rechten Rand zwei Proben für die Analyse. Die zweite Probe von rechts stellt die Schleifprobe dar und die rechte Probe im Bild die Fräsprobe.

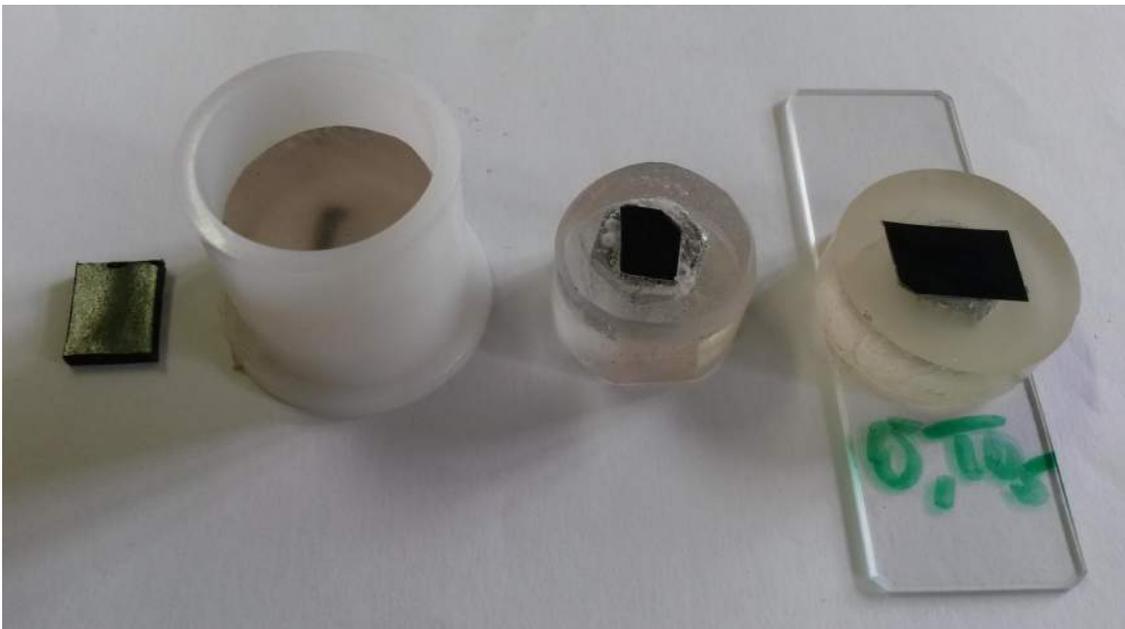


Abbildung 3.2: Probenpräparation 2-D Schnittverfahren

3.2.2 Abtragshöhe und Schichteinteilung

Die Proben wurden in sieben Schichten unterteilt. Die erste Schicht wurde nur minimal bearbeitet, um die Oberflächengüte zu erhöhen. Alle weiteren Schichten wurden, bezogen auf die erste Schicht, folgendermaßen abgetragen:

- Schicht 1: ca. $-3 \mu\text{m}$
- Schicht 2: $-150 \mu\text{m}$
- Schicht 3: $-300 \mu\text{m}$
- Schicht 4: $-700 \mu\text{m}$
- Schicht 5: $-1,20 \text{ mm}$
- Schicht 6: $-1,70 \text{ mm}$
- Schicht 7: $-2,00 \text{ mm}$

In der Abbildung 3.3 wird eine Probe im Querschnitt mit den eingezeichneten sieben Schichten dargestellt.

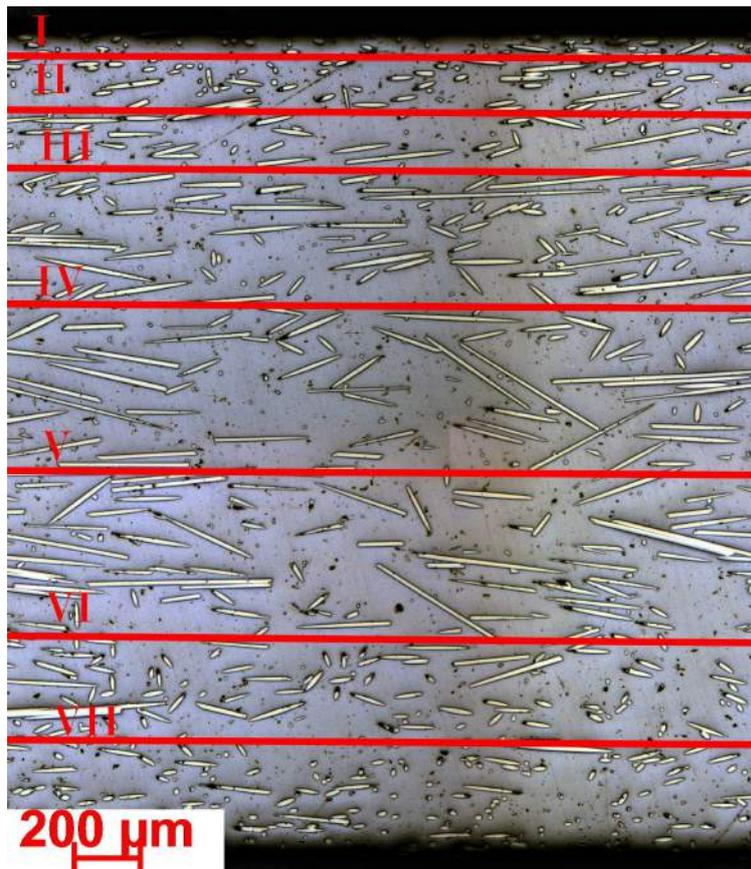


Abbildung 3.3: Schichteinteilung der Proben

3.2.3 Vorgehensweise Schnittverfahren

Das 2D-Schnittverfahren wurde, wie im Abschnitt Probenpräparation schon kurz erwähnt, in zwei Bearbeitungsschrittverfahren unterteilt. Im ersten Verfahren wurde folglich nur mittels Schleifen die jeweilige Abtragshöhe erzielt. Der Schleifvorgang erfolgte folgendermaßen:

- Schleifen (bis zu einer Körnung von 4000),
- Polieren,
- Ätzen (8-10 min. mittels einer 8% HF Lösung),
- Bildaufnahme in 2,5x Vergrößerung.

Die Abweichung zu den Sollabtragshöhen zwischen den Schichten ist der folgenden Tabelle 3.1 zu entnehmen:

Tabelle 3.1: Abtragshöhe Schleifen

Probe	Sollabtrag [mm]	0°	90°	R. Ecke
Schicht 1	0,00	-0,02	-0,03	-0,02
Schicht 2	-0,15	-0,06	-0,05	-0,02
Schicht 3	-0,30	0,00	-0,10	-0,01
Schicht 4	-0,70	-0,01	-0,05	-0,02
Schicht 5	-1,20	-0,15	-0,02	-0,03
Schicht 6	-1,70	-0,10	+0,04	+0,01
Schicht 7	-2,00	0,00	-0,02	-0,03

Durch das Schleifverfahren wurde zwischen den Schichten der inplane Winkel Ψ stark erhöht und dadurch konnten mit der anschließenden Analyse keine exakte Werte ermittelt werden. Um den Winkel Ψ zu reduzieren, erfolgte im zweiten Verfahren der Hauptabtrag mittels Fräsen. Die verwendete Fräsmaschine (Leica SM2500 & SP2600) ist in Abbildung 3.4 ersichtlich. Folgende Parameter wurden dabei verwendet:

- Fräskopf:
Diamantschneide,
Spanwinkel $+3^\circ$,
Freiwinkel $+4^\circ$.
- Fräsmaschine:
Vorschub $1,5 \frac{mm}{s}$,
Zustellhöhe $5 \mu m$,

Umdrehung $2000 \frac{U}{min}$.

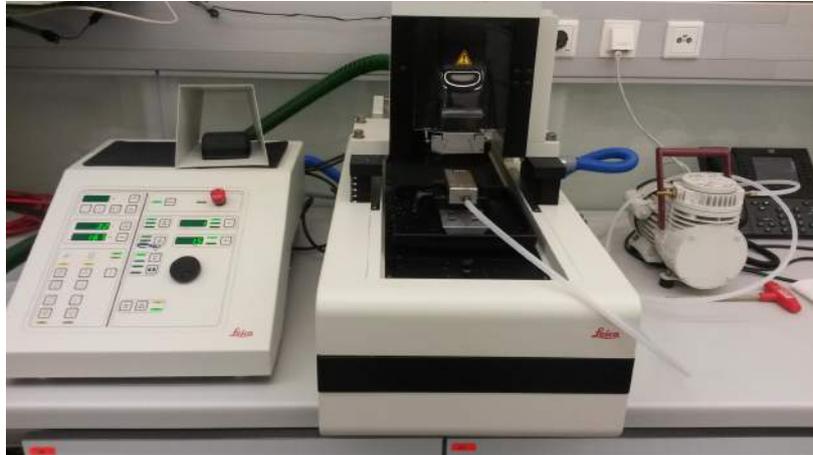


Abbildung 3.4: Fräsmaschine

Um die Proben in die Fräsmaschine einspannen zu können, mussten diese zuerst mittels einem Zweikomponentenklebstoff auf einen Glasträger befestigt werden. Anzumerken ist hierbei, dass durch den Freiwinkel von $+4^\circ$ eine weitere Oberflächenbearbeitung notwendig war. Die Oberfläche wurde nach dem Fräsvorgang noch mit einer Körnung von 4000 geschliffen und anschließend folgten die restlichen Schritte der herkömmlichen Schleifmethode: Polieren, Ätzen und Bildaufnahme. Der Abtrag mittels Fräsen wurde so gewählt, dass noch weitere $15 \mu\text{m}$ für die manuelle Bearbeitung verblieben.

Tabelle 3.2: Abtragshöhe Fräsen

Schicht	Sollabtrag [mm]	Abtrag mittels Fräser
Schicht 1	0,00	-0,05
Schicht 2	-0,15	-0,135
Schicht 3	-0,30	-0,285
Schicht 4	-0,70	-0,685
Schicht 5	-1,20	-1,185
Schicht 6	-1,70	-1,685
Schicht 7	-2,00	-1,985

Die Bildaufnahme erfolgte durch ein Lichtmikroskop in 2,5 facher Vergrößerung und die Analyse durch AxioVision. Durch die manuelle Auflage der Proben in das Mikroskop erhält

man einen kleinen Fehler innerhalb des Winkels Φ . Dieser Fehler wird in einem Bereich von weniger als 5° angenommen und konnte leider nicht entfernt werden.

Zur Analyse wurde AxioVision, ein Bildbearbeitungs- und Analyseprogramm der Firma Zeiss, verwendet. AxioVision bietet eine halb automatische Analysemöglichkeit der zuvor aufgenommenen Bilder und berechnet unter anderem folgende Werte automatisch:

- Kleine Ellipsenhalbachse,
- Große Ellipsenhalbachse,
- Winkel zur Hauptachse der Ellipse Φ ,
- Faserlänge,
- Max. Feret,
- Min. Feret.

Diese Ergebnisse werden in Form einer CSV Datei ausgegeben, mit welcher die Weiterverarbeitung durchgeführt wurde. Es wurden folgende Werte berechnet:

- Verteilungsdiagramm von Φ in 10° Schritten von 0° - 180° ,
- Verteilungsdiagramm von Θ in 5° Schritten von 0° - 90° ,
- Orientierungstensor .

3.2.4 Resultate Schnittverfahren

Es werden nun die Ergebnisse der verschiedenen Probestellen in Diagrammen abgebildet und jeweils erklärt. Außerdem wird zu jeder Probenstelle ein Beispiel Analysefoto gezeigt, um einen Eindruck der Faserrichtungen der Probenstellen zu erhalten.

Probenstelle: 1

In der Abbildung 3.5 sind Bilder der zweiten Schicht der Probenstelle 1 aus den beiden Bearbeitungsverfahren Schleifen und Fräsen abgebildet. Man kann schon anhand dieser zwei Analysebilder leicht erkennen, dass die Hauptorientierungsrichtung der Fasern bei 90° liegt.

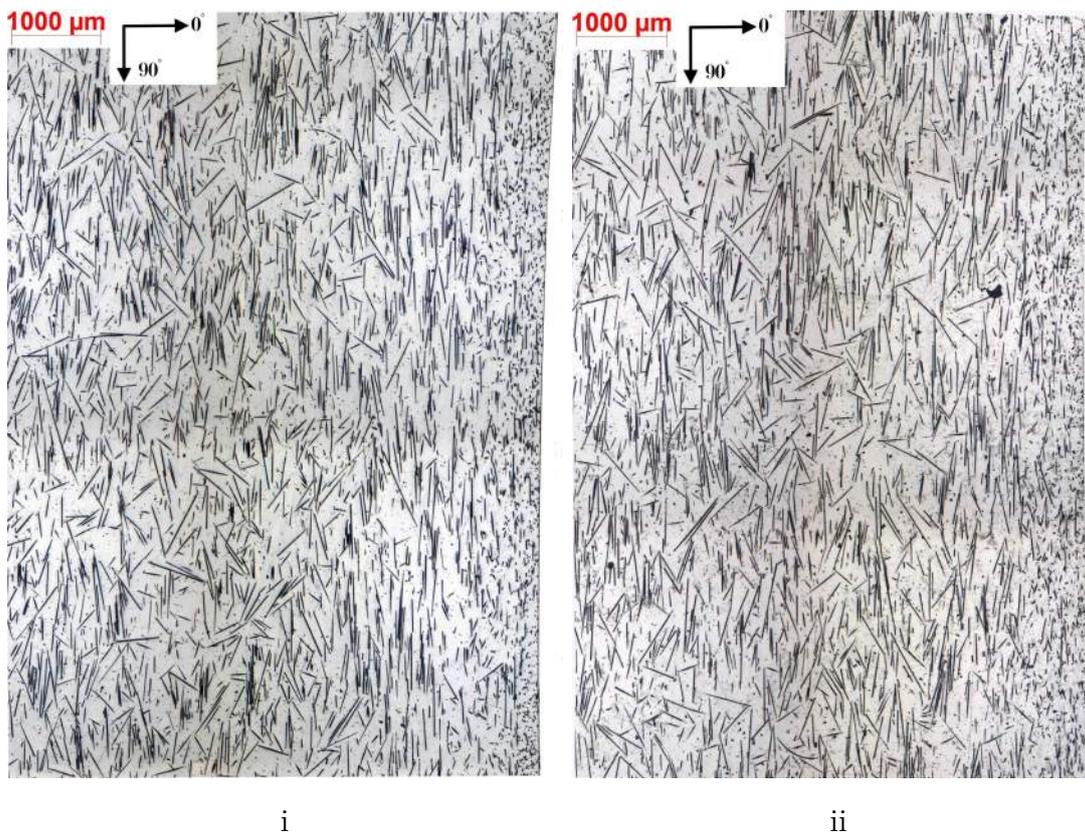
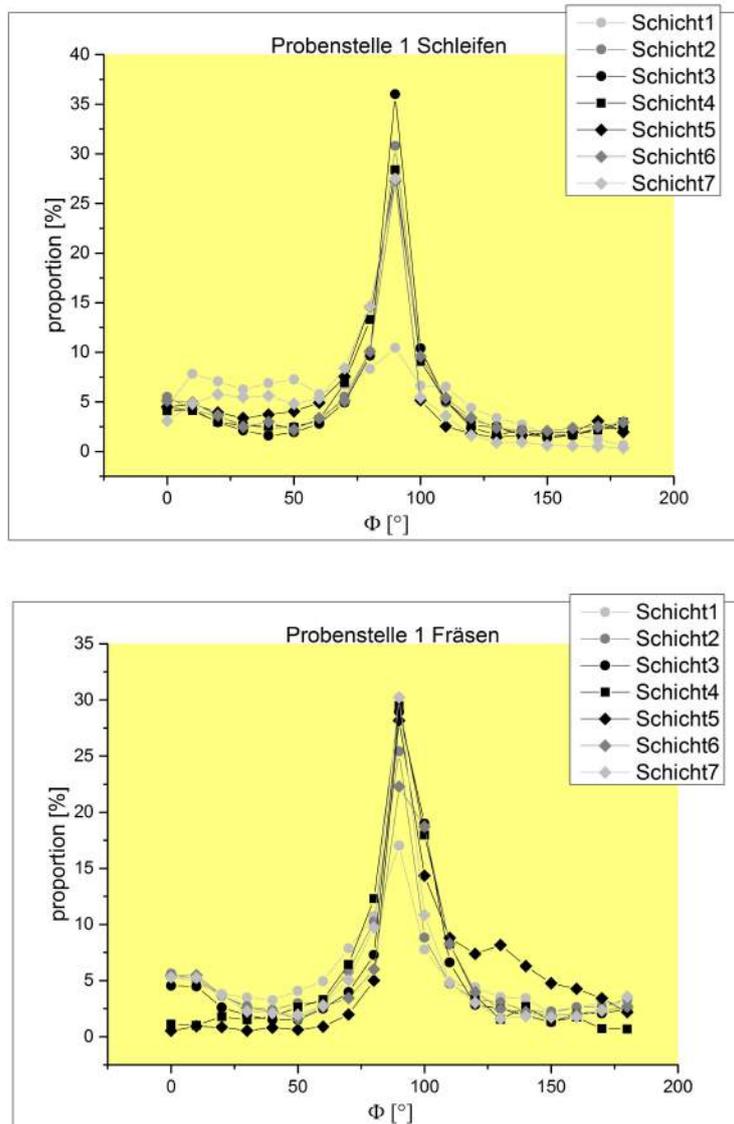


Abbildung 3.5: Probenstelle 1 Original Bilder Schleifen (i) und Fräsen (ii)

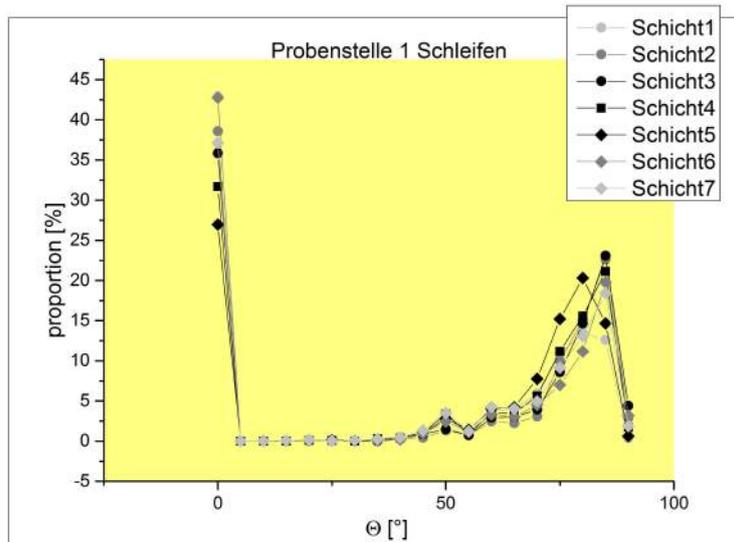
In den nachfolgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der einzelnen Stellen ersichtlich. Es wurde jeweils die Schliiffprobe über der Fräsprobe angeordnet, um die jeweiligen Unterschiede leicht erkenntlich zu machen. Unterhalb der Diagramme befindet sich passend zu der jeweiligen Probe der gewichtete Orientierungstensor.

Die Fließrichtung hat einen erheblichen Einfluss auf die Orientierung der Fasern im Werkstück. Man kann in den nachstehenden Diagrammen leicht die Hauptfließrichtung erkennen und erahnen. Im ersten Beispiel Abb. 3.6, der Probenstelle 1, liegt die Hauptorientierungsrichtung des Winkels Φ in Bereich der 90° . Diese Orientierung entsteht, weil die Probenstücke direkt in der Fließrichtung des Spritzgusses liegen. Die Orientierung in Fließrichtung ist vor allem in den mittleren Schichten sehr ausgeprägt. In den Randschichten hingegen ist die Strömungswirkung nicht so groß wie in den mittleren Schichten und hat deswegen weniger Einfluss auf die Orientierungsrichtung. Als Beispiel ist hier Schicht 1 in der Schleifprobe hervorzuheben.

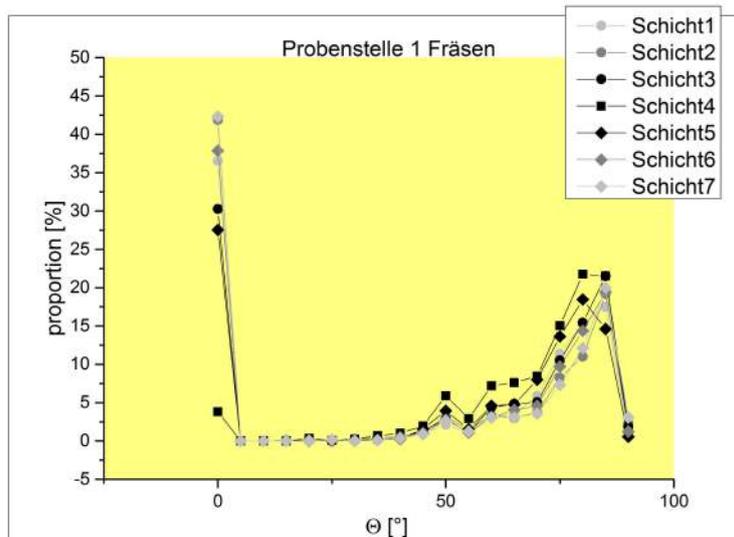
Abbildung 3.6: Probenstelle 1 Φ Diagramme Schleifen und Fräsen

Der schichtübergreifende Winkel Θ (Abb.: 3.7) orientiert sich hingegen vorwiegend in der 0° Richtung und das in nahezu allen sieben Schichten. Dabei haben sich die Fasern mit einem Umfang von bis zu 45% bei einem Winkel von 0° orientiert.

Wie zu erwarten war, hat auch der gewichtete Orientierungstensor seine Hauptorientierungsrichtung in der Z-Ebene (a_{33}). Diese Orientierung in die Z-Ebene resultiert auch daraus, dass sich an einem Rand viele Fasern aufstellen und in den betrachteten Proben eine Randstelle vorliegt.



$$a = \begin{pmatrix} 0.0525 & 0.0074 & 0.0031 \\ 0.0074 & 0.3049 & 0.0708 \\ 0.0031 & 0.0708 & 0.6425 \end{pmatrix}$$



$$a = \begin{pmatrix} 0.0607 & -0.0123 & -0.0038 \\ -0.0123 & 0.3647 & 0.0935 \\ -0.0038 & 0.0935 & 0.5744 \end{pmatrix}$$

Abbildung 3.7: Probenstelle 1 Θ Diagramme und Orientierungstensor Schleifen und Fräsen

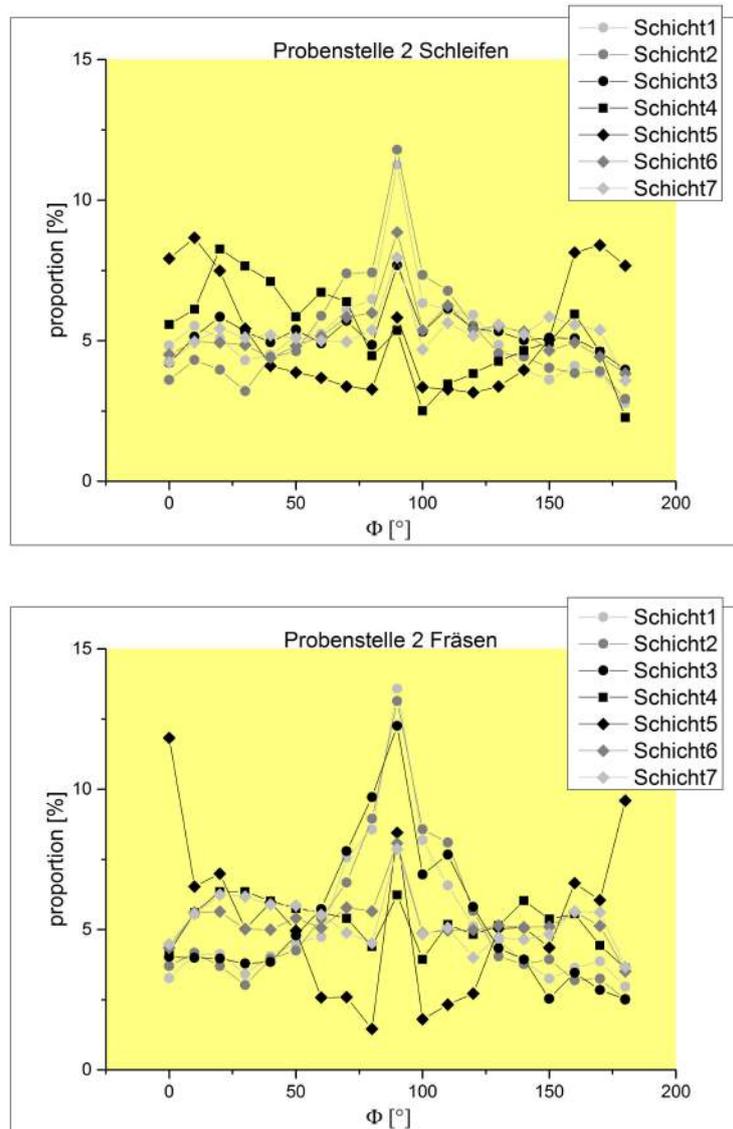
Probenstelle: 2

Als nächste betrachtete Probenlage wurde die Probenstelle 2 analysiert. Wie in Abbildung 3.1 ersichtlich, befindet sich diese Probe am anderen Ende der Einspritzung. Auch hier wurde versucht eine Hauptorientierungsrichtung von Winkel Φ ausfindig zu machen. Durch den Auf- und Abprall der Fasern am Rand kommt es allerdings zu einer Verwirbelung der auf- und abprallenden Fasern am Rand, wie dies schon eindeutig in den Analysebildern (Abb.: 3.8) ersichtlich ist. Es wurde außerdem in der Fräsprobe, in der Mitte der Probenplatte, ein Rechteck ausgelassen um Bindenaht und Ecken zu erzeugen. Nichtsdestotrotz war auch mit diesem Rechteck keine eindeutige Hauptorientierung ausfindig zu machen. Für die Abbildung der Analysebilder (Abb.: 3.8) wurde die fünfte Schicht herangezogen.

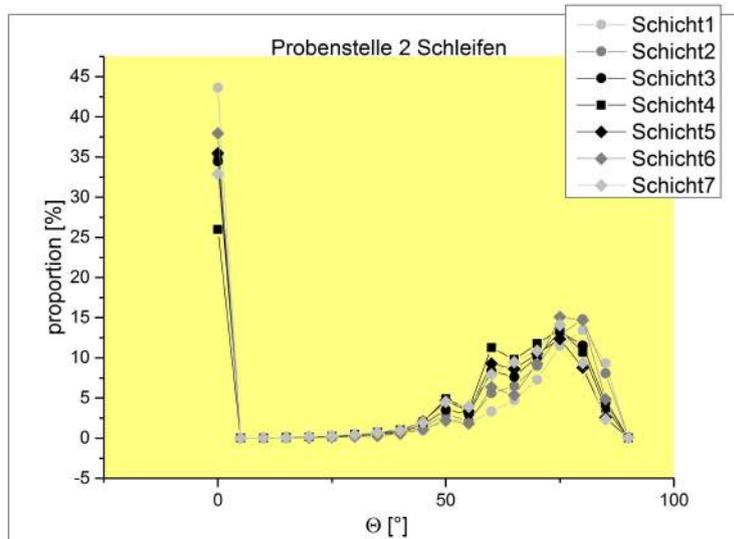


Abbildung 3.8: Probenstelle 2 Original Bilder Schleifen (i) und Fräsen (ii)

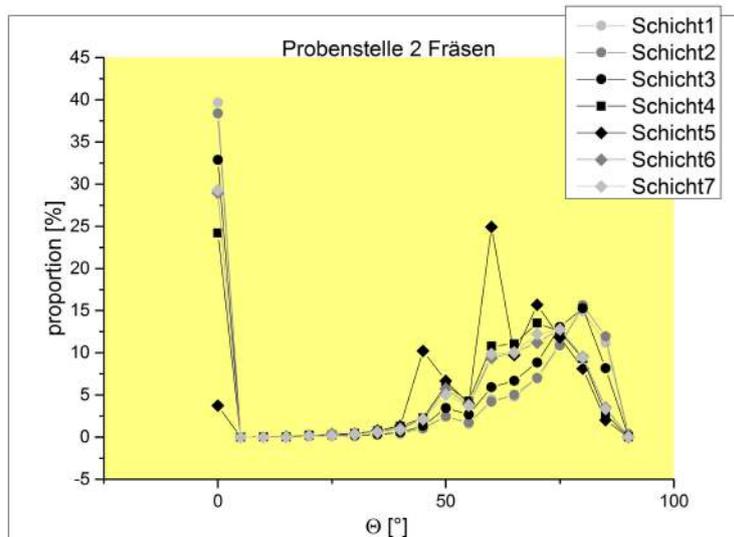
In Abbildung 3.9 sind die Ergebnisse des Winkels Φ in der Probenstelle 2 abgebildet. Die isotrope Anordnung der Fasern durch den Auf- und Abprall am Rande der Probe ist eindeutig erkennbar. Es lässt sich in den Diagrammen von den Bearbeitungsschritten Schleifen und Fräsen eine leichte Häufung der 90° Orientierung erkennen. Diese Ansammlung tritt allerdings nur in den ersten beiden Schichten auf und in den restlichen Schichten verteilt es sich nahezu gleich. Eine weitere kleine Unregelmäßigkeit zeigt die fünfte Schicht, deren Häufungspunkt die 0° bzw. die 180° darstellt. Diese Auffälligkeiten weisen darauf hin, dass sich die Anordnung der Fasern von der ersten bis zur fünften Schicht um 90° dreht.

Abbildung 3.9: Probenstelle 2 Φ Diagramme Schleifen und Fräsen

Der schichtübergreifende Winkel Θ wird jedoch durch den Auf- und Abprall weniger stark beeinflusst. Die Ergebnisse der unten angeführten Abbildung 3.10 ähneln den Ergebnissen der Abbildung 3.7. Die Schicht 5 in der Fräspröbe wirft einige Fragen auf, jedoch wurden auch bei einer Wiederholung der Analyse keine anderen Ergebnisse erzielt. Alle anderen Schichten verhielten sich jedoch wie erwartet. Erneut wird durch den Probenrand und den Effekt der sich deswegen aufstellenden Fasern, eine Vielzahl an 0° Fasern festgestellt. Dadurch wird auch wiederholt, sowie in der Probenstelle 1, eine Mehrheit in der Z-Ebene (a_{33}) des gewichteten Orientierungstensors errechnet.



$$a = \begin{pmatrix} 0.1910 & 0.0002 & 0.0014 \\ 0.0002 & 0.1620 & 0.0716 \\ 0.0014 & 0.0716 & 0.6469 \end{pmatrix}$$



$$a = \begin{pmatrix} 0.2152 & 0.0061 & 0.0055 \\ 0.0061 & 0.2108 & 0.0949 \\ 0.0055 & 0.0949 & 0.5738 \end{pmatrix}$$

Abbildung 3.10: Probenstelle 2 Θ Diagramme und Orientierungstensor Schleifen und Fräsen

Probenstelle: Linke und Rechte Ecke

Die letzten betrachteten Probenstellen sind die Ecken links und rechts. Die rechte Ecke wurde mittels dem Schleifverfahren und die linke Ecke durch den Abtrag mit Hilfe einer Fräsmaschine aufbereitet. Für die Beispielanalysebilder (Abb.: 3.11) wurde die dritte Schicht herangezogen. Diese Analysebilder zeigen eindrucksvoll den Strömungsverlauf an der Kante des ausgeschnittenen Rechteckes. Es muss auch darauf hingewiesen werden, dass die Verteilungsergebnisse maßgeblich durch den Anteil des untersuchten Kreissektors beeinflusst wird.

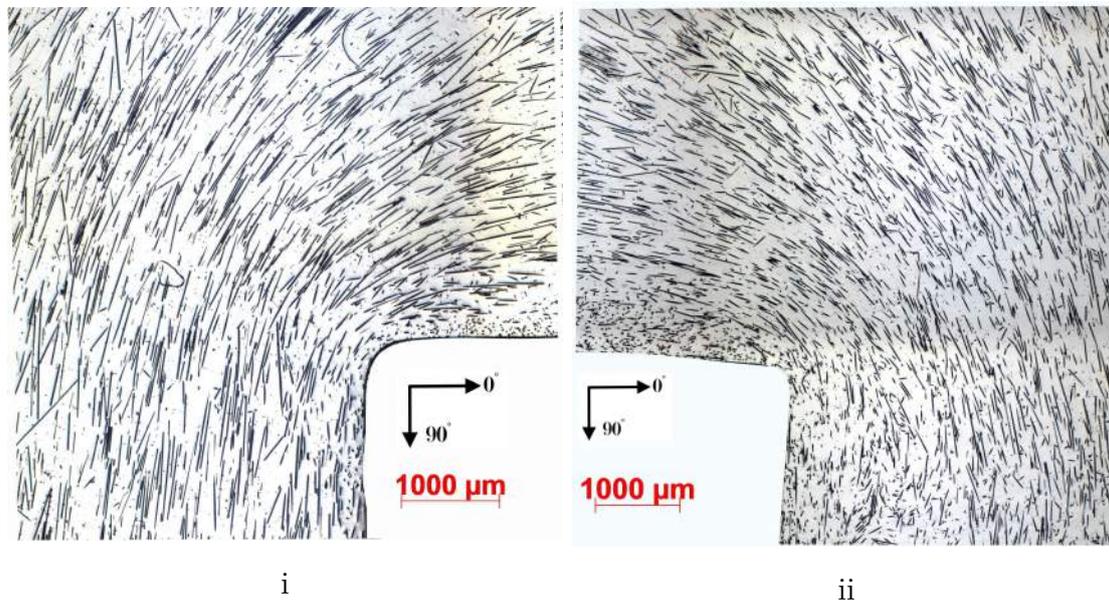
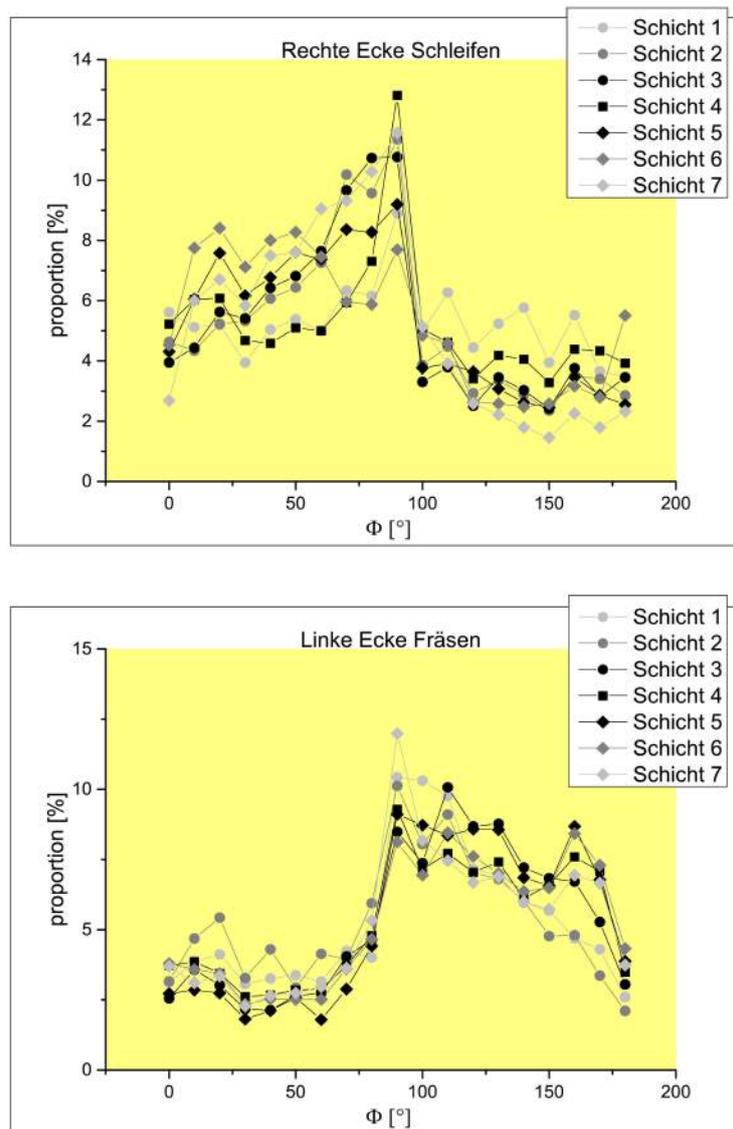
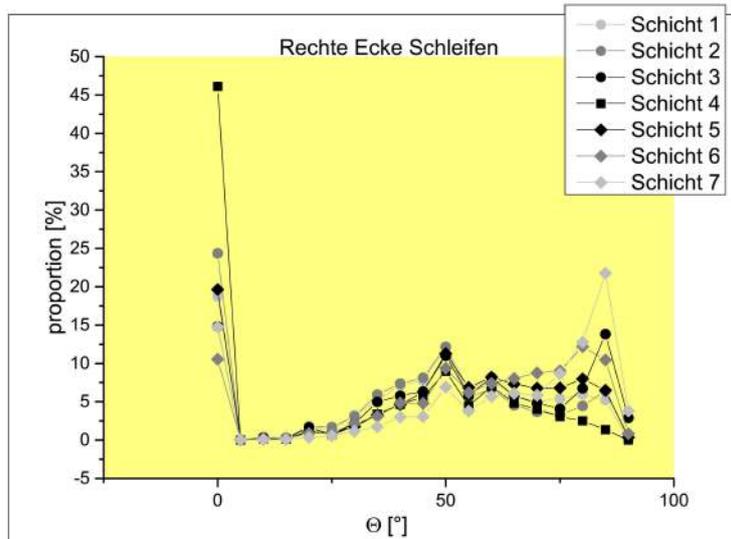


Abbildung 3.11: Original Bilder rechte Ecke Schleifen (i) und linke Ecke Fräsen (ii)

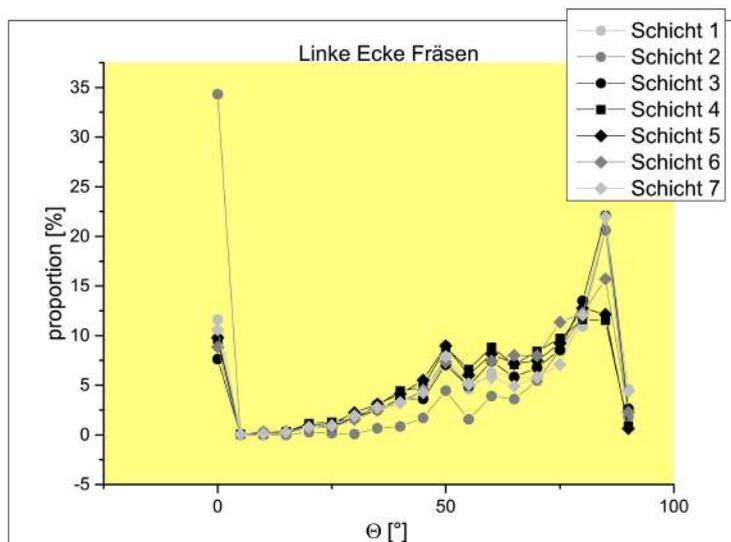
Man kann anhand der Φ Diagramme (Abb.:3.12) den spiegelverkehrten Strömungsablauf erkennen. Die zentral gelegene Einspritzstelle fließt, wie in den beiden Diagrammen erkenntlich, um die beiden Ecken im gleichen Ausmaß vorbei. Der Häufungspunkt der Faserverteilung des Winkels Φ liegt jedoch sowohl an der linken Ecke als auch an der rechten Ecke bei 90° . Die 90° Marke stellt sowohl bei der linken als auch bei der rechten Ecke den Punkt zur Teilung zweier Seiten dar. In der rechten Ecke befinden sich ca. 70% der Fasern im Bereich zwischen 0° und 90° und nur ca. 30% im Bereich zwischen 100° und 180° . Wie zuvor erwähnt verläuft die Strömung an der linken Ecke spiegelverkehrt. D.h. in der linken Ecke befinden sich ca. 70% der Fasern im Bereich zwischen 100° und 180° und der Rest im Bereich von 0° und 90° .

Abbildung 3.12: Ecke Φ Diagramme Schleifen und Fräsen

Die Orientierung der Fasern anhand des schichtübergreifenden Θ Winkels (Abb.: 3.13) ähnelt abermals den Ergebnissen der Θ Winkel aus den Probenstellen 1 und 2. Wiederum ist eine Häufung am 0° Winkel von Θ feststellbar. Auch der gewichtete Orientierungstensor ist wiederholt in der Z-Ebene (a_{33}) am ausgeprägtesten. Anzumerken ist, dass diesmal die Probe durch die rechtwinkelige Randform eine längere Außenkante besitzt, wo sich im Vergleich zu den anderen Probenstellen mehr Fasern senkrecht aufstellen können.



$$a = \begin{pmatrix} 0.1069 & -0.0020 & -0.0018 \\ -0.0020 & 0.1242 & 0.0985 \\ -0.0018 & 0.0985 & 0.7687 \end{pmatrix}$$



$$a = \begin{pmatrix} 0.1794 & -0.0618 & -0.0227 \\ -0.0618 & 0.2181 & 0.1055 \\ -0.0227 & 0.1055 & 0.6024 \end{pmatrix}$$

Abbildung 3.13: Ecke Θ Diagramme und Orientierungstensor Schleifen und Fräsen

3.3 “Two Section“ Method

In den vorigen Kapiteln wurde schon auf die Bedeutsamkeit der Faserlängen eingegangen. In diesem Kapitel wird versucht die Faserlänge ohne die vollständige Zerstörung des Probenstückes zu errechnen. Es wurden hierzu zwei nah aneinanderliegende Schichten eines Werkstückes analysiert und die Faserlänge und Varianz daraus abgeleitet. Die Berechnungsgrundlage stellt der Artikel von Zak, Haberer, Park und Benhabib [1] dar.

3.3.1 Berechnungsgrundlagen der “Two Section“ Method

Zak bietet zwei unterschiedliche Wege zur Herleitung der Berechnung für die durchschnittliche Faserlänge:

1. Einheitliche Faserlänge
2. Faserlängenverteilung

Beide Wege führen zur gleichen Endgleichung für die Berechnung der durchschnittlichen Faserlänge. Der im nächsten Abschnitt beschriebene Weg der Herleitung ist aufgrund der unterschiedlichen Faserlängen in den Proben der Fall 2, die Faserlängenverteilung.

Herleitung der “Two Section“ Method

Die Herleitung der Berechnung der durchschnittlichen Faserlängen beginnt mit der Definition der Faserhöhe H (3.1), mit der Faserlänge l und dem Faserdurchmesser d . Die Faserhöhe H ist dabei abhängig von dem Winkel Θ , welcher, wie bereits in den Kapiteln zuvor, die schichtübergreifende Neigung angibt. Φ ist auch in dieser Berechnung der zuvor schon definierte Rotationswinkel. Anzumerken ist, dass Zak et al. entgegen der gebräuchlichen Verwendung von Φ und Θ , diese im Artikel miteinander vertauschten. In dieser Arbeit wird Φ und Θ in der gebräuchlichen Weise verwendet.

$$H = l * \cos(\theta) + d * \sin(\theta) \quad (3.1)$$

In Abbildung (3.14) sind die zwei Extrempositionen abgebildet, welche bei der “Two Section“ Method auftreten können. Diese beiden Extrempositionen werden deshalb als Extremposition gehandhabt, weil die Faser in den jeweils beiden Schichten noch zur Analyse herangezogen wird. Die Variable z_t stellt die Abtragshöhe dar. Sie sollte ca. ein $\frac{1}{10}$ der Faserlänge betragen, um vertrauenswürdige Ergebnisse zu erhalten. In diesem Zusammenhang stellt sich allerdings die Frage, wie man eine Faserlänge berechnen soll, wenn man zur Analyse bereits

die Faserlänge benötigt. In dieser Arbeit wusste man vorab die Faserlänge und konnte daher einfach die richtige Abtragshöhe bestimmen. Ein Ansatz zur Lösung dieses Problems wäre ein schichtweiser Abtrag und eine auf die erste Schicht bezogene Analyse.

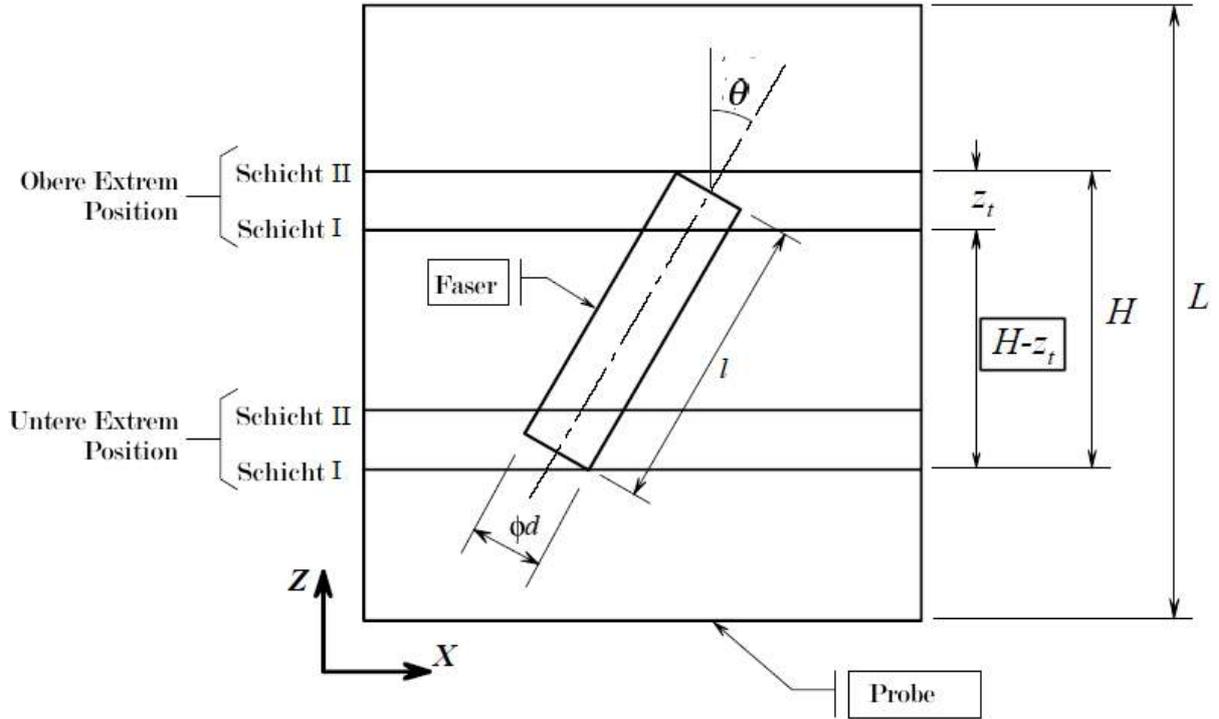


Abbildung 3.14: Faserhöhe mit zwei Extremposition [1]

$n^I(\Theta)$ ist die Anzahl an Fasern, die sich mit Winkel Θ in einer Schicht befinden und $n^{II}(\Theta)$ ist die Anzahl der Fasern, welche sich auch noch in der zweiten Schicht befinden.

$$\begin{aligned} n^I(\Theta) &= \frac{N_T * p(\Theta) * H}{L} \\ n^{II}(\Theta) &= \frac{N_T * p(\Theta) * (H - z_t)}{L} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$p(\Theta)$ ist die Wahrscheinlichkeit Fasern mit der Orientierung des Winkels Θ zu finden. N_T stellt die Gesamtanzahl der Fasern dar, welche wie folgt dargestellt wird:

$$N_T = \sum_{i=1} N_{\Theta_i} \quad (3.3)$$

Die Wahrscheinlichkeit der Faserfindung $p(\Theta)$ kann vereinfacht durch die Auszählung der Fasern N_Θ mit dem Schrägungswinkel Θ im Bereich von $0^\circ < \Theta < 90^\circ$ und der darauffolgenden Division mit der Anzahl der gesamten Fasern N_T erfolgen.

$$p(\Theta) = \frac{N_\Theta}{N_T} \quad (3.4)$$

Dadurch, dass die Wahrscheinlichkeit eine Faser zu finden mit der Zunahme des Schrägungswinkels Θ abnimmt, benötigt man zur genaueren Berechnung die “observability-correction function“ (Übers.: Beobachtbarkeits-Korrektur Funktion) W_{obs} (3.5). Die “observability-correction function“ dient dazu, diese Abnahme auszugleichen. In der Literatur findet man mehrere unterschiedliche “observability-correction functions“. In dieser Arbeit wurden die besten Ergebnisse mit der Funktion von Zhu et.al. [18] ermittelt.

$$W_{obs} = \frac{1}{\frac{l}{d} * \cos(\Theta) + \sin(\Theta)} \quad (3.5)$$

Dies führt zu folgender Wahrscheinlichkeit einer Faserfindung:

$$p(\Theta) = \frac{N_{\Theta_i} * W_{obs}(\Theta_i)}{\sum_{i=1} N_{\Theta_i} W_{obs}(\Theta_i)} \quad (3.6)$$

Die Anzahl der Fasern im Bereich von Θ_1 zu Θ_2 in einer Schicht N^I und einer Überlagerung in die zweite Schicht N^{II} kann mit folgenden Integralen ausgedrückt werden.

$$\begin{aligned} N_I &= \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} n^I d\Theta = \frac{N_T}{L} \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} p(\Theta) * H d\Theta \\ N_{II} &= \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} n^{II} d\Theta = \frac{N_T}{L} \left[\int_{\Theta_1}^{\Theta_2} p(\Theta) * H d\Theta - z_t \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} p(\Theta) * H d\Theta \right] \end{aligned} \quad (3.7)$$

Man kann die Formeln von N_I und N_{II} zur späteren Vereinfachung der Darstellung mit den Konstanten $P = \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} p\theta d\Theta$, $Q = \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} p\theta * \cos(\Theta) d\Theta$ und $R = \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} p\theta * \sin(\Theta) d\Theta$ neu anschreiben. So ergibt sich aus dem Verhältnis der Anzahl der Fasern aus Schicht 1 (N_I) und der Fasern, die in die Schicht 2 übergreifen (N_{II}), folgender Bruch.

$$\frac{N_{II}}{N_I} = 1 - \frac{P * z_t}{Q * l + R * d} \quad (3.8)$$

Mit dem Ausdruck für die durchschnittliche Faserlänge $\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^m N_i * l_i}{N_T}$ kann die Formel 3.8

auf die durchschnittliche Faserlänge in der Probe umgeformt werden:

$$\bar{l} = \frac{1}{Q} * \left(\frac{P * z_t}{1 - \frac{N_{II}}{N_I}} - R * d \right) \quad (3.9)$$

Fehlerempfindlichkeit der “Two Section“ Method

Bei dieser Auswertemethodik der “Two Section“ Methode treten leider auch Fehler auf. Der fehlerempfindlichste Bereich ist die Analyse von N_I und N_{II} und das daraus resultierende Verhältnis von $\frac{N_I}{N_{II}}$. Als weitere Fehlerquelle wurde nach Zak [1], neben dem Verhältnis von $\frac{N_I}{N_{II}}$, auch die Abtragshöhe z_t beschrieben. Um diese beiden Fehler abzuschätzen, wurde folgende Fehlerabschätzung angegeben:

$$\Delta l = \left[\left(\frac{-P * z_t}{Q * (1 - w)^2} * \Delta w \right)^2 + \left(\frac{P}{Q * (1 - w)} * \Delta z_t \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

w ist hierbei das Verhältnis von $\frac{N_I}{N_{II}}$. In dieser Arbeit wurde, ähnlich der Arbeit von Zak [1], eine Fehlerquote in Δw mit 3% und Δz_t mit 2% errechnet. Es ist anzumerken, dass die Fehlerquote Δw einen viel größeren Einfluss auf die Fehlerabschätzung hat als die Fehlerquote Δz_t . Bei einer Änderung von Δz_t um 1% ändert sich die gesamte Fehlerabschätzung Δl erst im dritten Nachkommabereich. Bei der gleichen Änderung, allerdings nun bei Δw , ändert sich das Ergebnis gesamt um bis zu 30%.

3.3.2 Probenvorbereitung

Für die “Two Section“ Method musste eine kleine Änderung der Probenpräparation vorgenommen werden. Es wurden zwar auch hier Proben der 0° und der 90° Stelle analysiert, jedoch wurde als Ansicht, nicht wie bisher, die Aufsicht benutzt. Die jeweilige Anschauungsrichtung mit der entsprechenden Benennung ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Der Ablauf des Einbettens mit der Entfernung des Grates und der darauffolgenden Aushärtung mittels dem Härter von ARAMID® wurde genauso wie in der Probenherstellung des 2D-Schnittverfahrens durchgeführt.

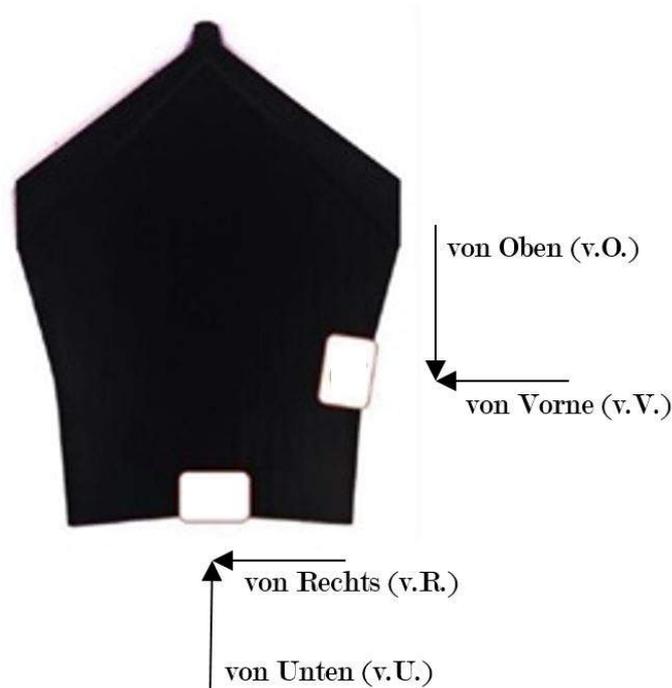


Abbildung 3.15: Probenstellen und Ansicht in der “Two Section“ Method

3.3.3 Vorgehensweise “Two Section“ Method

In der “Two Section“ Method wurde ein in der Probenherstellung und der Bildaufnahme ähnlicher Ablauf wie zuvor im 2D-Schnittverfahren gewählt. Eine bedeutende Änderung des Ablaufs stellte der Verzicht auf die Ätzung der Glasfasern dar. Der Analyseweg erfolgte folgendermaßen:

- Probenpräparation,
- Abtrag mittels Schleifverfahren,
- Polieren der Oberfläche,
- Bildaufnahme in 2,5x bis 50x Vergrößerung,
- Erneuter Abtrag mittels Schleifverfahren,
- Bildaufnahme der neuen Schicht in 2,5x bis 50x Vergrößerung,
- Bildausrichtung mit ImageJ Fiji,
- Analyse mit MATLAB.

Im Gegensatz zum 2D-Schnittverfahren wurde der Abtrag nicht mit einer Bügelmessschraube, sondern mittels einer Messuhr gemessen. Dies ermöglichte eine μm genaue Angabe des Abtrages.

Bildausrichtung ImageJ Fiji

Wie dem zuvor aufgelisteten Analyseweg zu entnehmen ist, kommt es vor der Analyse mit MATLAB zu einer Bildausrichtung mit ImageJ Fiji. Diese Bildausrichtung wurde aufgrund der manuellen Auflage am Mikroskop benötigt. Es war leider nicht möglich zwei Bilder mit exakt gleicher Ausrichtung aufzunehmen, weil man die Probe zwischen den zwei Schichten entnehmen und jeweils manuell neu ausrichten musste. Zak et al. [1] lösen dieses Problem, indem sie gewisse Fasern der zwei Bilder genau zuordnen können und sich daraus der Verschiebeweg (x_t und y_t) errechnen lässt. In dieser Arbeit wurde das Problem mit ImageJ Fiji behoben. ImageJ Fiji besitzt eine Funktion die diesen Verschiebeweg selbständig berechnet und das zweite Bild automatisch um den Verschiebeweg dreht, sodass es gleich dem ersten Bild ausgerichtet ist. So eine Drehung ist in den Abbildungen 3.16 und 3.17 zu sehen.

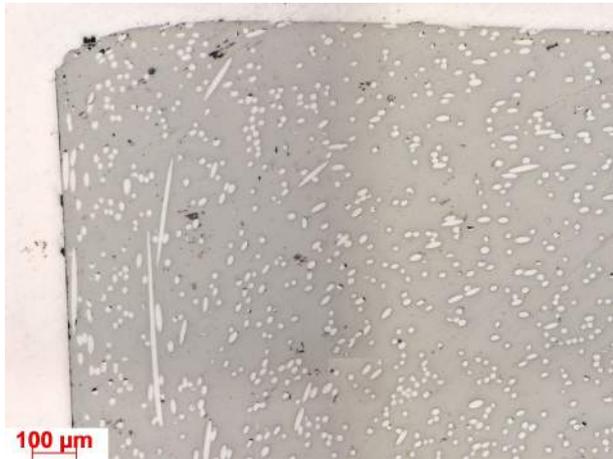


Abbildung 3.16: Originalbild v.R. C

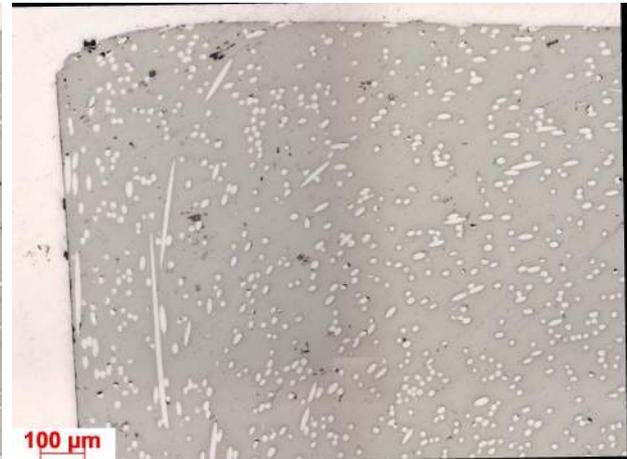


Abbildung 3.17: Gedrehtes Bild v.R. C

Das gedrehte Bild 3.16 weist nur eine minimale Drehung, wie an den schwarzen Rändern zu entnehmen ist, auf. Eine Analyse ohne dieser Drehung würde allerdings bei einem Faserdurchmesser von $16 \mu\text{m}$ nicht möglich sein.

3.3.4 Analyse mit MATLAB

Die Analyse mit MATLAB stellte eine sehr zeitaufwändige Aufgabenstellung dar und der folgende Analyseweg basiert auf den Artikeln von Blanc et al. [19], Chun et al. [20], Clarke et al. [21], Vincent et al. [22] und Xi et al. [23]. Die Lösung der Aufgabe wurde mit dem sogenannten “Trial and Error“ Verfahren vorgenommen, brauchbare Ergebnisse wurden allerdings erst nach gewisser Zeit und mehreren Versuchen erzielt. Im ersten Durchlauf wurden die

Bilder mit 20-facher Vergrößerung ausgewertet, welche allerdings keine zufriedenstellenden Ergebnisse brachte. Mitunter ein Grund dafür war, dass MATLAB zwei naheliegende Fasern als eine große Faser erkannte. Des Weiteren sei erwähnt, dass eine MATLAB-Auswertung von zwei Schichten, aufgrund der hohen Auflösung und der daraus resultierenden großen Bilddateigröße (bis zu 50 MB), bis zu sechs Stunden andauern konnte.

Auszählung von NII

Eine wichtige Änderung in der Analyse gegenüber der Arbeit von Zak et al. [1] betrifft die Zuteilung einer Faser aus Schicht 1 in Schicht 2. Zak et al. nehmen die Ellipsenform der Faser aus Schicht 1 und suchen in Schicht 2 innerhalb eines bestimmten Areals nach dieser Ellipsenform. Bei einer Übereinstimmung wird anschließend diese Faser der Summe von N_{II} hinzugefügt. Dieser Prozess wird anschließend auf alle Fasern, welche einen Winkel $\Theta \leq 30^\circ$ haben, angewendet. Diese Vorgehensweise war in dieser Arbeit aufgrund des manuellen Abtrages von z_t und dem daraus resultierenden inplane Winkels Ψ nicht möglich. Durch Ψ änderte sich die Ellipsenform minimal und die Ellipse aus Schicht 1 konnte der Ellipse aus Schicht 2 nicht mehr automatisch zugeordnet werden. Abbildung 3.18 illustriert diese Ellipsenformänderung.

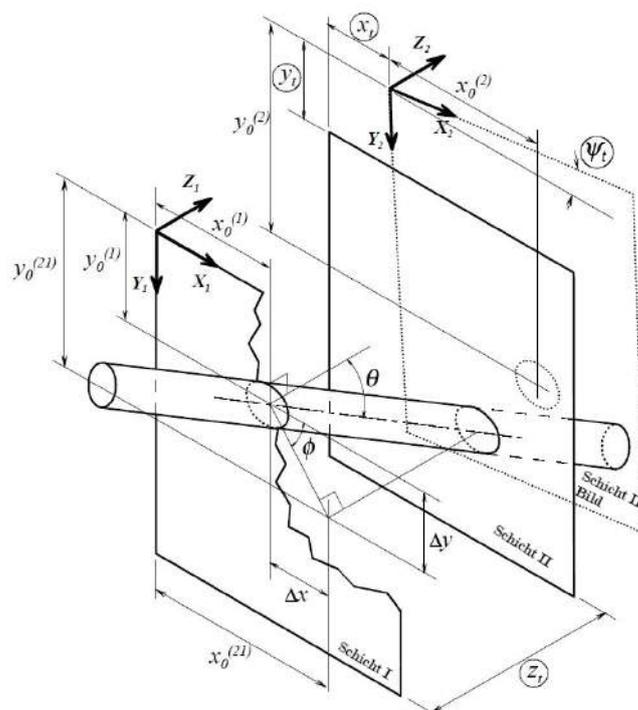


Abbildung 3.18: “Two Section“ Method Ellipsenform [1]

Dieses Problem wurde mit einer einfachen Bildüberlagerung behoben. Es wurden in dieser Arbeit die Fasern aus beiden Schichten getrennt gezählt. Danach wurden die zwei Schichten überlagert und das Bild der Überlagerung gezählt. In der Überlagerungsschicht stellte aber der Θ Winkel kein Ausschlusskriterium mehr dar und es wurden alle auftretenden Elemente gezählt. Durch diese drei Auszählungen konnte die Anzahl der Fasern, welche von Schicht 1 in Schicht 2 übergreifen, errechnet werden.

Dies wird nun in einem Beispiel veranschaulicht: Werden in Schicht 1 100 Fasern gezählt, in Schicht 2 120 Fasern und in dem überlagerten Bild 130 Fasern, so sind in Schicht 2 90 Fasern enthalten, welche auch in Schicht 1 abgebildet waren. Diese 90 Fasern entsprechen der Variable N_{II} .

Der seltene Fall, dass sich zwei unabhängige Faserellipsen überlagern, wurde in der Fehlerempfindlichkeit mit $\Delta w = 3\%$ berücksichtigt.

Manuelle Bildbearbeitung

In jedem Schichtbild wurde eine manuelle Bildbearbeitung vorgenommen. Diese Bildbearbeitung umfasste drei Schritte:

1. Trennung naher Fasern
2. Faserellipse nachziehen
3. Regionsabhängige Helligkeitsänderung des Bildes

Zwei sehr nah aneinander angrenzende Fasern wurden durch einen manuell hinzugefügten Strich getrennt. Dies führte zu einer leichten Abflachung der Ellipse und zu einer Verkürzung der großen bzw. kleinen Ellipsenhalbachse. Beim Schleifverfahren kam es außerdem zu einem Abbruch der Glasfaser, welcher mit einem schwarzen Punkt in der Abbildung zu erkennen ist. Diese Punkte veränderten die Ellipsenform maßgeblich und beeinflussten so das Ergebnis erheblich. Auch diese Punkte wurden manuell mit einem Bildbearbeitungsprogramm entfernt und die original Ellipsenform wiederhergestellt. Um die Verkürzung der Ellipsenhalbachse und etwaige schwarze Punkte auszugleichen, wurden Fasern mit einem Winkel von $\Theta \leq 40^\circ$ ausgewertet. Als letzter manueller Bearbeitungsschritt stand die regionsweise Helligkeitsänderung an. Diese wurde benötigt, um MATLAB bei der Schwarz-Weiß Konvertierung zu unterstützen. Bei der Bildaufnahme mit dem Mikroskop kam es zu erheblichen Helligkeitsänderungen innerhalb eines Bildes. Dies führte dazu, dass ohne Anpassung der Helligkeit große Flächen bei der Schwarz-Weiß Konvertierung vollständig schwarz bzw. weiß wurden. In den nächsten zwei Abbildungen 3.19 und 3.20 ist die manuelle Bearbeitung vor der automatischen MATLAB Analyse ersichtlich.

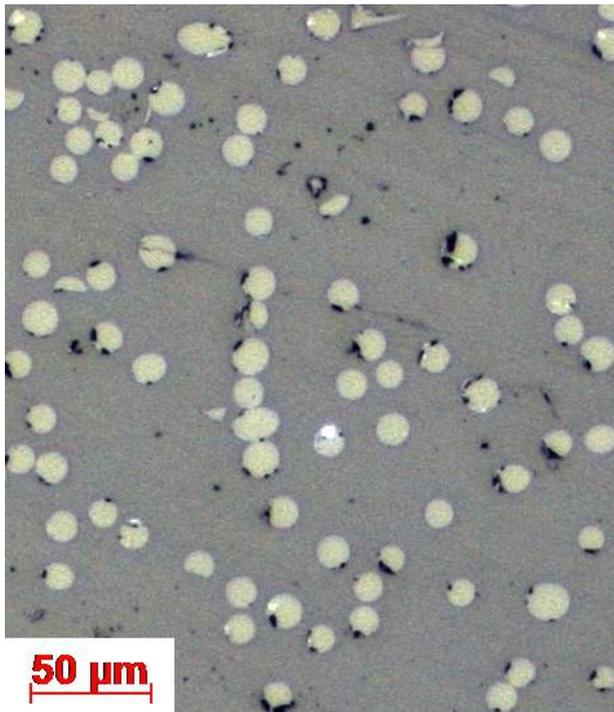


Abbildung 3.19: Ausschnitt aus Originalbild v.O. D

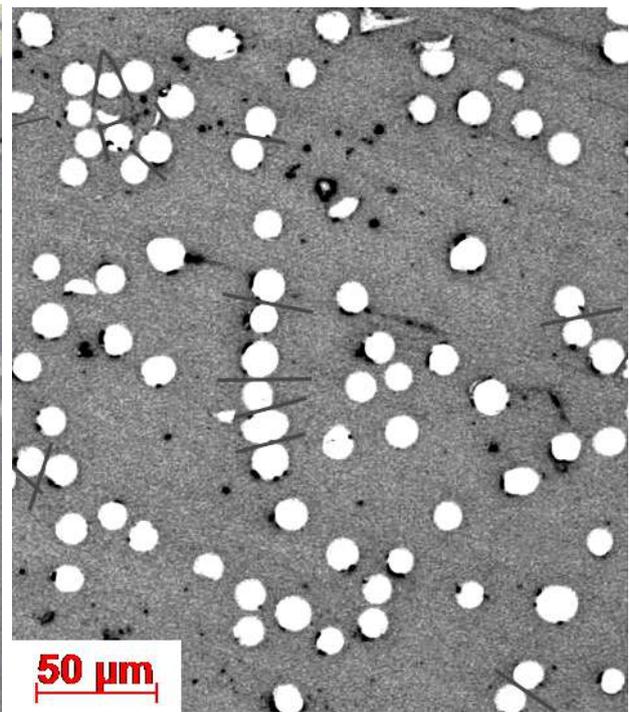


Abbildung 3.20: Ausschnitt aus überarbeiteten Bild v.O. D

MATLAB Programmierung

Es wird hier der MATLAB Code mit den nach jeder Code Sequenz resultierenden Bildern präsentiert. Um eine bessere Übersicht zu bieten, wird die Auswertung der v.O. B-C Probe als Beispiel angeführt. Die Änderungen durch den MATLAB Code spielen sich im Bereich weniger Pixel ab. Aus diesem Grund wird ein Ausschnitt des Bildes mit 5-facher Vergrößerung abgebildet. Der Maßstab des Ausschnittes wird am rechten unteren Bildrand mit einem grünen Balken angeführt.

Der erste Schritt war das Einlesen des Bildes mithilfe der MATLAB Funktion “imread(Bildpfad)“. In der Abbildung (3.21) ist das eingelesene Bild samt der Aufbereitung durch die zuvor beschriebenen Schritte ersichtlich. Man erkennt die Fasertrennung, die nachgezogene Faserellipse sowie die Helligkeitsänderung. Außerdem wurden bei den Probenbildern auch der Bereich außerhalb der Probe, um etwaige Fragmente zu beseitigen, in einem Grauton eingefärbt. Der Maßstab in der linken oberen Ecke des eingelesenen Bildes wurde nachträglich eingefügt. Die nachfolgenden Bilder wurden in Form und Größe nicht verändert, weshalb bei den nächsten Abbildungen (3.22 - 3.31) auf einen Maßstab verzichtet wurde.

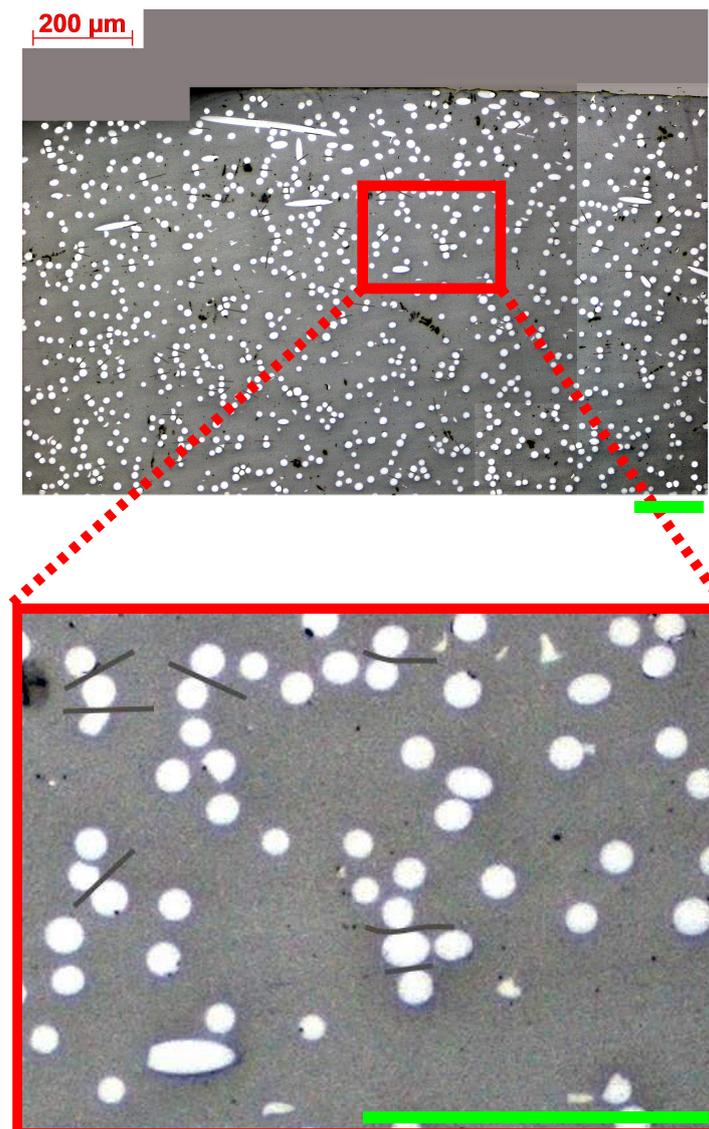


Abbildung 3.21: Funktion “imread“ v.O. C

MATLAB kann die später nachfolgenden Funktionen, welche zur Auswertung benötigt werden nur unterstützen, wenn ein Bild in schwarz-weiß (Binär) eingelesen wird. MATLAB stellt zur Umwandlung eines Graustufenbildes in ein schwarz-weiß Bild die Funktion “im2bw(Bild, Schwellenwert)” zur Verfügung. Diese Umwandlung des Graustufenbildes in ein schwarz-weiß Bild erwies sich als äußerst schwierig. Gerade im Übergangsbereich von Faser zur Matrix bestand die Gefahr den falschen Schwellenwert zu verwenden und damit die Faserform erheblich zu beeinflussen. Auch der regionsabhängige Helligkeitsfaktor im eingelesenen Bild wurde bei der automatischen Grauschwellenwertfunktion (“graytresh“) von MATLAB teilweise nicht richtig unterstützt. Der Schwellenwert wurde somit manuell mittels “Trial and Error“ Ver-

suchen ermittelt. In diesem Beispiel lag der Schwellenwert bei 90/120. Diese Ziffern geben den schwarz bzw. weiß Wert an. Wobei der binäre weiß Wert bei 0 und der binäre schwarz Wert bei 255 liegt.

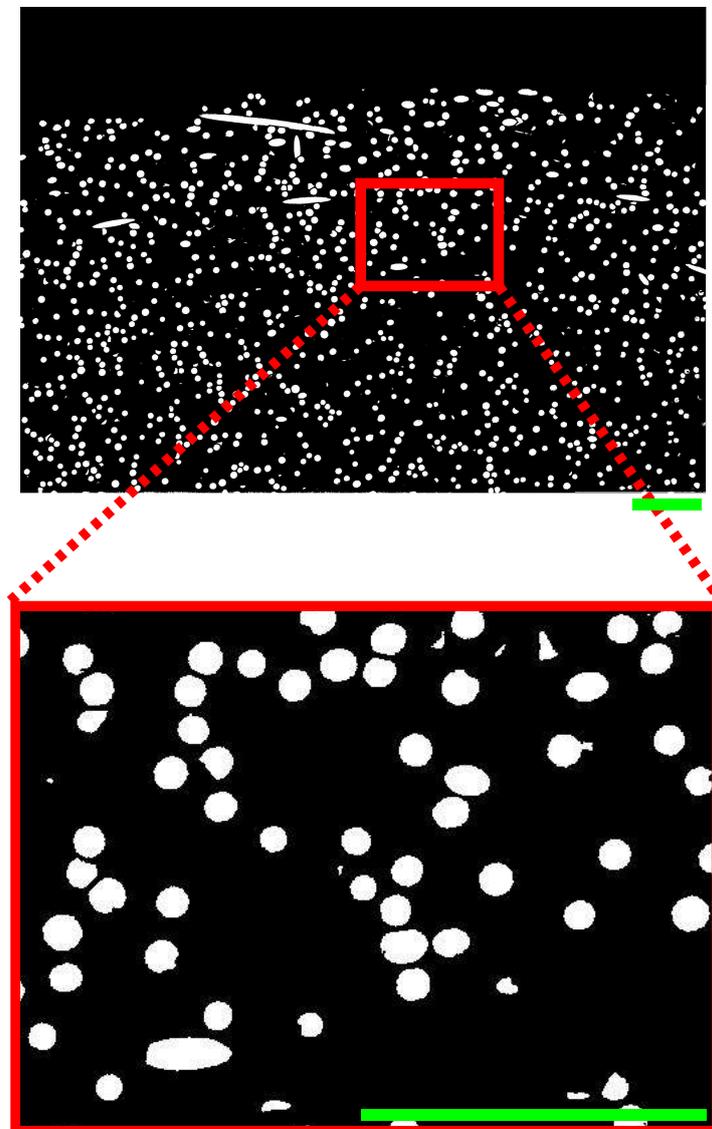


Abbildung 3.22: Funktion “im2bwc“ v.O. C

Auch bei einem intensiven “Trial and Error“ Verfahren trifft der ermittelte Schwellwert nicht für das gesamte Bild zu und es kann zu einem sogenannten Rauschen des Bildes kommen. Dieses Rauschen führt zu einer Verzerrung der Außenkanten der Fasern. Mit einer Glättung kann man dieses Rauschen aus dem Bild größtenteils entfernen. MATLAB bietet für solche Glättungen verschiedenste Funktionen an, deren Nutzen von der Anwendung abhängen. Bekannteste Funktionen sind unter anderem der Gauß-Filter oder die Hough-Transformation,

die jedoch keinen Mehrwert in dieser Arbeit bieten konnten. Der zweckdienlichste Filter war die “medfilt2(Bild, [Bereich])“ Funktion. Der Median Filter errechnet den Mittelwert eines selbst zu bestimmenden Bereiches (Array) und ersetzt die Pixel mit dem errechneten Mittelwert aus diesem Array. In diesem Beispiel lag das Array bei 5x5 Pixeln, welche geglättet wurden.

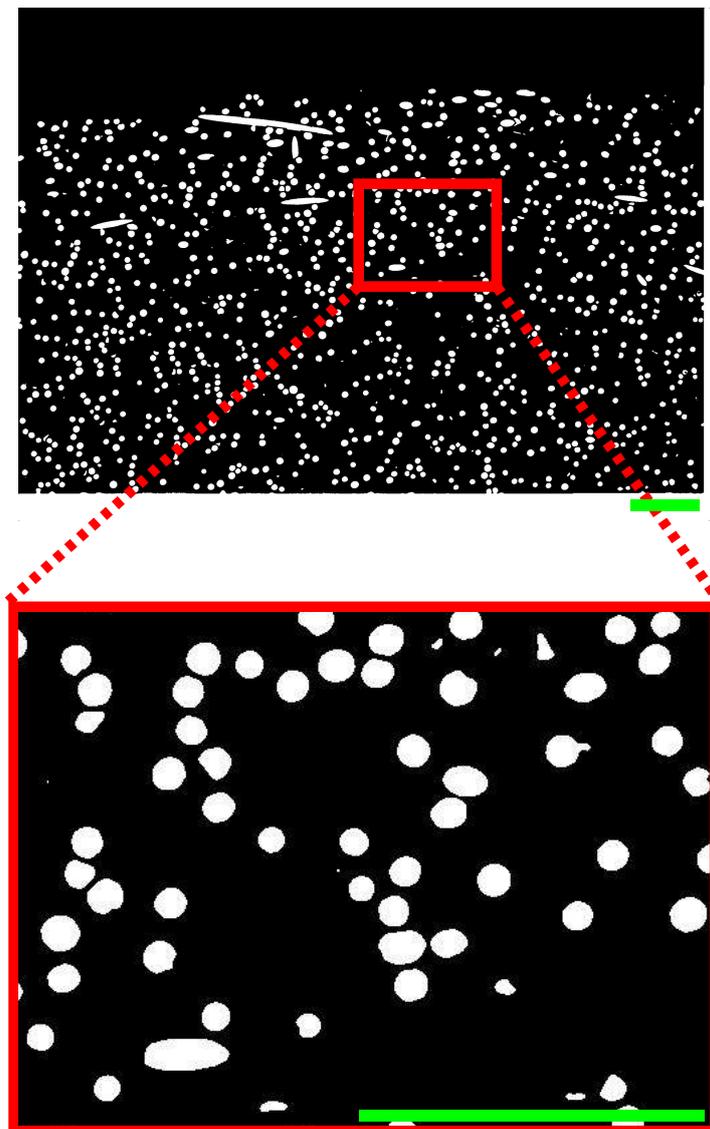


Abbildung 3.23: Funktion “medfilt2“ v.O. C

Bei der Probenserie “von Oben“ wurde das zweite Bild des Bildmosaiks verwendet, welches mit AxioVision aufgenommen und mit ImageJ Fiji zueinander ausgerichtet wurde. Durch dies kann es zu einem weißen Rand und zu nicht vollständig abgebildeter Fasern kommen. In Abbildung 3.24 wurde das Bild aus der “medfilt2“ umrahmt dargestellt, um die

Problemstellung zu veranschaulichen. Mithilfe der MATLAB Funktion “imclearborder(Bild, Konnektivität)“ wurde der weiße Rand entfernt, welcher die Auswertung der weißen Fasern behindert hätte. Außerdem wurden durch die Anwendung dieser Funktion, Fasern, welche den Rand berühren und somit nicht vollständig abgebildet wurden, entfernt. Nicht vollständig abgebildete Fasern hätten ohne deren Entfernung das Ergebnis maßgeblich beeinflusst. In der rechten Abbildung 3.25 ist das Resultat der “imclearborder“ ersichtlich.

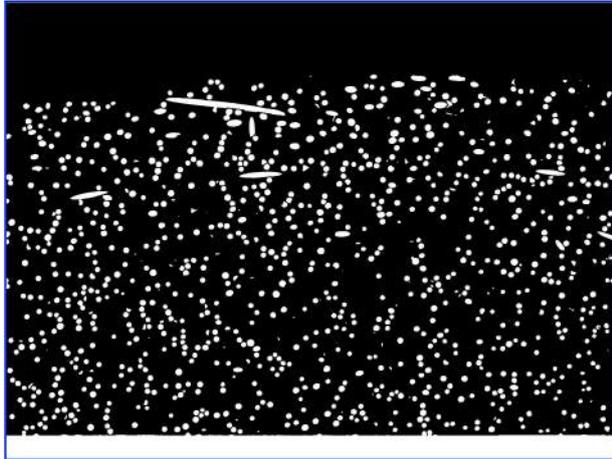


Abbildung 3.24: Funktion “medfilt2“ mit Rahmen v.O. C

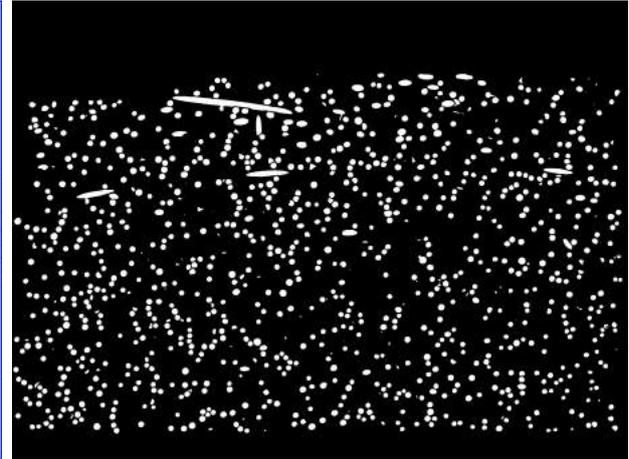


Abbildung 3.25: Funktion “imclearborder“ v.O. C

Der nächste Schritt war die weitere Verfeinerung des Bildes mit der Kombination aus “imerode(Bild, structural element)“ und “imdilate(Bild, structural element)“. Die Glättung durch “medfilt2“ verschärfte zwar den Übergang zwischen Faser und Matrix in der Abbildung, hinterließ dennoch einige Verzerrungen in der Form. Für die Auswertung von Θ wurde, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, die längste und kürzeste Halbachse der Ellipse benötigt. Um einzelne Pixel auszulöschen, welche womöglich die Halbachsen der Ellipse beeinflusst hätten, wurde zuerst die Funktion “imerode“ aufgerufen. Für die Anwendung dieser benötigt man ein “structural element“, welches Einfluss auf die Form und Größe des zu bearbeitenden Bildobjektes hat. In diesem Fall wurde die “disk“ als Form gewählt. In der nachstehenden Abbildung ist das Ergebnis der Funktion “imerode“ abgebildet, welches die Fasern schrumpfen ließ, um einen glatteren Übergang zwischen Faser und Matrix zu ermöglichen.

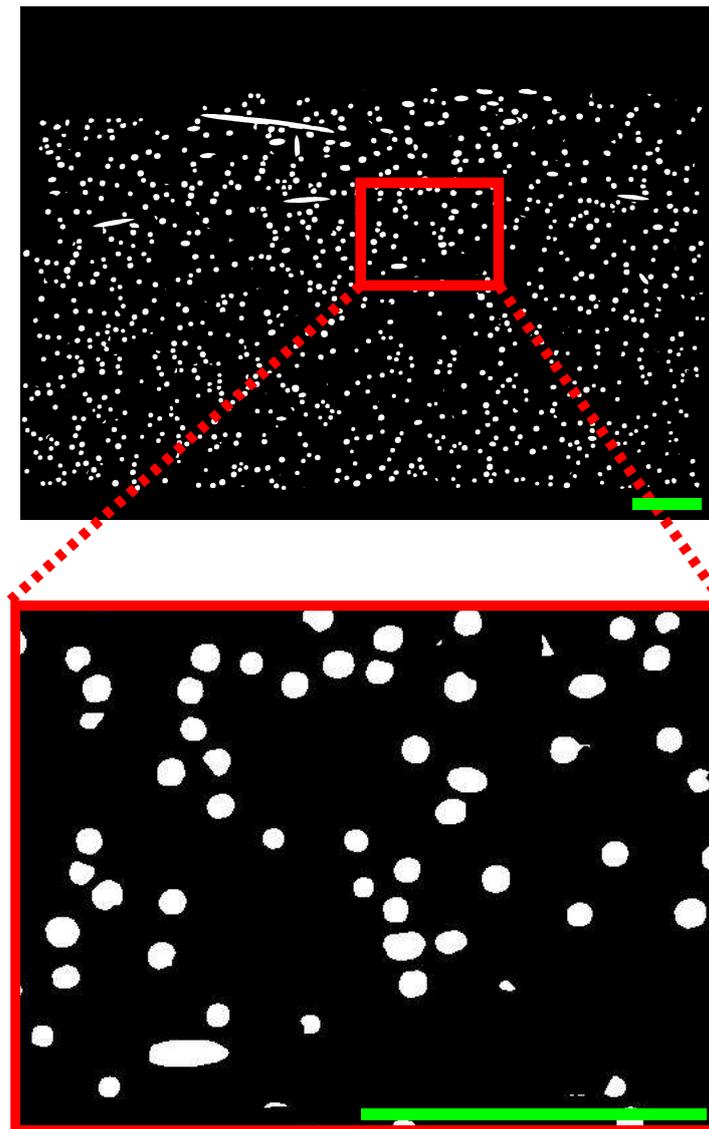


Abbildung 3.26: Funktion “imerode“ v.O. C

Wie beschrieben, bewirkte die Funktion “imerode“ eine Größenänderung der Fasern. Für die Wiederherstellung der Originalgröße wurde die Funktion “imdilate(Bild, structural element)” benötigt. Es wurde dasselbe structural element wie vom “imerode“ Verfahren verwendet, um eine Größenänderung zu verhindern. “imdilate“ erweiterte nun die Fasern um den gleichen Wert, mit welchem sie vorher geschrumpft wurden. Dies führte zu einer Glättung und Abrundung der Ellipsenform im Einzelpixel Bereich. “imdilate“ stellte den letzten Schritt des Einlesens und Aufbereiten der Bilder dar.

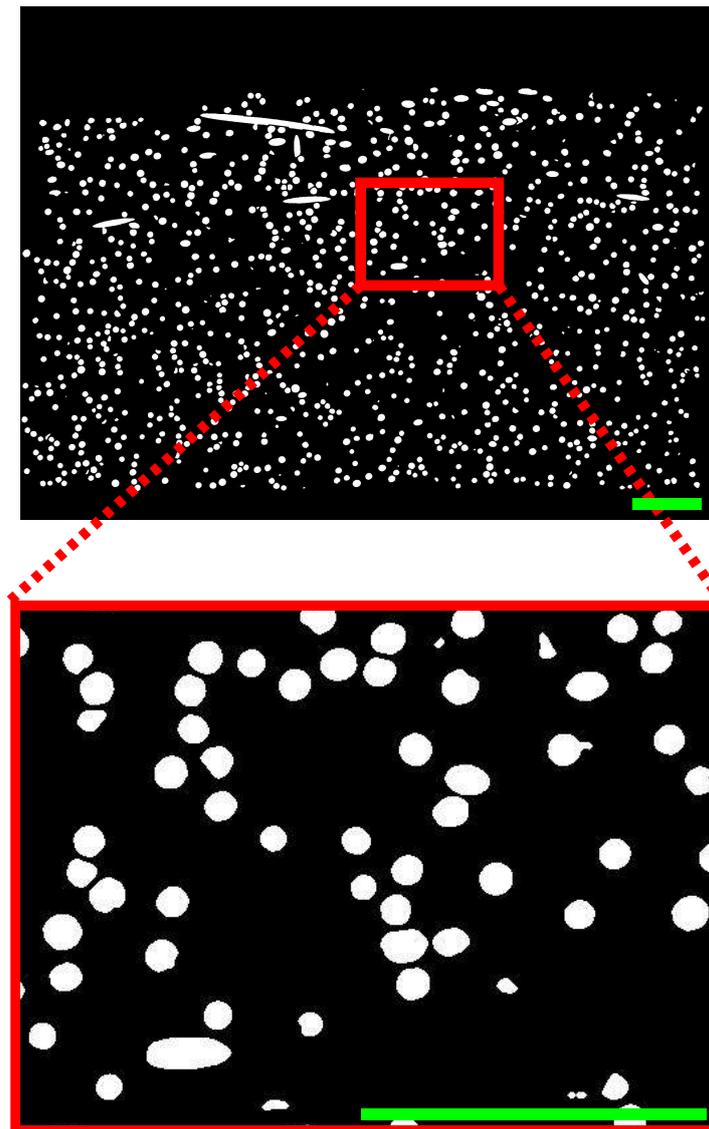


Abbildung 3.27: Funktion “imdilate“ v.O. C

Die Auswertung der Bilder hat mit dem Zählen und der Nummernzuweisung jeder Faser begonnen. Hierfür wurden zwei Funktionen verwendet, einerseits “bwlabel(Bild)“, welches die Gesamtanzahl der Fasern im Bild zurückgab, und andererseits die Funktion “vislabel¹“, welche jeder Faser im Bild eine Zahl zuwies. Die Nummerierung von “vislabel“ erfolgte von links nach rechts. Zu diesem Zeitpunkt des Verfahrens wurde noch kein Einfluss auf die Faserform und die Ellipsenhalbachsen genommen. Es wurden alle vollständig abgebildeten Fasern im Bild durchgezählt und nummeriert.

¹<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19665>

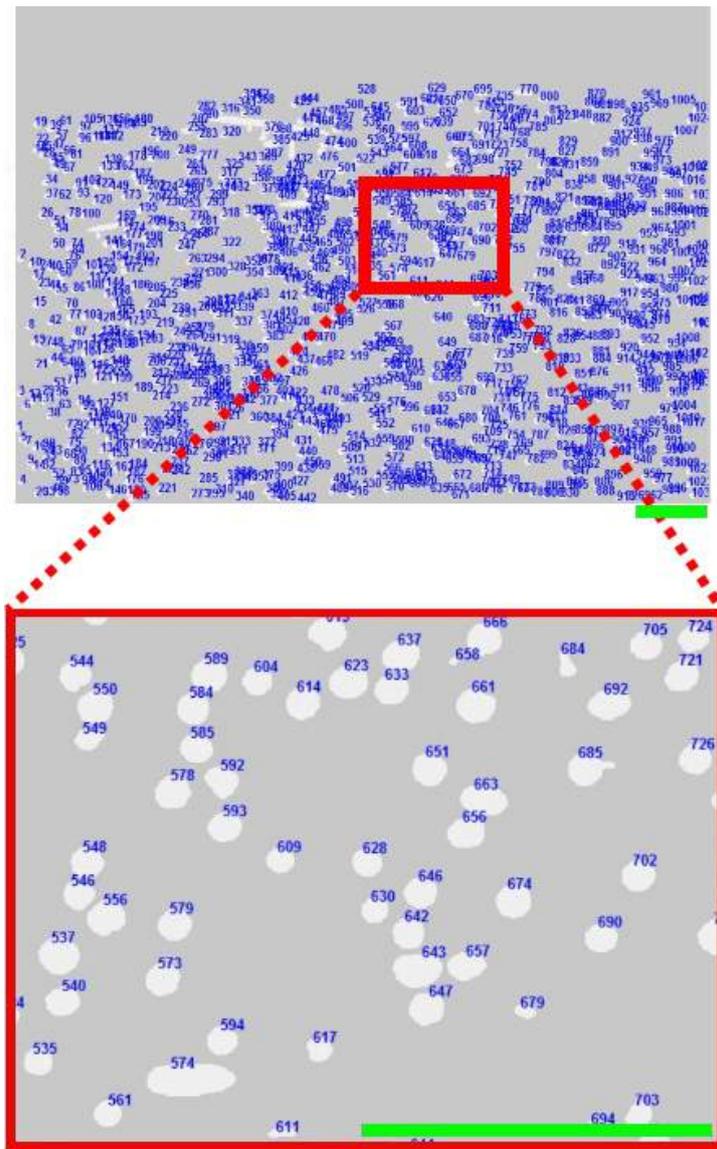


Abbildung 3.28: Funktion “vislabel“ v.O. C

Die Auswertung der Ellipsenhalbachsen und dem daraus resultierenden Θ erfolgte mithilfe der Funktion “regionprops (Bild, Eigenschaften)“ in zwei Schritten. “regionprops()“ dient zur automatischen Analyse von Bildern. Der erste Schritt war die Auslöschung der Fasern, welche zu groß waren um einen Θ Wert $\leq 40^\circ$ besitzen zu können. Die Eliminierung der großen Elemente steigerte die Performance der eigentlichen Analyse erheblich. Der zweite Schritt diente zur genauen Θ Berechnung. Die zwei Schritte der Analyse werden im nachfolgenden Quellcode der MATLAB-Analyse angegeben.

```

1      %1. Schritt
2      %Einlesen des Bildes und der Eigenschaften
3      q = regionprops(f, 'Area', 'Centroid', 'PixelIdxList');
4
5      %Werte fuer das erste Objekt anzeigen
6      q(1);
7      %Werte fuer alle Objekte im Areal anzeigen
8      area_values = [q.Area];
9
10     %Eingrenzung des zurueckzugebenden Areals
11     idx = find((75 ≤ area_values) & ( area_values ≤ 3000));
12     h = ismember(f, idx);
13
14     %Ausgabe des Bildes mit einem Areal zwischen 50 und 3000
15     figure, imshow(h), title('A area between 50 and 3000')
16
17     %2. Schritt
18     %Einlesen des neuen Bildes und Bestimmung der Eigenschaften
19     i = regionprops(h, 'MinorAxisLength', 'MajorAxisLength', 'Area', ...
20                   'Perimeter', 'centroid');
21     %Berechnungsvariablen Nullsetzen
22     score = zeros(1, 100000);
23     theta = zeros (1, 100000);
24     %Schleife zur Berechnung von Theta der Fasern
25     for cnt = 1:length(i)
26         score(cnt) = abs(i(cnt).MinorAxisLength/i(cnt).MajorAxisLength);
27         winkel = i(cnt).MinorAxisLength/i(cnt).MajorAxisLength;
28         theta(cnt) = acos(winkel);
29     end

```

In Abbildung 3.29 ist das Ergebnis des hier gezeigten Quellcodes ersichtlich. Mit einer weiteren For-Schleife wurde der ermittelte Θ Wert neben jeder Faser in unterschiedlichen Farben dargestellt. Es wurden fünf verschiedene Farben benutzt, um die Θ Werte einfach ersichtlich zu machen. Folgende Farben wurden verwendet:

- $0^\circ \leq x \leq 10^\circ$ Grün
- $10^\circ < x \leq 20^\circ$ Cyan
- $20^\circ < x \leq 30^\circ$ Gelb
- $30^\circ < x \leq 40^\circ$ Magenta
- $x > 40^\circ$ Rot

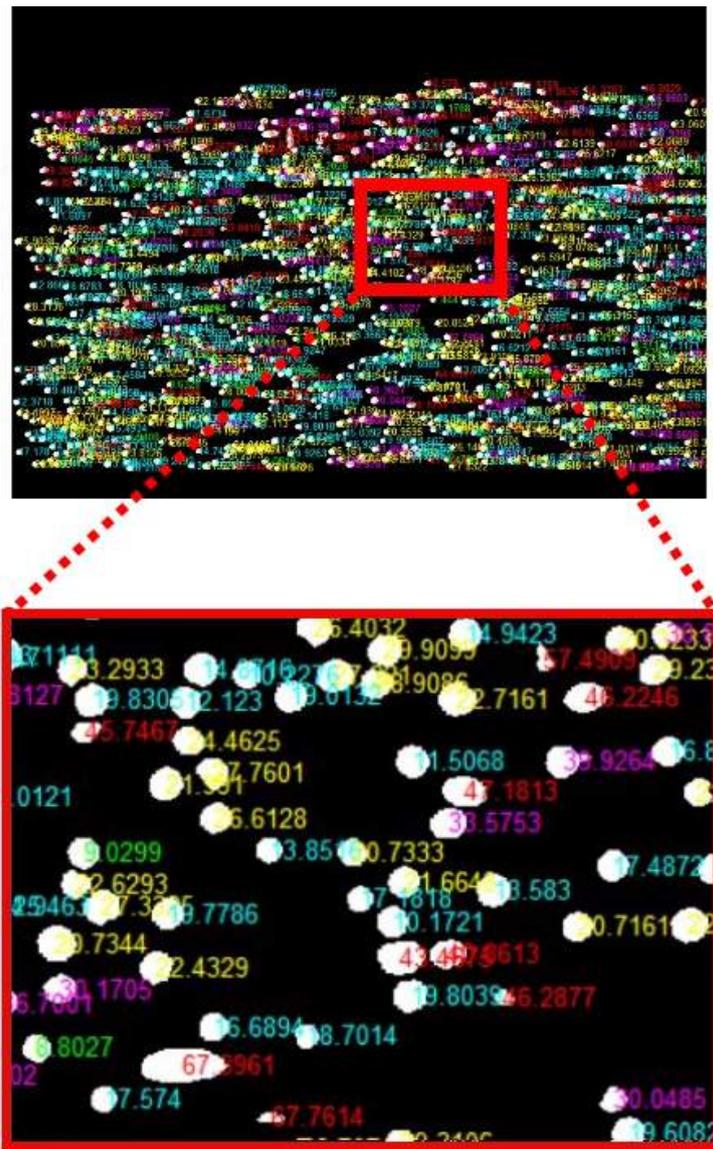


Abbildung 3.29: Funktion “regionprobs“ v.O. C

Während der Zuweisung der Farbe zu jeder Faser wurden verschiedene Bilder mit den jeweiligen Θ Werten erzeugt. Es wurden Bilder in 10° Schritten generiert und für die Auswertung ein 0° bis 40° Bild angelegt.

Eine Analyse in 10° Schritten stellte sich aufgrund des zuvor erwähnten inplane Winkels Ψ und den damit verbundenen leichten Winkelschwankungen als problematisch dar. So konnte es passieren, dass eine 9° Faser aus dem ersten Bild im zweiten Bild 11° besitzt und sich somit nicht mehr im gleichen Analysebild befindet. Das verwendete $0^\circ \leq \Theta \leq 40^\circ$ Analysebild aus Schicht C ist in der nächsten Abbildung (3.30), nach dem dazugehörigen Quellcode, dargestellt.

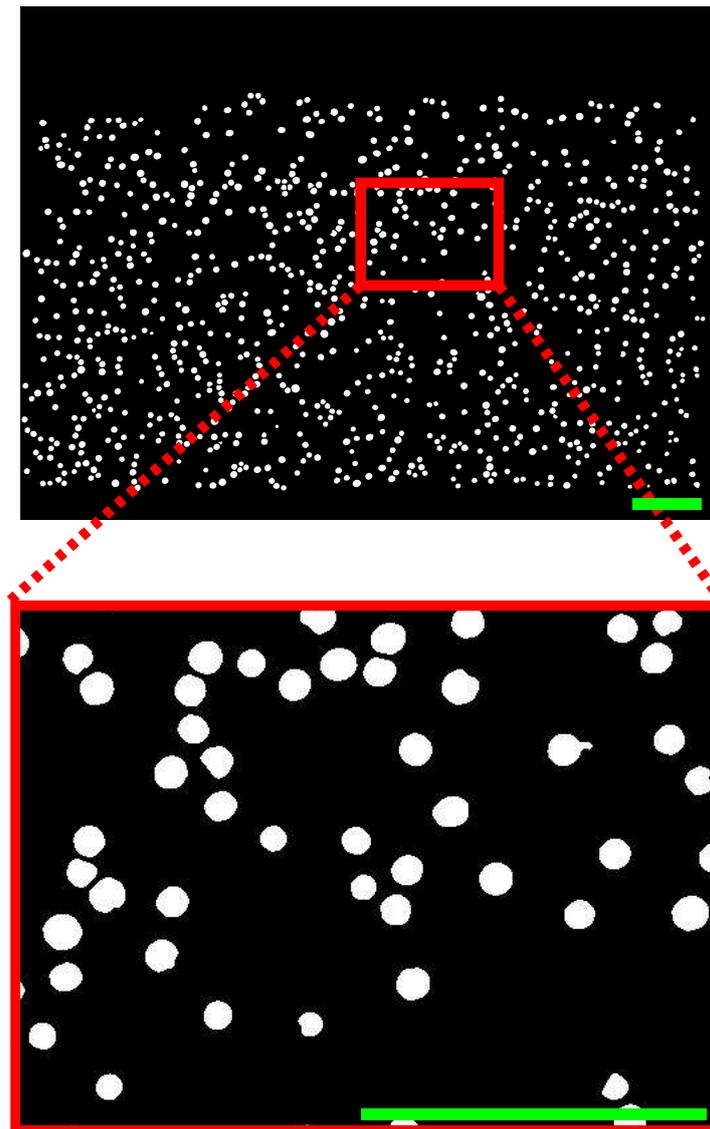
Der Vorgang zur Generierung der ersten zu analysierenden Schicht wurde mittels folgendem Quellcode erzeugt:

```

1      %Beginn Schleife fuer alle Faser
2      for cnt = 1:length(i)
3          %Umwandlung Radiant --> Grad
4          x = theta(cnt).*180./pi();
5
6          %Erste Aussortierung fuer Zeitersparnis
7          if score(cnt) ≥ 0.5
8
9              %Fasern zwischen 0 und 10 Grad
10         if (x ≥ 0) && (x ≤ 10)
11             %Zuweisen der Farbe Gruen
12             text(i(cnt).Centroid(1),i(cnt).Centroid(2),num2str(x),...
13                 'color','green');
14             %Faserellipse auswaehlen
15             BW0_A = bwselect(h,i(cnt).Centroid(1),i(cnt).Centroid(2),4);
16             %Zuweisen zu den Bildern 0-10 und 0-40 Grad
17             BW00_A = BW00_A + BW0_A;
18             BW4040_A = BW4040_A + BW0_A;
19         else
20
21             %Fasern zwischen 10 und 20 Grad
22             if (x > 10) && (x ≤ 20)
23                 %Zuweisen der Farbe Cyan
24                 text(i(cnt).Centroid(1),i(cnt).Centroid(2),num2str(x),...
25                     'color','cyan');
26                 %Faserellipse auswaehlen
27                 BW10_A = bwselect(h,i(cnt).Centroid(1),i(cnt).Centroid(2),4);
28                 %Zuweisen zu den Bildern 10-20 und 0-40 Grad
29                 BW1010_A = BW1010_A + BW10_A;
30                 BW4040_A = BW4040_A + BW10_A;
31             else
32
33                 %Fasern zwischen 20 und 30 Grad
34                 if (x > 20) && (x ≤ 30)
35                     %Zuweisen der Farbe Gelb
36                     text(i(cnt).Centroid(1),i(cnt).Centroid(2),num2str(x),...
37                         'color','yellow');
38                 %Faserellipse auswaehlen

```

```
39         BW20_A = bwselect(h,i(cnt).Centroid(1),i(cnt).Centroid(2),4);
40         %Zuweisen zu den Bildern 20-30 und 0-40 Grad
41         BW2020_A = BW2020_A + BW20_A;
42         BW4040_A = BW4040_A + BW20_A;
43     else
44
45         %Fasern zwischen 30 und 40 Grad
46         if (x > 30) && (x ≤ 40)
47             %Zuweisen der Farbe Magenta
48             text(i(cnt).Centroid(1),i(cnt).Centroid(2),num2str(x),...
49                 'color','magenta');
50             %Faserellipse auswaehlen
51             BW30_A = bwselect(h,i(cnt).Centroid(1),i(cnt).Centroid(2),4);
52             %Zuweisen zu den Bildern 30-40 und 0-40 Grad
53             BW3030_A = BW3030_A + BW30_A;
54             BW4040_A = BW4040_A + BW30_A;
55         else
56             % Faser liegt > 40 Grad --> Rote Farbe
57             text(i(cnt).Centroid(1),i(cnt).Centroid(2),num2str(x),'color','red');
58
59         end % Ende For-Schleife 30-40
60         end % Ende For-Schleife 20-30
61         end % Ende For-Schleife 10-20
62         end % Ende For-Schleife 0-10
63     else
64         % Faser > 40 Grad durche erste grobe Aussortierung --> Rote Farbe
65         text(i(cnt).Centroid(1),i(cnt).Centroid(2),num2str(x),'color','red');
66     end %Ende der groben Aussortierung
67 end %Ende der For-Schleife
```

Abbildung 3.30: Auswertung v.O. C, $0^\circ \leq \Theta \leq 40^\circ$

Der Vorgang der Analyse des Θ Winkels im Bereich von 0° bis 40° wurde für die zweite Schicht wiederholt und anschließend ausgewertet. Diese Auswertung wurde mithilfe einer simplen Bildüberlagerung mit jeweils 50% Bildanteil durchgeführt. Nach der Überlagerung erfolgte durch die Funktion “`bwlabel()`“ eine erneute Auszählung, um die Variable “Faseranzahl Gesamt“ bestimmen zu können. Dieser Vorgang stellte den Abschluss der MATLAB-Bildanalyse dar.

Der Quellcode aus dem verwendeten MATLAB-Programm zur Bildüberlagerung und der anschließenden Auswertung der Überlagerung wird nachstehend angeführt.

```

1      %Bild aus Schicht I
2      a_4040 = double(BW4040_A);
3
4      %Bild aus Schicht II
5      b_4040 = double(BW4040_B);
6
7      %Ueberlagerungsfaktor  $0 \leq \alpha \leq 1$ 
8      alpha = 0.5;
9
10     %Ueberlagerung
11     aAlpha = alpha .* a_4040;
12     bAlpha = (1 - alpha) .* b_4040;
13     fusedImg = aAlpha + bAlpha;
14     fused4040 = uint8(fusedImg);
15
16     %Erneute Auszaehlung und Ausgabe
17     [fused4040, numfused4040] = bwlabel(fused4040);
18     figure, imshow(fused4040), title(['Total number of objects 0-40: ' ...
        num2str(numfused4040)]);

```

In der Abbildung 3.31 ist das im Quellcode zuvor generierte überlagerte Bild des $0^\circ \leq \Theta \leq 40^\circ$ Bereiches abgebildet. Man kann auf dieser Abbildung die überlagerten Faserellipsen erkennen. Auch ist ersichtlich, dass sich an einer Stelle mehrere Faserpaare überlagern. Die Ursache dafür ist, dass zwei naheliegende Fasern der ersten Schicht und die dazugehörigen Fasern aus der zweiten Schicht nicht als jeweils zwei Faserpaare, sondern als ein einziges großes Faserpaar angezeigt wurden. Es wurde versucht, diesen Fehler mit einer größeren Pixelrate der Funktion “imdilate()“ zu minimieren. Dies funktionierte zwar soweit, dass sich unabhängige Faserpaare nicht mehr überlagerten, jedoch stieg der Fehler, dass sich einzelne Fasern nicht mehr in den zwei Schichten überlagerten. Der dadurch entstandene Fehler, dass sich zwei zusammengehörige Faserellipsen nicht mehr überlagern, war um ein vielfaches größer als der Fehler, dass sich mehrere unabhängige Paare überlagern. Aus diesem Grund konnte erst in der Faserlängenabweichung $\Delta w = 3\%$ Rücksicht auf diesen Fehler genommen werden.

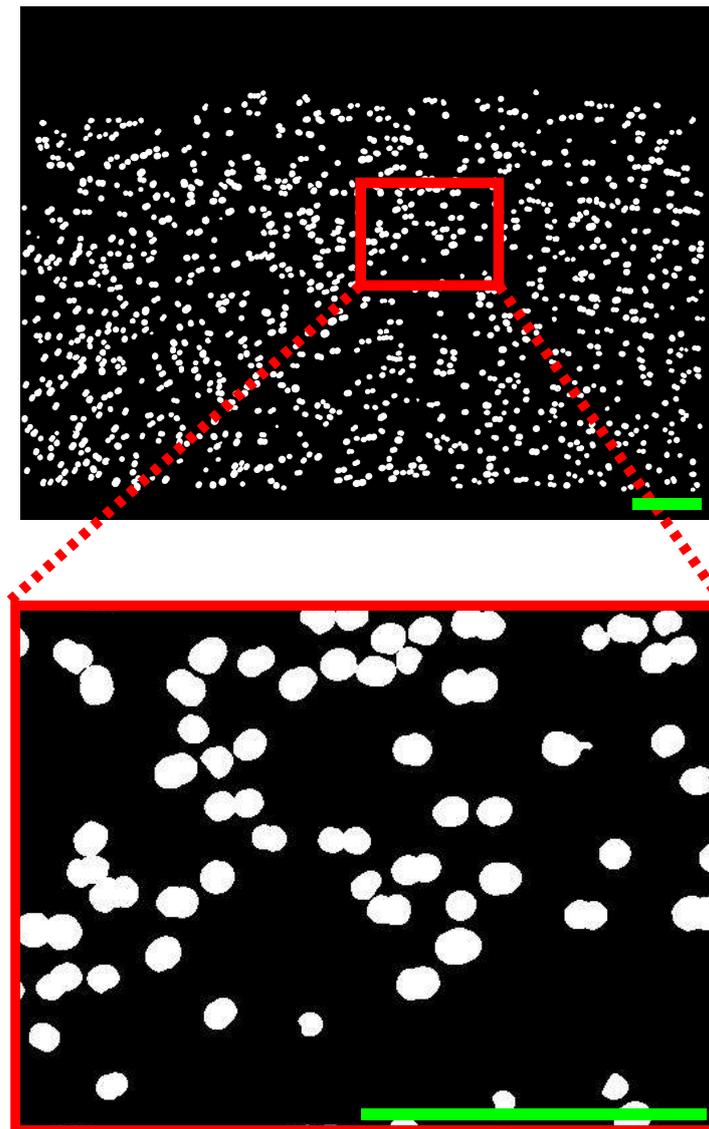


Abbildung 3.31: Überlagertes Bild v.O. C und v.O. D, $0^\circ \leq \Theta \leq 40^\circ$

3.3.5 Resultate “Two Section“ Method

Die erzielten Ergebnisse aus dem vorangegangenen Kapitel 3.3.4 werden in diesem Kapitel in tabellarischer Form dargestellt und analysiert. In der ersten Tabelle (3.3) sind die Ergebnisse aus der MATLAB Bildanalyse enthalten. Die zweite Tabelle (3.4) umfasst die berechneten Faserlängen und Abweichungen, welche mit der zuvor erwähnten Berechnungsmethode nach Zak et al. [1] erzielt wurden.

Die hier präsentierten Ergebnisse resultieren aus dem zweiten Durchlauf mit 10-facher Vergrößerung. Im ersten Durchlauf wurden Proben mit 20-facher Vergrößerung analysiert, wel-

che aufgrund der zuvor genannten Ursachen (keine Fasertrennung, keine Aufhellung etc.) keine realistischen Ergebnisse hervorbrachten. Man konnte in der Analyse mit 20-facher Vergrößerung leicht erkennen, dass mit den Ansichten parallel zur Fließrichtung “von Vorne“ und “von Unten“ keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt werden können. In der Auswertung der Proben mit 10-facher Vergrößerung zeigte sich in der Probe “von Unten“ ein ähnlich schlechtes Bild, wie in der Auswertung der 20-fachen Vergrößerung und es wurde deshalb auf eine Auswertung der “von Vorne“ Probe verzichtet.

In der Tabelle 3.3 ist die ermittelte Faseranzahl der jeweiligen Probe ersichtlich.

Tabelle 3.3: Bildanalyse “Two Section“ Method

Probe	Faseranzahl NI (Schicht 1)	Faseranzahl Schicht 2	Faseranzahl Gesamt	Faseranzahl NII
von Oben				
A-B	856	913	975	794
B-C	872	857	925	804
C-D	805	817	887	735
D-E	872	857	898	831
D-F	773	766	805	734
D-G	862	852	901	813
D-H	801	793	841	753
von Rechts				
A-B	184	182	317	49
B-C	726	768	998	496
C-D	826	798	963	661
von Unten				
A-B	145	160	263	42
B-C	180	172	213	139
C-D	181	189	234	136

Aufgrund des Überlappens durch ImageJ musste teilweise ein Teil des Bildes weggeschnitten werden und die Faseranzahl der gleichen Schicht kann sich dadurch innerhalb der Analyse unterscheiden. Zum Beispiel hat die Schicht B der Probe “von Oben“ in der ersten Analyse 913 Fasern und in der darauffolgenden Analyse nur mehr 872 Fasern.

Mit den erzielten Faserergebnissen aus 3.3 konnte die Faserlängenanalyse nach Zak et al. [1] mit MATLAB durchgeführt werden. Anzumerken ist, dass die Werte P, Q und R in der

Berechnung eine Konstante bilden und bei einem Bereich von 0° bis 40° folgende Werte annehmen:

- $P = \int_0^{40} p\theta \, d\Theta = 0,6981,$
- $Q = \int_0^{40} p\theta * \cos(\Theta) \, d\Theta = 0,643,$
- $R = \int_0^{40} p\theta * \sin(\Theta) \, d\Theta = 0,234.$

Wie bereits erwähnt, wurden zur Berechnung der Faserlängenabweichung die Faktoren Δz_t und Δw mit 2% bzw. 3% gewählt. In der Tabelle 3.4 sind die erzielten Ergebnisse aufgeführt.

Tabelle 3.4: Ergebnisse “Two Section“ Method

Probe	Schichtabstand $z_t \, \mu\text{m}$	Verhältnis $w = \frac{NII}{NI}$	Faserlänge \bar{l}	Faserlängenabweichung Δl
von Oben				
A-B	17	0,93	249	106
B-C	24	0,92	328	129
C-D	27	0,91	331	116
D-E	7	0,95	156	103
D-F	11	0,95	231	141
D-G	15	0,94	281	151
D-H	20	0,94	357	182
von Rechts				
A-B	45	0,27	61	3
B-C	35	0,68	114	11
C-D	32	0,80	168	26
von Unten				
A-B	40	0,29	55	3
B-C	28	0,77	128	18
C-D	27	0,75	112	14

Zu den erzielten Ergebnissen sind drei wesentliche Auffälligkeiten anzumerken. Erstens besteht ein starker Zusammenhang zwischen Abtragshöhe und ermittelter Faserlänge, zweitens sollten, wie zuvor schon erwähnt, Proben nicht in der Ansicht sondern in der Draufsicht analysiert werden und drittens geben Proben, welche in Fließrichtung liegen, ein besseres Ergebnis zurück.

Die Abtragshöhe z_t stellt zusammen mit dem Verhältnis $w = \frac{NII}{NI}$ einflussreiche Faktoren für

die Faserlängenberechnung dar. Man kann in der Tabelle 3.4 erkennen, dass diese zwei Faktoren miteinander korrelieren. In der Probe “von Oben“ wurde in der Schicht B-C und C-D nur 24 bzw. 27 μm abgetragen und ein Verhältnis von ca. 0,92 erzielt. Hingegen wurden in der Probe “von Rechts“, Schicht A-B, 45 μm und in der Probe “von Unten“, ebenfalls Schicht A-B, 40 μm abgetragen und nur eine Überlagerung von 0,27-0,28 erzielt. Die besten Ergebnisse wurden mit der “von Oben“ Probe erreicht, wobei hier auch eine große Faseranzahl eine bedeutende Rolle spielt. Dies ist in der Probe “von Rechts“ ersichtlich. In der Schicht B-C und C-D wurden erheblich mehr Fasern analysiert als in Schicht A-B und zeitgleich wurde die Abtragshöhe reduziert. Dadurch konnten bessere Ergebnisse erzielt werden. In der “von Unten“ Probe konnten allerdings auch schon mit der Verringerung der Abtragshöhe alleine Verbesserungen in der Analyse erzielt werden.

Hervorzuheben ist die extrem sensible Auswertung der gezählten Fasern. Dies soll anhand des Beispiels der Probe “von Oben“ Schicht D-H verdeutlicht werden. Man kann erkennen, dass der Wert von “Faseranzahl Gesamt“, d.h. des überlagerten Bildes, bei 841 Fasern liegt. Würde der Fall einer etwas ungenauen Auszählung und einer minimalen Änderung mit nur 1% eintreten, d.h. einer “Faseranzahl Gesamt“ von 850 Fasern, würde die errechnete durchschnittliche Faserlänge von 357 μm auf 299 μm sinken. Das bedeutet, eine 1% Änderung der Faserausählung kann das Ergebnis um ca. 16% beeinflussen.

Weitere Punkte sind in dieser Analyse kritisch anzumerken: Je länger die errechnete Faser ist, desto weniger Sinn ergibt die Faserlängenabweichung. Zum Beispiel hat die Probe “von Unten“, Schicht A-B, eine errechnete Faserlänge von 55 μm und eine Abweichung von 3 μm . Dies ergibt einen Abweichungsrahmen von ca. 5%. Die Probe “von Oben“ hat jedoch in der Schicht D-G eine prognostizierte Faserlänge von 281 μm und eine Abweichung von 151 μm und dies ergibt einen unglaublich hohen Abweichungsrahmen von 54%. Bei prognostizierter kurzer Faserlänge bewegt sich die Abweichung allerdings in einem glaubhaften Rahmen. Zum anderen kann man vor der Analyse die durchschnittliche Faserlänge nicht wissen und weiß daher nicht, wie viel man abtragen sollte, um ein vertrauenswürdiges z_t zu erhalten. Es wurde daher der Versuch unternommen, in der Probe “von Unten“ weniger als die empfohlene Abtragshöhe von $\frac{1}{10}$ der Faserlänge abzutragen. An dem Beispiel der Schicht D-E kann man erkennen, dass gerade einmal 7 μm abgetragen wurden. Wie später ersichtlich sein wird, handelt es sich hier um ca. $\frac{1}{40}$ anstatt dem empfohlenen $\frac{1}{10}$ der Gesamtlänge der Faser. Trotz einer hohen Überlagerung von 0,96 wurde eine erheblich zu kurze Faser berechnet. Auch in die andere Richtung, nämlich einem zu hohen Schichtabstand, kommt es, wie man Probe

“von Rechts“ und Probe “von Unten“ jeweils in der Schicht A-B entnehmen kann, zu einem ungenauen Ergebnis des viel zu hohen Abtrages. Jedoch liegt der Fehler eines zu hohen Abtrages nicht in der mathematischen Berechnung der Faserlänge, sondern darin, dass sich die Fasern nicht mehr im überlagernden Bild von Schicht 1 und Schicht 2 überlappen können. Zur Analyse, ohne die Faserlänge im voraus zu wissen, werden zuerst mehrere Schichten mit verschiedener Abtragshöhe benötigt, um schlussendlich zu wissen, wann eine Faserlänge ca. $\frac{1}{10}$ der Abtragshöhe erreicht.

Die letztlich erzielte gewichtete Faserlänge aller Proben beträgt $\bar{l} = 234$ mm mit einer gewichteten Faserlängenabweichung von $\Delta l = 100$ mm. Die aussagekräftige Probe “von Oben“ erzielte, exklusive der Versuchsschicht D-E, ein Ergebnis von $\bar{l} = 296$ mm mit einer gewichteten Faserlängenabweichung von $\Delta l = 136$ mm.

Abschließend sind kritische Worte zur Studie von Zak et al. [1] anzumerken: Es wurden vier Proben mit einem Umfangsrahmen von 48 bis 683 Fasern analysiert. Die Ergebnisse der errechneten durchschnittlichen Faserlänge für die jeweiligen Proben reichten von $54 \mu\text{m}$ bis $138 \mu\text{m}$. Das aber so erzielte gewichtete Endergebnis lag bei $114 \mu\text{m}$ und somit nur $3 \mu\text{m}$ neben dem Ergebnis des anerkannten Veraschungsverfahrens. Diese hohe Übereinstimmung hängt in dieser Arbeit somit eindeutig von der Anzahl der herangezogenen Proben ab und ist hier eher zufällig gegeben. Bei der Verwendung von nur drei Proben wäre die Abweichung deutlich größer gewesen. Es ist auch sehr wahrscheinlich, dass die Analyse einer weiteren Probe, die Streuung der vorliegenden vier Proben angenommen, ebenfalls zu einer größeren Abweichung führen würde. Eine deutliche Erhöhung der Probenanzahl sollte dann aber, den statistischen Gesetzmäßigkeiten folgend, wieder günstig sein.

3.4 Veraschungsverfahren

Das Veraschungsverfahren stellt die konventionelle Vorgehensweise zur Längenbestimmung dar. Leider kommt es in diesem Verfahren zu einer vollständigen Zerstörung der Probe. Beim Veraschungsverfahren verdampft durch Hitze die Matrix des Faserverbundwerkstoffes. Die Fasern hingegen bleiben unbeschadet und können anschließend ausgezählt und ausgemessen werden.

3.4.1 Vorgehensweise Veraschungsverfahren

Es wurden zwei Proben, wobei eine 2,5x2,5 mm und die andere 3x3 mm Außenabmaße besaßen, vorbereitet und in einer Keramikschaale in einen LINN High Term Ofen (Abbildung 3.32) gelegt. Die Probenstücke wurden deshalb so groß gewählt, damit das Verhältnis der durchtrennten Fasern gegenüber der unbeschädigten möglichst groß ist. Der Ofen wurde auf 530° erhitzt und die zwei Keramikschaalen wurden für zwei Stunden im Ofen gelagert. In diesen zwei Stunden verdampfte der Kunststoff und die Fasern blieben, wie erwartet, unbeschadet in der Keramikschaale zurück.



Abbildung 3.32: LINN High Term Ofen



Abbildung 3.33: Veraschungsanalyse

In Abbildung 3.33 sind am linken Rand die Probe, in der Mitte die Glasfasern der Probe und rechts der Glasträger mit Glasfasern ersichtlich. Wie in der Abbildung 3.33 ersichtlich, verklebten die Glasfasern nach dem Aufenthalt im Ofen und mussten zur Analyse mit Ethanol aufgeschwemmt werden. Zur Auswertung wurden mithilfe einer Pipette die aufgeschwemmten Glasfasern auf einen Glasträger gegeben und anschließend mittels einem Auflichtmikroskop Bilder in 5x Vergrößerung angefertigt. Diese Bilder wurden mit dem Programm Zeiss AxioVison, welches bereits im 2D-Schnittverfahren benutzt wurde, ausgewertet. Eine Beispielabbildung, welche zu einer Analyse herangezogen wurde, ist nachstehend angeführt.

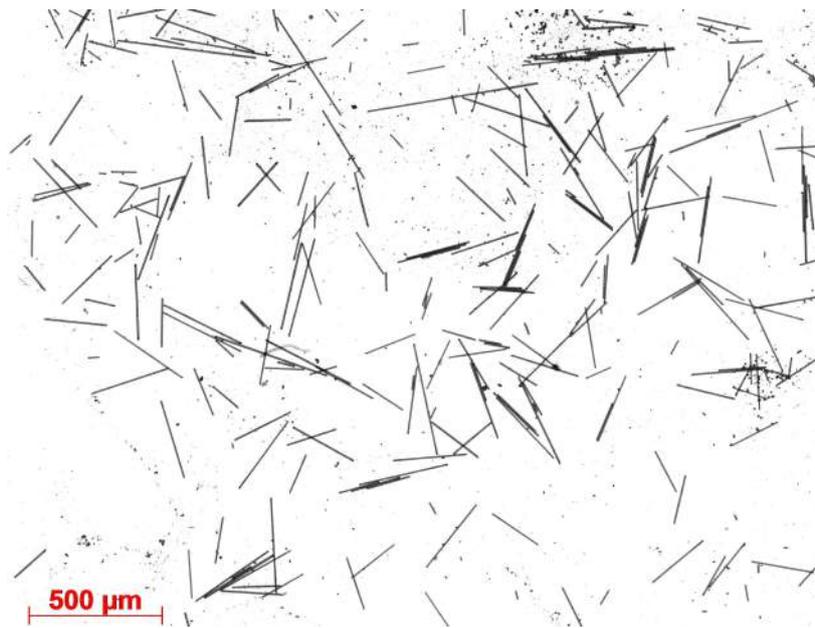


Abbildung 3.34: Analysebild Veraschungsverfahren

3.4.2 Resultate Veraschungsverfahren

Thieltges und Michaeli empfehlen für ein aussagekräftiges Veraschungsverfahren, welches vergleichbar ist mit dem hier angewendeten Veraschungsprozess, eine Analyse von mindestens 500-800 Fasern. [24] Die erreichten Ergebnisse aus dem Veraschungsverfahren sind der unten angeführten Tabelle (3.5) zu entnehmen.

Tabelle 3.5: Ergebnisse Veraschungsverfahren

Probe	Faserlänge	Faseranzahl
Probe 1	272	125
Probe 2	275	156
Probe 3	328	145
Probe 4	293	387
Probe 5	295	405
Probe 6	293	323

Der gewichtete Mittelwert für das Veraschungsverfahren beträgt $294 \mu\text{m}$ mit einer gewichteten Varianz von $\pm 6 \mu\text{m}$.

4 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hatte die Analyse der Faserorientierung und Faserlänge in einem Glasfaser kurzfaserverstärktes Polypropylen (PP)-Spritzgussteil zur Aufgabe.

Ersteres, die Faserorientierung, konnte fehlerfrei analysiert werden. Es wurden dazu zwei verschiedene Analysewege durchgeführt. Der erste mit dem Hauptabtrag durch Schleifen und der zweite mit dem Hauptabtrag durch Fräsen. Beide Analysewege wurden mithilfe von Zeiss AxioVision ausgewertet und ergaben ähnliche Resultate, welche auch mit der Einspritzstelle und der Einspritzrichtung schlüssig waren. So wurden zum Beispiel in Fließrichtung hauptsächlich Fasern mit der Orientierung in Fließrichtung gefunden. Andererseits wurde an Stellen, welche nicht direkt in Fließrichtung liegen, ein normal verteiltes Ergebnis des Φ Winkels erzielt. Auch der zweite Orientierungswert, Schrägungswinkel Θ , lieferte an allen untersuchten Stellen plausible Ergebnisse.

Die Ermittlung der Faserlänge wurde durch zwei verschiedene Verfahren erzielt. Zum einen durch die konventionelle Methode des Veraschungsverfahrens und zum anderen durch die "Two Section" Method. Diese "Two Section" Method wurde unterstützt durch ein selbstgeschriebenes MATLAB Programm. Die mathematische Berechnungsgrundlage basiert auf der Methode nach Zak et al. [1]. Es wurden jedoch in der Untersuchung dieser Arbeit einige kleine Abänderung des Analyseweges benötigt. Der vorgeschlagene Weg von Zak et al. war durch den entstehenden inplane Winkel Ψ nicht möglich. Durch eine Schichtüberlagerung und einer erneuten Auszählung wurde der Fehler minimiert und es resultierten daraus realistische Ergebnisse. Die erhaltenen Resultate waren stark abhängig von der begutachteten Stelle und deren Orientierung zur Strömungsrichtung. Die erzielte gewichtete Faserlänge aus allen Proben der "Two Section" Method beträgt $234 \mu\text{m}$ und die gewichtete Faserlängenabweichung $\Delta l = 100 \mu\text{m}$. Die konventionelle Veraschungsmethode ergab allerdings ein gewichtetes Ergebnis von ca. $294 \mu\text{m}$ und einer gewichteten Varianz von $\pm 6 \mu\text{m}$. Zwar liegt das Ergebnis der "Two Section" Method mit der Faserlängenabweichung im Rahmen der Ergebnisse der Veraschungsmethode, jedoch ist dieser Rahmen mit $134 \mu\text{m}$ bis $334 \mu\text{m}$ eindeutig zu hoch. Auch wenn man nur das erzielte Ergebnis der "Two Section" Method mit

der Veraschungsmethode vergleicht, liegt es um $59 \mu\text{m}$, oder anders ausgedrückt um ca. $\frac{1}{5}$, unter dem Wert der Veraschungsmethode.

Weiß man hingegen die Fließrichtung und hat man die abzutragende Schichthöhe z_t versuchsweise ermittelt, so kann man die Faserlänge in guter Näherung bestimmen. Als Beispiel hierzu dient die Vorzeigeprobe "von Oben", welche ohne der Versuchsschicht D-E, die nur zur Ermittlung des optimalen Schichtabstandes diente, eine gewichtete Faserlänge von $296 \mu\text{m}$ erzielte. Diese liegt somit nur $3 \mu\text{m}$ über dem Ergebnis der Veraschungsmethode. Das entspricht einer Abweichung ca. 1% und das bei einem beachtlichen Probenumfang von sechs Schichtpaaren und über 5000 analysierten Fasern. Kritisch angemerkt sei, dass die Faserlängenabweichung Δl mit $136 \mu\text{m}$ auch in dieser Betrachtung äußerst hoch ist. Für eine bessere Übersicht der erreichten Ergebnisse werden diese nochmals in der nachfolgenden Tabelle 4.1 zusammengefasst. Es wurde auch die gewichtete Probenvarianz der "Two Section" Method berechnet und eingefügt. Diese nimmt, im Gegensatz zur Abweichung Δl , keinen direkten Bezug auf die Länge der berechneten Faser, sondern nur auf die Abweichung der erzielten Ergebnisse.

Tabelle 4.1: Ergebnisübersicht Längenanalyse

	"Two Section" Method - Gesamt	"Two Section" Method - "von Oben"	Veraschungs- verfahren
Faserlänge \bar{l}	234 μm	296 μm	293 μm
Abweichung Δl	100 μm	136 μm	-
Probenvarianz	68 μm	46 μm	6 μm

5 Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften Glasfaser [7]	6
3.1	Abtragshöhe Schleifen	18
3.2	Abtragshöhe Fräsen	19
3.3	Bildanalyse “Two Section“ Method	53
3.4	Ergebnisse “Two Section“ Method	54
3.5	Ergebnisse Veraschungsverfahren	58
4.1	Ergebnisübersicht Längenanalyse	60

6 Abbildungsverzeichnis

1.1	Materialverbrauch [2]	1
2.1	Herstellungsverfahren Glasfaser [7]	5
2.2	Faserform [4]	7
2.3	Schematische Fasereffektivität nach Schemme [8] bzw. Schijve [9]	8
2.4	Aufschmelzen von Fasergranulaten in der Spritzgussmaschine [7]	9
2.5	Prinzip der Direktverarbeitung von Glasfaserrovings [7]	9
2.6	Azimuth- und Schrägungswinkel [13]	11
2.7	Faserrichtung [13]	11
2.8	Orientierungswerte für Faserorientierungstensoren [16]	12
2.9	Nicht vollständig abgebildete Fasern [16]	13
2.10	Qualitative Spannungs-/Dehnungsdiagramme [6]	14
3.1	Probenstellen	15
3.2	Probenpräparation 2-D Schnittverfahren	16
3.3	Schichteinteilung der Proben	17
3.4	Fräsmaschine	19
3.5	Probenstelle 1 Original Bilder Schleifen (i) und Fräsen (ii)	21
3.6	Probenstelle 1 Φ Diagramme Schleifen und Fräsen	22
3.7	Probenstelle 1 Θ Diagramme und Orientierungstensor Schleifen und Fräsen .	23
3.8	Probenstelle 2 Original Bilder Schleifen (i) und Fräsen (ii)	24
3.9	Probenstelle 2 Φ Diagramme Schleifen und Fräsen	25
3.10	Probenstelle 2 Θ Diagramme und Orientierungstensor Schleifen und Fräsen .	26
3.11	Original Bilder rechte Ecke Schleifen (i) und linke Ecke Fräsen (ii)	27
3.12	Ecke Φ Diagramme Schleifen und Fräsen	28
3.13	Ecke Θ Diagramme und Orientierungstensor Schleifen und Fräsen	29
3.14	Faserhöhe mit zwei Extremposition [1]	31
3.15	Probenstellen und Ansicht in der “Two Section“ Method	34
3.16	Originalbild v.R. C	35

3.17	Gedrehtes Bild v.R. C	35
3.18	“Two Section“ Method Ellipsenform [1]	36
3.19	Ausschnitt aus Originalbild v.O. D	38
3.20	Ausschnitt aus überarbeiteten Bild v.O. D	38
3.21	Funktion “imread“ v.O. C	39
3.22	Funktion “im2bwc“ v.O. C	40
3.23	Funktion “medfilt2“ v.O. C	41
3.24	Funktion “medfilt2“ mit Rahmen v.O. C	42
3.25	Funktion “imclearborder“ v.O. C	42
3.26	Funktion “imerode“ v.O. C	43
3.27	Funktion “imdilate“ v.O. C	44
3.28	Funktion “vislabel“ v.O. C	45
3.29	Funktion “regionprops“ v.O. C	47
3.30	Auswertung v.O. C, $0^\circ \leq \Theta \leq 40^\circ$	50
3.31	Überlagertes Bild v.O. C und v.O. D, $0^\circ \leq \Theta \leq 40^\circ$	52
3.32	LINN High Term Ofen	57
3.33	Veraschungsanalyse	57
3.34	Analysebild Veraschungsverfahren	58

7 Literaturverzeichnis

- [1] G. Zak; M. Haberer; C.B. Park; B. Benhabib. Estimation of average fibre length in short-fibre composites by a two-section method, *Composites Science and Technology* Vol.35 No.4 (2000), 316.
- [2] M. F. Ashby. *Materials Selection in Mechanical Design*. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2010, Oxford, 4. Auflage.
- [3] R.F. Gibson. *Principle of composite material mechanics*. McGraw-Hill, 1994, USA.
- [4] M. Bonnet. *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung*. Vieweg+Teubner Verlag, GWV Fachverlage GmbH, 2015, Wiesbaden.
- [5] M. Neitzel; P. Mitschang; U. Breuer. *Handbuch Verbundwerkstoffe; Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. Carl Hanser Verlag, 2014, München, 2. Auflage, 2. edition.
- [6] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.). *Handbuch Faserverbundkunststoffe*. Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH, 2010, Wiesbaden, 3. Auflage.
- [7] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.). *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*. Springer Vieweg, 2014, Wiesbaden, 4. Auflage, 4. edition.
- [8] M. Schemme. *Langfaserverstärkte Thermoplaste. Kunststoffe*. Carl Hanser Verlag, 2008, München.
- [9] W. Schijve. Long glass fibre PP - High Performance at medium fibre length, 2000, 3rd AVK-TV Conference, Baden.
- [10] A. Radtke. Steifigkeitsberechnung von diskontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten auf der Basis von Faserorientierungs- und Faserlängenverteilungen, 2008, Wissenschaftliche Schriftenreihe des Fraunhofer ICT, Band 45.
- [11] M. Weyrich. Universität Siegen. Neue Fertigungsverfahren für die Großserienfertigung von Faserverbundwerkstoffen im Automobilbau. Abrufdatum: 20.03.2015, Quelle: <https://wiki.zimt.uni-siegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php>.
- [12] M.R. Kamal; L. Song; P. Singh. Measurement of fibre and matrix orientations in fibre reinforced composites, *Polymer Composites* Vol.7 No.5 (1986), 323.

-
- [13] A. Bernasconi; F. Cosmi; P.J. Hine. Analysis of fibre orientation distribution in short fibre reinforced polymers: A comparison between optical and tomographic methods, *Composites Science and Technology* 72 (2012), 2002.
- [14] S.G. Advani; C.L. Tucker III. The use of tensors to describe and predict fiber orientations in short fiber composites, *Journal of Rheology* 31 (1987), 751.
- [15] R.S. Bay; C.L. Tucker III. Fiber orientation in simple injection moldings. Part II: Experimental results, *Polymer Engineering and Science* 32 (1992), 240.
- [16] C. Eberhardt; A. Clarke. Fibre-orientation measurements in short-glass-fibre composites. Part I: automated, high-angular-resolution measurement by confocal, 2001, *Composites Science and Technology* 61 (2001), 1389.
- [17] S.Y. Fu; Y.W. Mai; E.C.Y. Ching; R.K.Y. Li. Correction of the measurement of fiber length of short fiber reinforced thermoplastics, 2002, *Composite Science and Technology* 56 (1996), 1179.
- [18] R.T. Zhu; W.R. Blumenthal; T.C. Lowe. Determination of non-symmetric 3-D fiber-orientation distribution and average fiber length in short-fiber composites, *Journal of Composite Materials* Vol. 31 No.13 (1997), 1287.
- [19] R.Blanc; Ch. Germain; J.P. Da costa; P. Baylou; M. Cataldi. Fiber orientation measurements in composite materials, *Composites: Part A* 37 (2006), 197.
- [20] C.T. Ho; L.H. Chen. A fast ellipse/circle detector using geometric symmetry, *Pattern Recognition* Vol. 28 No. 1 (1995), 117.
- [21] A.R. Clarke; G. Archenhold; N.C. Davidson. A novel technique for determining the 3D spatial distribution of glass fibres in polymer composites, *Composites Science and Technology* 55 (1995), 75.
- [22] M. Vincent; T. Giroud; A. Clarke; C. Eberhardt. Description and modeling of fiber orientation in injection molding of fiber reinforced thermoplastics, *Polymer* 46 (2005), 6719.
- [23] Y. Xie; Q. Ji, Universität Heidelberg, A new efficient ellipse detection method, 2002, Abrufdatum: 18.01.2015, Quelle:<http://hci.iwr.uni-heidelberg.de/publications/dip/2002/ICPR2002/DATA/>.
- [24] H.P. Thielgas; W. Michaeli. Effects on fiber length during processing, *SPE ANTEC Technical Papers* Vol. 37 (1991), 1991.