

Kompaktierungsverhalten kontinuierlicher Faserbündel

Masterarbeit

verfasst von

Hermann STEINER, BSc

erstellt am

Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen
Department Kunststofftechnik
Montanuniversität Leoben



Begutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf SCHLEDJEWSKI

Betreuer: MSc. Dimitrios KASTANIS

Leoben, im November 2015

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

.....
Datum

.....
Unterschrift

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von Oktober 2014 bis November 2015 am Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski an der Montanuniversität Leoben.

Bedanken möchte ich mich bei den MitarbeiterInnen des Lehrstuhles für die Unterstützung und das nette Betriebsklima, vor allem bei meinem Betreuer Herrn Dimitrios Kastanis, MSc für die gute Betreuung. Besonderer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Maximilian Tonejc für die Hilfestellung beim Umbau des Prüfstandes und Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Ewald Fauster für die Einschulung.

Für die Anstellung am Christian Doppler Labor (CDL) für hocheffiziente Composite Verarbeitung für die Dauer meiner Masterarbeit bedanke ich mich bei der Christian Doppler Gesellschaft. Zudem gilt mein Dank auch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski, der mir die Durchführung der Arbeit am Lehrstuhl ermöglicht und diese im Anschluss begutachtet hat.

Für den Rückhalt während meines Studiums möchte ich mich herzlich bei meinen Eltern, meinem Bruder und meiner Freundin Katharina bedanken.

Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Kompaktierungsverhalten kontinuierlicher Faserbündel mittels Lichtschnittsensortechnik untersucht. Werden kontinuierliche Faserbündel einer axialen Belastung unterzogen, wie es etwa bei der Herstellung von Bauteilen im Pultrusions- und Wickelprozess vorkommt, orientieren sich die einzelnen Filamente des betrachteten Faserbündels in Bündellängsrichtung. Dies hat zur Folge, dass der freie Raum zwischen den einzelnen Filamenten abnimmt, der Faservolumenanteil hingegen nimmt zu. Während im fertigen Bauteil ein möglichst hoher Faservolumenanteil erwünscht ist, behindert ein hoher Faservolumenanteil eine vollständige Imprägnierung durch die Matrix. Es wird für das Harz schwieriger, alle Filamente einzubetten, der Imprägniervorgang dauert länger.

Um das Kompaktierungsverhalten beschreiben zu können, wurden im Zuge der vorliegenden Arbeit eine Vielzahl verschiedener statischer und dynamischer Experimente durchgeführt. Neben den Auswirkungen der Belastung selbst auf das Kompaktierungsverhalten wurden auch die Auswirkungen der Belastungsgeschwindigkeit, der Krafteinleitung, der Abzugsgeschwindigkeit, der Messparameter, des Zeitfensters für die Messungen, das Verhalten bei zyklischer Belastung und die Form der Faserbündel während des Belastungsvorganges untersucht.

Im ersten Schritt wurde dazu eine Auswertesoftware in Matlab[®] erstellt, die die mittels Lichtschnittkamera aufgezeichneten Profildaten der untersuchten Faserbündel beschnitt und in weiter verarbeitbare Messdaten in Form von Querschnittswerten umwandelte. Aus diesen Querschnittswerten wurde im nächsten Schritt durch Bezug auf die Summe der reinen Filamentquerschnitte der Faservolumenanteil ermittelt, wodurch Kurven "durchschnittliche Spannung über Faservolumenanteil" erstellt werden konnten. Es konnte gezeigt werden, dass die ermittelten Kurven tendenziell den Ausführungen der Literatur entsprechen, jedoch aufgrund einer anderen Messtechnik nicht direkt miteinander verglichen werden können.

Abstract

This work deals with the research on the compaction behaviour of continuous fibre tows by the method of light section sensing. When continuous fibre tows are loaded by an axial force, which occurs within the production process of parts, e.g. the pultrusion process or the filament winding process, the filaments of the fibre tow are oriented in axial direction of the fibre tow. This results in less free space between the single filaments and in an increase of the fibre volume fraction. In the end, the produced part should have a high fibre volume fraction. If the fibre volume fraction is high during the impregnation process, the matrix is hindered to impregnate the fibre tow completely. It is harder for the resin to imbed all the filaments, the impregnation process takes a longer time.

To describe the compaction behaviour, a lot of different dynamic and static experiments have been done in this work. Beside the effect of the strain itself on the compaction behaviour, also the effect of the loading rate, the force application, the pulling speed, the set-up parameters of the used devices, the time frame for the measurement, the behaviour of cyclic loading and the form of the fibre bundles during the loading were investigated.

At the first step a Matlab[®] script was written to process the data of the fibre bundle measured by the light section sensor and to deliver useable data to calculate the cross section and the fibre volume fraction of the fibre tow. In the next step it was possible to print charts “average stress by fibre volume fraction“. It was shown that the drawn curves follow the descriptions in the literature, but due to a different methode of measurement they are not compareable directly to the literature.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Fasern als Verstärkungsmaterialien	1
1.2	Einteilung der Fasern	3
1.3	Herstellung von Bauteilen basierend auf kontinuierlichen Faserbündeln	4
2	Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln	6
2.1	Das Gesetz von Darcy	6
2.2	Faservolumenanteil	7
2.3	Modelle für das Kompaktierungsverhalten	9
2.4	Modelle für das viskoelastische Verhalten	19
2.5	Modelle zur Beschreibung mittels Masterkurve	22
2.6	Geometrie der Faserbündel	23
3	Experimentelles	25
3.1	Prüfaufbau und verwendete Geräte	25
3.2	Kompaktierungsmodell	31
3.3	Auswertung der Messergebnisse	34
3.4	Ermittlung des Faservolumenanteiles	37
3.5	Untersuchte Fasertypen	39
4	Untersuchung von Belichtungszeit und Verstärkung	42
4.1	Belichtungszeit und Verstärkung für Kohlenstofffasern	42
4.2	Belichtungszeit und Verstärkung für Glasfasern	44
5	Statische Messungen	46
5.1	Darstellung der Messgenauigkeit	46
5.2	Bestimmung des Zeitfensters	47
5.3	Statische Versuche an Kohlenstofffaserrovings	49

5.3.1	Beschreibung der statischen Versuche	49
5.3.2	Statische Versuche an Kohlenstofffaser Tenax [®] 800 tex Schliche E13	49
5.3.3	Statische Versuche an Kohlenstofffaser Tenax [®] 800 tex Schlichte F13	52
5.3.4	Statische Versuche an Kohlenstofffaser Tenax [®] 1600 tex Schlichte F13	55
5.3.5	Statische Versuche an Kohlenstofffaser Tenax [®] 1600 tex Schlichte F13 mit doppelter Belastung	57
5.3.6	Statische Versuche an Kohlenstofffaser Sigrafil [®] 3300 tex . . .	60
5.3.7	Zusammenfassung statischer Versuche an Kohlenstofffaser . .	62
5.4	Statische Versuche an Glasfaserrovings	65
5.4.1	Statische Versuche an Glasfaser OCV [™] Reinforcements 2400 tex	65
5.5	Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Krafteinleitung	70
5.6	Versuche mit kontinuierlich zunehmender Last	73
5.7	Zyklische Versuche an Kohlenstofffaserrovings	77
6	Dynamische Versuche an Kohlenstofffaserrovings	80
7	Untersuchung der geometrischen Form von Faserbündeln	86
8	Diskussion der Messergebnisse	90
9	Literaturverzeichnis	97
10	Tabellenverzeichnis	101
11	Abbildungsverzeichnis	103
12	Anhang	107

1 Einleitung

1.1 Fasern als Verstärkungsmaterialien

Kontinuierliche Faserbündel werden auch als Rovings bezeichnet und liegen als Bündel aus nahezu parallel angeordneten Endlosfasern, so genannten Filamenten, vor. Rovings werden zur Herstellung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen eingesetzt und stellen somit einen wichtigen Ausgangsstoff für verschiedene Produktionsprozesse dar. Dabei wird das Faserbündel in eine Kunststoffmatrix eingebettet. Die Fasern übernehmen die Aufgabe, Kräfte zu übertragen, während die Matrix die Fasern schützt, an Ort und Stelle fixiert und die Kräfte in die einzelnen Fasern einleitet bzw. zwischen den Fasern überträgt. Die am häufigsten verwendeten Fasertypen für die Zusammenfassung zu einem Roving stellen Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern dar.

Zur Beschreibung eines Rovings werden die Anzahl der Filamente (z.B. 12.000 oder 12 k) und das Gewicht des Faserbündels je Kilometer Länge, die so genannte Feinheit (z.B. 800 tex = 800 g/km), herangezogen. Neben dem Material, aus dem die einzelnen Fäden sind, spielt auch der Durchmesser des annähernd kreisförmigen oder elliptischen Querschnitts der einzelnen Filamente eine Rolle für deren Eigenschaften. Je nach Fasertyp beträgt der Durchmesser zwischen 5 und 24 μm . Liegt ein Werkstoff in Faserform vor, so zeigt er meistens höhere Festigkeitskennwerte als wenn er in anderer Form vorliegt. Dieses Verhalten nutzt man bei faserverstärkten Materialien aus. Im Wesentlichen gibt es vier Mechanismen [1], die zu diesem Verhalten führen.

1 Einleitung

1) Der Größeneffekt

Mit zunehmender Größe des betrachteten Werkstoffvolumens nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass im Material eine größere als die bisher größte vorhandene Fehlstelle vorkommt. Die Festigkeit von Werkstoffen wird durch die Größe und Lage dieser Defekte bestimmt. Dies bedeutet, dass die Festigkeit mit sinkendem Faserdurchmesser und sinkender Faserlänge zunimmt [1].

2) Der Orientierungseffekt

Fasern werden bevorzugt durch Spinnen, Ziehen und Verstrecken hergestellt. Im Zuge dieser Herstellungsprozesse werden die einzelnen Fasern gestreckt, wodurch sich die Molekülketten der Fasern in Längsrichtung orientieren. Dies führt zu verbesserten mechanischen Eigenschaften in Längsrichtung, jedoch meist auch zu reduzierten Festigkeits- und Steifigkeitskennwerten quer zur Faserrichtung, wodurch die Faser ein anisotropes Werkstoffverhalten besitzt [1].

3) Der Fehlstellen- und Kerbeffekt

In jedem realen Werkstoff befinden sich statistisch verteilte Fehlstellen. Aufgrund der Fehlstellen kommt es zwar zu einer Abnahme des tragenden Querschnittes, diese Abnahme ist jedoch sehr gering, da die Fehlstellen verhältnismäßig klein sind. Fehlstellen in Form einer scharfen Kerbe bewirken eine Spannungsüberhöhung am Kerbrand, die bei spröden Werkstoffen, wie sie für Fasern verwendet werden, nicht durch plastisches Fließen abgebaut werden kann. Dies führt dazu, dass die aus der atomaren Bindungsenergie resultierenden Festigkeitskennwerte nicht erreicht werden. Defekte, die quer zur Belastungsrichtung orientiert sind, wirken sich aufgrund der an den Rändern entstehenden hohen Spannungsüberhöhungen äußerst ungünstig aus. Dem entgegen wirkt das Ausziehen der Faser beim Herstellungsprozess: Die Fehlstellen werden in Faserrichtung orientiert, gelängt und an den Enden abgeplättet, wodurch die Spannungsüberhöhung an den Kerbenden abnimmt und die Festigkeit zunimmt [1].

4) Der Eigenspannungseffekt

Die Festigkeitskennwerte können durch das Einbringen von Eigenspannungen gesteigert werden. Glasfasern kühlen während des Herstellungsprozesses an der Außenseite

1 Einleitung

schneller ab und erstarren früher als im Inneren. Der später abkühlende Kern bewirkt durch sein Schrumpfen eine Druckeigenspannung an der Faseroberfläche, wodurch festigkeitsmindernden Effekten durch äußere Beschädigungen entgegengewirkt wird [1].

1.2 Einteilung der Fasern

Je nach Ausgangsmaterial können Fasern verschiedenen Kategorien zugeordnet werden, wie in Tabelle 1 dargestellt ist. Die am häufigsten eingesetzten Fasertypen sind Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern [1]. Abbildung 1 zeigt einen Kohlenstofffaserroving und einen Glasfaserroving.

Gruppe	Beispiele
Naturfasern	Haare, Wolle, Seide, Baumwolle, Flachs, Sisal, Hanf, Jute, Ramie, Bananenfaser
Organische Fasern	<i>Kohlenstoff</i> , <i>Aramid</i> , Polyethylen, Polypropylen, Polyamid, Polyester, Polyacrylnitril,
Anorganische Fasern	<i>Glas</i> , Basalt, Quarz, SiC, Al ₂ O ₃ , Bor, Asbest, ...
Metallfasern	Stahl, Aluminium, Kupfer, Nickel, Beryllium, Wolfram, ...

Tabelle 1: Einteilung der Fasern [1]

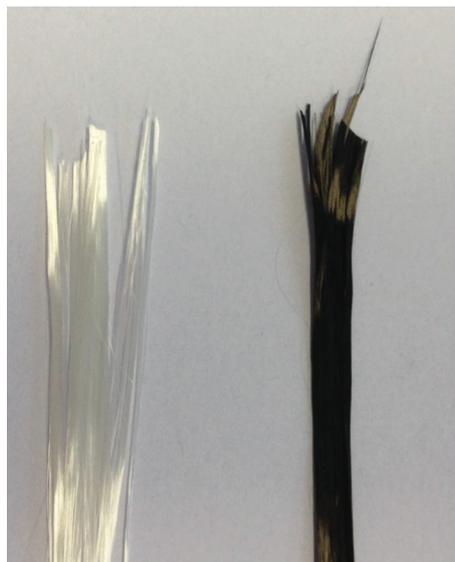


Abbildung 1: Glasfaserroving (links) und Kohlenstofffaserroving (rechts)

1.3 Herstellung von Bauteilen basierend auf kontinuierlichen Faserbündeln

Durch Weben, Flechten oder Stricken von Rovings können Faser-Halbzeuge zur Weiterverarbeitung zu Bauteilen hergestellt werden. Direkt aus Rovings können Bauteile durch einen Pultrusionsprozess oder Wickelprozess erzeugt werden. Beim Pultrusionsverfahren werden mehrere Rovings durch ein profilgebendes Werkzeug, in dem die Imprägnierung der Fasern mit der Matrix und die Aushärtung erfolgt, gezogen, wodurch verschiedenste Profile hergestellt werden können. Das Wickelverfahren ermöglicht die Erzeugung von rotationssymmetrischen Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen wie etwa Behältern. Dabei wird der endlose Roving in einem Harzbad imprägniert und über ein Fadenauge definiert auf einem rotierenden Körper abgelegt. Beide Prozesse bedingen eine axiale Zugspannung im Roving: Beim Pultrusionsprozess entsteht die axiale Spannung infolge des Abzuges des Profils in Förderrichtung und dem Widerstand der Faserbündel im Werkzeug bzw. bei der Zuführung des Faserbündels zum Werkzeug; beim Wickelprozess durch die Rotationsbewegung des Wickelkörpers und der notwendigen Fadenspannung zur definierten Positionierung des Rovings.

Durch die axiale Zugspannung verändert sich der Faservolumenanteil des Rovings. Während im Ausgangszustand der Roving ohne axiale Spannung bzw. mit nahezu keiner axialen Spannung (aufgrund des Herstellungsprozesses / Wickelprozesses des Rovings) auf der Spule aufgewickelt vorliegt, beginnen sich die einzelnen Filamente durch die axiale Beanspruchung näher aneinanderzuschmiegen. Diese Situation ist in der nachfolgenden Abbildung 2 in Form eines normal zur Faserlängsachse durchschnittenen, ideal verteilten Faserbündels dargestellt. Die Kreise stellen die einzelnen Filamente dar. Im ersten Bild ist unter der Annahme, dass die Filamente gleichmäßig verteilt sind und den gleichen Abstand zueinander besitzen, die Situation auf der Spule dargestellt, während im zweiten Diagramm die Situation unter axialer Belastung abgebildet ist. In der Realität sind die einzelnen Filamente nicht derart gleichmäßig angeordnet, wie in Abbildung 2 gezeigt ist.

Durch diese Kompaktierung kommt es zu einer Abnahme des freien Volumens zwischen den einzelnen Fasern. Die Größe des Zwischenraumes beeinflusst das Imprägnierverhalten des Faserbündels und hat somit großen Einfluss auf die Prozessparameter und die Qualität des erzeugten Bauteiles. Durch verschiedene statische

1 Einleitung

und dynamische Experimente wird in dieser Arbeit das Kompaktierungsverhalten untersucht und in Modellen zu dessen Beschreibung dargestellt.

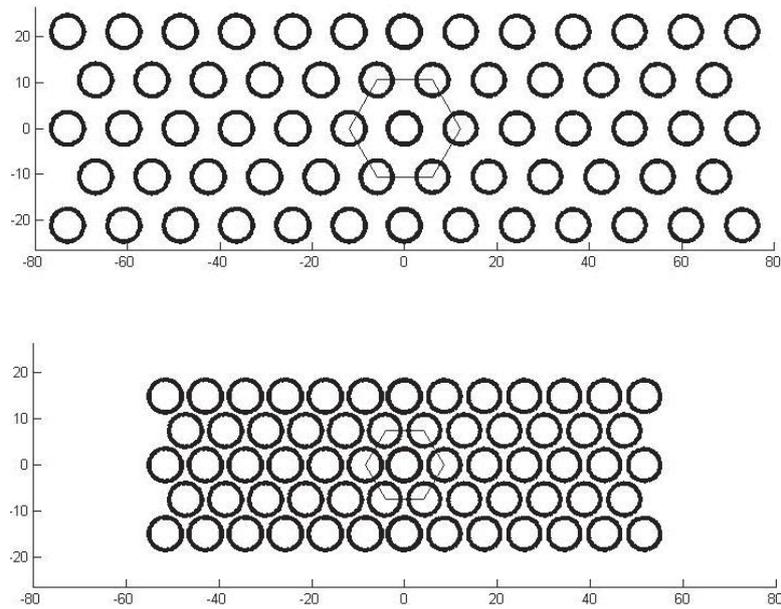


Abbildung 2: Kompaktierungsverhalten eines idealen Faserbündels

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

2.1 Das Gesetz von Darcy

Darcy beschrieb mit seiner 1856 veröffentlichten, empirisch ermittelten Gleichung die Strömung eines Fluids durch ein poröses Medium, – wie man erst später herausfand, handelte es sich dabei um eine vereinfachte Form der Navier-Stokes-Gleichung [2]. Während Darcy sich mit der Strömung von Wasser durch Gesteins- und Sandschichten beschäftigte, ist die Formel in nachfolgender Gleichung 2.1 auch zur Beschreibung des Imprägnierverhaltens von Faserbündeln durch Harz anwendbar, wobei das Faserbündel mit dem Raum zwischen den einzelnen Fasern dem porösen Material und das Harz dem Grundwasser in Darcys Modell entspricht. Darcys Gesetz zeigt, welchen Einfluss der Querschnitt der Fasern bzw. die Porosität auf die Durchflussmenge und damit das Imprägnierverhalten hat.

$$-\nabla p = \mu * v / K \quad (2.1)$$

Der linke Ausdruck steht hier für den Druckgradienten, der während der Imprägnierung vorhanden sein muss – ohne den Druckgradienten erfolgt kein Fließen. μ stellt die Viskosität der Flüssigkeit in [Pa*s] dar, v die Durchflussmenge in [m/s], bezogen auf die Porosität, und K die Permeabilität als Maß für die Durchdringbarkeit von Flüssigkeiten und Gasen gegenüber einem Medium in [m²]. Die Durchflussmenge des Harzes steht also in direktem Zusammenhang mit der Porosität des Faserbündels während der Imprägnierung, wodurch die Verringerung des freien Raumes zwischen

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

den einzelnen Fasern bei Zugbelastung für die Verarbeitung berücksichtigt werden muss. Die Permeabilität für ein Faserbündel in Faserrichtung K_1 und normal zur Faserrichtung K_2 kann auf Basis der von Gebart [3] für regelmäßig angeordnete Filamente des Durchmessers R ermittelten Gleichungen 2.2 und 2.3 errechnet werden:

$$K_1 = \frac{R^2}{4 \cdot c_1} \cdot \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \quad (2.2)$$

$$K_2 = c_2 \cdot \left[\sqrt{\frac{V_{fmax}}{V_f}} - 1 \right]^{5/2} \cdot R^2 \quad (2.3)$$

Die Parameter c_1 und c_2 sind geometrische Beiwerte und von der lokalen Filamentpackung abhängig. Je nach Anzahl der nächsten Nachbarn ergeben sich trianguläre, quadratische, pentagonale oder hexagonale Strukturen [4]. Die nachfolgende Tabelle 2 zeigt den Zusammenhang zwischen der Packungsart und den Parametern c_1 und c_2 .

Anz. benachb. Filamente	Packung	c_1	c_2	Faservolumenanteil
3	triangular	2,00	0,69	0,60
4	quadratisch	1,78	0,40	0,79
5	pentagonal	1,72	0,30	0,83
6	hexagonal	1,66	0,23	0,91

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen der Packungsart und den Parametern c_1 und c_2 zur Ermittlung der Permeabilitäten K_1 und K_2 [4].

Aus Tabelle 2 und den Gleichungen für K_1 und K_2 geht deutlich hervor, welchen Einfluss der Faservolumenanteil und die Geometrie der Filamente auf die Permeabilität und damit auf den Verarbeitungsprozess und das produzierte Bauteil haben.

2.2 Faservolumenanteil

Der Faservolumenanteil ist definiert als das Verhältnis des Volumens der Fasern zum Volumen des gesamten Faserbündels, d.h. die Summe des Volumens der Fasern und der Matrix bzw. der zwischen den Fasern befindlichen Luft. Je nach Packungsmodell ergeben sich für die quadratische Packung ca. 79% als maximaler Faservolumenanteil

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

und für die hexagonale Packung ca. 91%. In der Literatur wird der Faservolumenanteil auch häufig mit V_f bezeichnet, nicht zu verwechseln mit dem Faservolumen V_{faser} . Gleichung 2.4 zeigt die Definition des Faservolumenanteils.

$$\phi = V_f = \frac{V_{\text{faser}}}{V} = \frac{A_{\text{faser}} \cdot l}{A \cdot l} = \frac{A_{\text{faser}}}{A} \quad (2.4)$$

In der Realität treten bei konventionellen Herstellungsmethoden von Bauteilen aus unidirektionalen Faserschichten für den Faservolumenanteil Werte von ca. 50-60% auf [5, 6, 7]. Der theoretisch maximal mögliche Faservolumenanteil von ca. 91% bei hexagonaler Packung wird aufgrund von falsch ausgerichteten Fasern im Faserbündel, die zu einer Behinderung der Kompaktierung führen, nicht erreicht. Abbildung 3 zeigt das quadratische und das hexagonale Packungsmodell für Faserbündel.

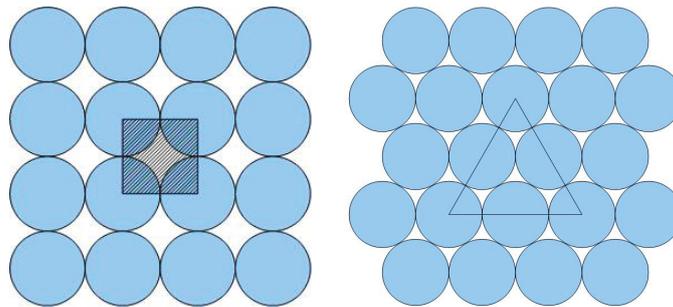


Abbildung 3: Quadratische und hexagonales Packungsmodell für Faserbündel.

Gibson, Cumiskey und Macosko [8] geben für Rovings einen in realen Bauteilen maximal erreichbaren Faservolumenanteil von nahezu 80% an. Bei Messungen wurde für lose Glasfaserrovings von den oben genannten ein Faservolumenanteil von 72% bei 2,07 MPa gemessen. Unter einem Faservolumenanteil von 50% ist der Druck auf einzelne Rovings nahezu null, die einzelnen Fasern können sich im Bündel bewegen, was bei Pultrusion zu lokalen Anhäufungen von Fasern und Harztaschen an einem anderen Ort führen kann. Daher liegt der übliche Faservolumengehalt bei mittels Pultrusionsprozess hergestellten Bauteilen bei ca. 60 bis 65%, was einem Kompaktierungsdruck von 70 bis 150 kPa gleichkommt. Bei gewebten Rovingmatten kommt es aufgrund der normal zur Hauptfaserrichtung gewebten Fasern zu typischen Faservolumenanteilen von 50 bis 60% bei Kompaktierung. Polyesterrovings die Faserbündel von Rovingmatten in einer (uniaxial knitted roving mats) oder beiden Richtungen (biaxial knitted roving mats) an Ort und Stelle fest, wodurch typische Faservolu-

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

menanteile von bis zu 65% auftreten können. Wirrfasermatten bestehen aus einem Binder und zufällig orientierten Fasern. Die unterschiedliche Orientierung der Fasern behindert die Kompaktierung, so dass typische Faservolumenanteile von nur 20 bis 40% erreicht werden [8]. Ahn und Seferis haben an ungesättigten, unidirektionalen Faserbündeln bei 0,37 bar (entspricht 0,037 MPa) einen maximalen Faservolumenanteil von 55% gemessen [9]. Saunders et. al. geben für Gewebe einen maximalen Faservolumenanteil von 60% an [10]. Govignon et al. erreichen bei der Untersuchung von nassen und trockenen Geweben bei einem Druck von 0,1 MPa einen Faservolumenanteil von ca. 48% [11]. Pearce und Summerscales geben den typischen maximal erreichbaren Faservolumenanteil in realen Bauteilen für Wirrfasern mit 35%, für bidirektionale Gewebe mit 55% und für unidirektionale, vorimprägnierte Fasern mit 75% (62% für E-Glasroving bei 157 kPa [12]) an [13]. Robitaille und Gauvin erreichen bei ihren Kompaktierungsversuchen Faservolumenanteile von 73% im ersten Belastungszyklus und 80% im dritten Belastungszyklus [14]. Abdalla et al. geben für Kohlenstofffaserrovings auf einer Spule einen Auslieferungsfaservolumengehalt von 31% und für Glasfaserrovings von 33% an [7].

2.3 Modelle für das Kompaktierungsverhalten

Bereits in den 1920er Jahren befassten sich einige Autoren mit der Kompressibilität von Wolle und stellten experimentelle Untersuchungen an Wollfasern an [15]. In den 1940er Jahren fasste van Wyk [16] die Resultate zusammen und beschrieb das von Mark 1925 veröffentlichte Modell mit der in Gleichung 2.5 beschriebenen Formel.

$$\left[\frac{v}{v_0} \right]^\gamma \cdot (p - p_0) = p_a \quad (2.5)$$

Dabei bezeichnet van Wyk v_0 als das Ausgangsvolumen, v als das durch den äußeren Druck p_a bewirkte Volumen, p_0 den vorhandenen Druck, der in den Wollfasern bei keinem äußeren Druck herrscht und p als den resultierenden Druck. p_0 stellt dabei ein Maß für die Nachgiebigkeit dar, der Exponent γ ein Maß für die Biegsamkeit. Van Wyk entwickelt das Modell von Mark weiter und geht dabei davon aus, dass nur ein Biegen der einzelnen Filamente stattfindet; Verdrehen, Abgleiten und Ausweitung der Faserbündel, welche in der Realität stattfinden, werden nicht berücksichtigt. Ein-

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

zelne Filamente werden dabei gemäß Balkentheorie als Träger mit angreifender Last behandelt. Die Fasern liegen dabei in zufälliger Orientierung in einem dreidimensionalen Netzwerk vor; die Deformation wird ausschließlich durch das Durchbiegen der Fasern zwischen den Kontaktpunkten zweier Fasern verursacht [17]. Van Wyk schätzt, dass in einem Gramm Wolle 107 Faser-zu-Faser-Kontaktpunkte vorliegen. Hätten alle Fasern einen einheitlichen Durchmesser und eine perfekte Orientierung, würde sich ein Faservolumenanteil von 90% ergeben [18]. Aufgrund von Verdrehungen und zufälligen Überkreuzungen zweier Fasern ergibt sich eine weniger effiziente Packung und daher ein größerer Faservolumenanteil unter Belastung [8]. Die Biegesteifigkeit des Modells resultiert aus dem durchschnittlichen Abstand zwischen den Kontaktpunkten und dem Volumen der Faseranordnung [17]. Die aufgebrachte Energie wird in Form von elastischer Biegeenergie der Fasern gespeichert [18]. Van Wyk's Betrachtung liefert für den Exponenten γ den Wert 3. Er zeigt weiters durch Versuche, dass die Wollfasern dem erstellten mathematischen Modell folgen und es einen Zusammenhang zwischen der äußeren Last und dem Faservolumenanteil gibt. Das Modell berücksichtigt keine zeitabhängigen Relaxationseffekte. Van Wyk stellt den Zusammenhang zwischen Druck p , Volumen der Fasermasse V , Masse m der Fasern, Elastizitätsmodul E der Fasern, Dichte ρ der Fasern, dem unkomprimierbaren Volumen der Fasern V' , einer Konstante K und dem intrinsischen Volumen (Volumen ohne Druckbeaufschlagung) in folgender Gleichung 2.6 dar [19]:

$$p = K \cdot E \cdot \frac{m^3}{\rho^3} \cdot \left[\frac{1}{(V - V')^3} - \frac{1}{(V_0 - V')^3} \right] \quad (2.6)$$

In weiterer Folge greifen viele Autoren das Modell von van Wyk auf und adaptieren es, meist auf Basis von experimentellen Untersuchungen an Fasern oder Textilien. Kelly et al. [18] stellten das Modell in der Form einer Exponentialfunktion dar:

$$\sigma = A \cdot V_f^n \quad (2.7)$$

Hier stellt σ die Spannung dar, V_f den Faservolumenanteil und n und A sind Materialparameter. Robitaille und Gauvin [17, 18] zeigten, dass der Exponent n bei durchgeführten Versuchen Werte zwischen 3 und 19 in Abhängigkeit der Architektur der untersuchten Materialien annimmt, verwenden aber ein Modell in der Form von:

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

$$V_f = A' \cdot p^B \quad (2.8)$$

V_f stellt den Faservolumenanteil dar, p den Verdichtungsdruck, A' ist dabei der Faservolumenanteil bei einem Kompaktierungsdruck von 1 Pa, B ist der Versteifungsindex mit $B < 1$. Die Gleichung lässt sich umformen zu:

$$p = V_f^{1/B} \cdot \left[\frac{1}{A'} \right]^{1/B} \quad (2.9)$$

Ein Koeffizientenvergleich ergibt:

$$n = \frac{1}{B} \text{ und } A = \left[\frac{1}{A'} \right]^{1/B} \quad (2.10)$$

Unter den untersuchten Materialien befand sich neben Glasmatten und Glasgeweben auch ein Glasfaserroving, für den bei einer Kompaktierungsgeschwindigkeit von 2 mm/min durchschnittliche Werte für $A' = 35,53 \cdot 10^{-2}$ und $B = 4,55 \cdot 10^{-2}$ für $v_{\text{fmax}} = 0,73$ gemessen wurden. Umgelegt auf das Modell mit den Materialparametern n und A aus der Formel 2.10 ergibt das $n = 22$ und $A = 7,3 \cdot 10^9$, wobei hier vermutlich aufgrund der Einheiten (Pascal – Megapascal) eher $A = 7,3 \cdot 10^3$ zutreffender wäre [17]. Bei einer weiteren Messung zeichnen Robitaille und Gauvin für A' Werte von 0,338 bis 0,369 für Faservolumenanteile von 73% bzw. 80% in einem zyklischen, dreistufigen Versuch [14] auf. Luo und Verpoest erhalten Werte für A' von 0,1 bis 0,3 und für B' Werte von 0,1 bis 0,2 für verschiedene Matten und Gewebe [20]. Saunders et. al. untersuchen nach derselben Methode wie Kelly Gewebe und Gelege und messen Werte für n von 9 bis nahezu 11 und für A Werte von 136 bis 433 MPa [21]. Pearce und Summerscales notieren für Gewebe und Gelege für n Werte von 7 bis 11 für mehrere Gewebelagen und 4,8 bis 5,8 bei nur einer Lage. Für A erhalten sie Werte von 8 bis 88 kPa bei mehreren Lagen und 1,8 bis 6,4 kPa bei nur einer Lage [13]. Toll erwähnt eine Reihe von Messwerten [22] für Glasfaserrovings mit den Werten für $n = 7$ bis 15,5 und für Kohlenstofffaserrovings mit dem Wert für $n = 14,5$ [23]. Saunders et al. geben für 5 bis 10 Lagen Gewebe für $n = 10$ und für A den Bereich von 0,13 bis 0,22 GPa an [21]. Für 20 Lagen nennen Saunders et al. bei einer Kompaktierungsgeschwindigkeit von 1 mm/min Werte von $A = 169,7$ MPa und $n = 10,48$ [10]. Jobaud et al. verwenden ein ähnliches Modell gemäß Gleichung 2.11

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

zur Beschreibung der Kompaktierung während des Vakuuminfusionsprozesses [24]. Weitere Modelle für die Kompaktierung während des Vakuuminfusionsprozesses sind jene von Gutowski et al. [25] laut Gleichung 2.12 und von Andersson et al. [26] laut Gleichung 2.13.

$$V_f = a \cdot \sigma^b \quad (2.11)$$

$$\sigma_f = A_s \cdot \left[\frac{\left(\frac{V_f}{V_{f0}} - 1\right)}{\left(\frac{1}{V_f} - \frac{1}{V_\alpha}\right)^4} \right] \quad (2.12)$$

$$\sigma_f = k \cdot E \cdot (V_f^m - (V_{f0} + \kappa)^m) \quad (2.13)$$

Bei Gutowski's Modell nach Gleichung 2.12 stellt σ_f den Kompaktierungsdruck dar, V_{f0} den Ausgangsfaservolumenanteil, V_α den maximal möglichen Faservolumenanteil und A_s eine Federkonstante. In Andersson's Modell nach Gleichung 2.13 ist E die Steifigkeit der Fasern, k und m Konstanten und κ ein Parameter für die Erweichung des verwendeten Gewebes durch die Imprägnierung (κ ist null für trockenes und größer Null für getränktes Gewebe). Die Parameter a und b in Jobaud's Modell nach Gleichung 2.11 sind experimentelle Parameter, abhängig vom verwendeten Gewebe [11].

Chen et al. verwenden ein nichtlineares Modell zur Beschreibung des Kompaktierungsverhaltens [27]. Sie unterteilen den Verlauf von der Dicke der untersuchten Probe über den Druck in zwei lineare und einen exponentiellen Teil dazwischen, wie in Abbildung 4 dargestellt ist. Im ersten linearen Bereich findet eine Kompaktierung hauptsächlich durch Abnahme der Porosität statt. Im zweiten linearen Bereich findet eine Kompaktierung aufgrund der bereits sehr geringen Porosität in nahezu gleichem Maße durch die weitere Abnahme der Porosität und der Komprimierung der festen Bestandteile (Faser) in der Probe statt. Der nichtlineare Bereich in der Mitte, bei dem ein Übergang vom Kompaktierungsmechanismus des ersten linearen Bereichs zum zweiten linearen Bereich stattfindet, wird durch ein Potenzgesetz ähnlich dem der bisherigen Modelle beschrieben. Auch hier können die Parameter nur durch experimentelle Untersuchungen ermittelt und bestätigt werden [27].

Ein Modell von Quinn und Randall [12] wird in folgender Form angegeben:

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

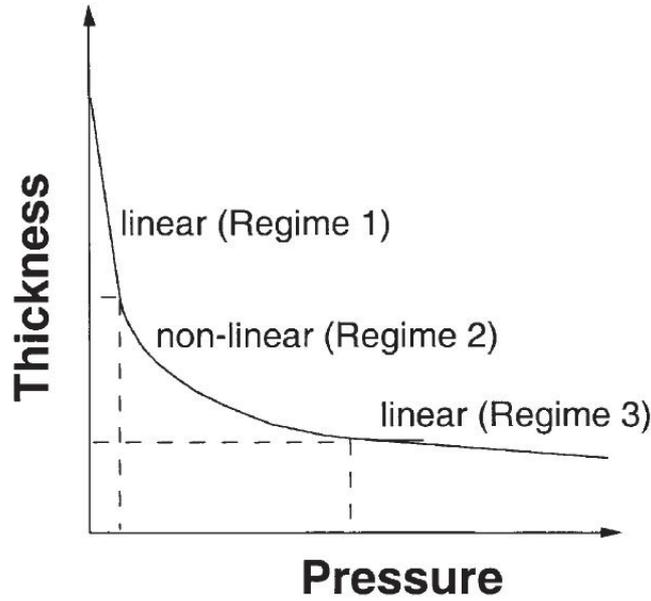


Abbildung 4: Modell von Chen et al. mit zwei linearen Randbereichen und einem nichtlinearen Bereich in der Mitte [27].

$$V_f = K_1 + K_2 + \sqrt{p} \quad (2.14)$$

Für den untersuchten Glasroving geben Quinn und Randall bei 157 kPa einen Faservolumenanteil von 62% an, für die Konstanten ergeben sich Werte von $K_1=32$ und $K_2=0,75$ (nicht zu verwechseln mit Permeabilitäten) [12]. Der Vollständigkeit halber seien hier auch noch die Modelle von Kim, McCarthy und Fanucci [22] (Gleichung 2.15), Chibani und Gauvin [28](Gleichung 2.16), Hou [29](Gleichung 2.17) und Lemenn und Gauvin [30] (Gleichung 2.18 und 2.19 angeführt:

$$V_f = V_1 + c \cdot \log\left(\frac{p}{p_1}\right) \quad (2.15)$$

$$\frac{p(t)}{p_0} = \sum_{z=1}^n \frac{p_0(z)}{p_i} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_z}} \quad (2.16)$$

$$V_f = \frac{10}{10 \cdot A_0 \cdot p_0 + A_1 \cdot \ln(p) + \frac{A_2}{10 \cdot p} + A_3} \quad (2.17)$$

$$p = \frac{k}{a} \cdot \frac{(h_0 - h)}{\left[1 - \left(\frac{h_0 - h}{h_0 - m \cdot R_f}\right)^n\right]} \quad (2.18)$$

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

$$\frac{p(t)}{p_0} = \frac{p_1}{p_0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{p_2}{p_0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \frac{E_3 \cdot \varepsilon_0}{p_0} \quad (2.19)$$

Die Formeln 2.16 und 2.19 beschreiben die Relaxationseffekte nach dem Kompaktierungsvorgang. Durch die in die Modelle integrierten experimentellen Parameter können diese Gleichungen für verschiedene Verstärkungsmaterialien und Prozesse adaptiert werden [14]. In der nachfolgenden Darstellung 5 ist die Prüfapparatur von Robitaille und Gauvin abgebildet, die in ähnlicher Art von vielen Autoren verwendet wurde. Das zu untersuchende Gewebe wird dabei zwischen zwei Platten eingelegt. Anschließend wird durch die Platten ein Druck auf das Gewebe ausgeübt und der Abstand zwischen den Platten an mehreren Stellen gemessen, um den Faservolumenanteil zu errechnen. Die so ermittelten Messwerte des Abstandes bei verschiedenen Drücken werden in Diagrammen „Kompaktierungsdruck über Abstand“, oder, wenn der Abstand in einen Faservolumenanteil umgerechnet wird, als „Kompaktierungsdruck über Faservolumenanteil“ dargestellt.

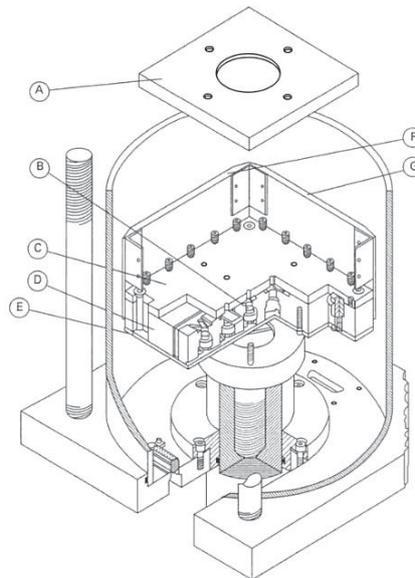


Abbildung 5: Prüfapparatur von Robitaille / Gauvin zur Bestimmung des Kompaktierungsverhalten von Geweben [17].

Abbildung 6 zeigt die so möglichen Messkurven und die damit verbundene Änderung des Abstandes h der beiden Platten. Bild a) zeigt Spannungsrelaxation bei konstant gehaltenem Abstand, Bild b) den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit und Bild c) die Hysterese im zyklischen Versuch [31].

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

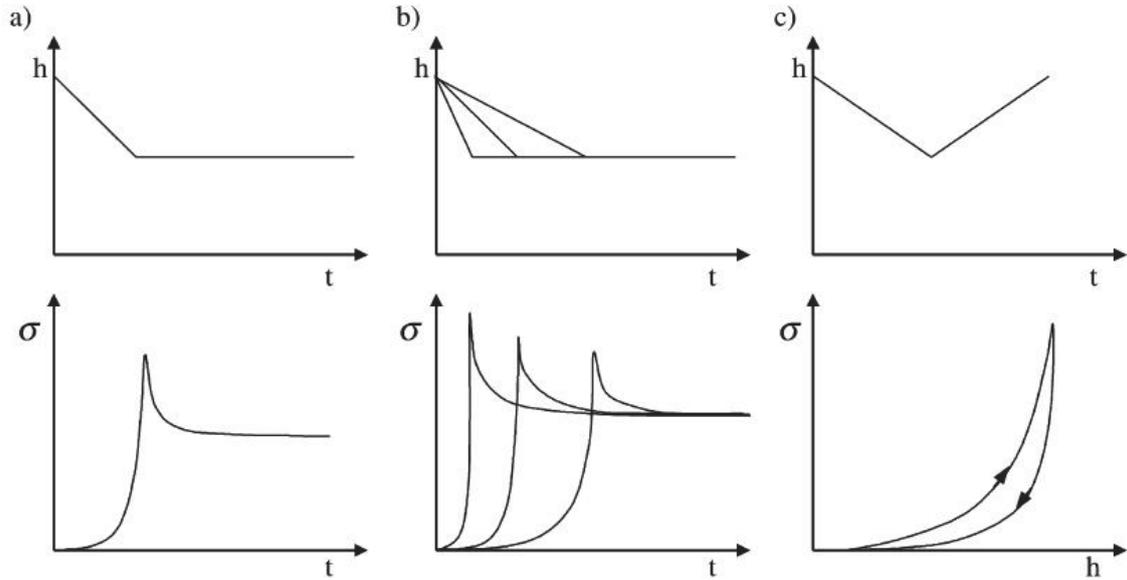


Abbildung 6: Mögliche Messkurven (unten) und Änderung des Abstandes h der Platte (oben) [31].

Robitaille und Gauvin [17] stellen eine Abhängigkeit des Kompaktierungsverhaltens von der Belastungsgeschwindigkeit fest und zeigen, dass die Garndrehung und die Art der Verflechtung der untersuchten Gewebe einen Einfluss auf den Faservolumenanteil haben. Wird die Belastungsgeschwindigkeit erhöht, so nimmt der Faservolumenanteil A' (bei 1 Pa) ab und der Versteifungsindex B' zu, wobei B' während der Kompaktierung konstant bleibt. Einen wesentlichen Einfluss auf das Ausgangsfaservolumen des untersuchten Materials hat die Anzahl der bereits durchlebten Belastungszyklen der Probe. Während bei der ersten Kompaktierung der Ausgangsfaservolumengehalt noch relativ niedrig ist, nimmt der Faservolumengehalt nach Beenden der Verdichtung und dem Entfernen bzw. Abheben der oberen Platte zu den nachfolgenden Versuchen nur wenig ab [17, 8, 19]. Somashekar et al. [32] halten daher fest, dass für jeden Versuch eine neue Probe verwendet werden muss. Die Untersuchung von Stankovic [19] zeigt, dass die Belastungskurven ungefähr ab dem fünften Zyklus identisch zum nächsten (sechsten) Zyklus verlaufen.

Kelly et al. [18] weisen darauf hin, dass sich das Kompaktierungsverhalten von durchtränkten Fasern und Geweben von dem von trockenen Fasern und Geweben unterscheidet. Während der Parameter A bei durchtränkten Fasern kleiner ist als bei trockenen Fasern, ist der Parameter n bei durchtränkten Fasern größer als

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

bei trockenen Fasern. Der Kompaktierungsdruck teilt sich in den Harzkompaktierungsdruck und den Faserkompaktierungsdruck auf. Sumerak [33] hat in einem Faserbündel während des Pultrusionsprozesses eine Spannung von 2,07 MPa bei einer Geschwindigkeit des Bündels von 1,5 cm/s gemessen, wobei es sich bei einem Teil des Druckes um den Harzdruck, hervorgerufen durch das Imprägnieren der Faser mit dem Harz, handelt. Nach dem Anhalten der Anlage wurde nach 60 Sekunden ein Druck von 69-138 kPa gemessen, was dem reinen Faserkompaktierungsdruck entspricht. Während der ersten 10 bis 20 Sekunden der Kompaktierung baut sich die Spannung um 25% bis 35% durch das viskoelastische Verhalten der Faserbündel ab [8], Trevino et. al. haben festgestellt, dass sich nach rund 60 Sekunden eine konstante Spannung während des Kompaktierungsversuches eingestellt hat [34].

Batch, Cumiskey und Macosko [8] verwenden ein Modell für die Vorhersage des Kompaktierungsverhaltens von verschiedenen Matten, Geweben und Rovings, das auf der Betrachtung einer Faser zwischen zwei Kontaktpunkten beruht. Dem Modell werden folgende Annahmen zugrundegelegt:

- a) Während der Kompaktierung erhöht sich die Anzahl der Faser-zu-Faser Kontaktpunkte allmählich, was zu einem zunehmenden Widerstand gegen weitere Kompaktierung führt.
- b) Die zeitabhängigen Effekte aufgrund von Reibung, Harzfluss (sofern vorhanden) und Faserbruch sind vernachlässigbar.
- c) Die Belastung erfolgt ausschließlich normal zur Faserrichtung; Knittern und Ausweitung der Fasern unter Druck sind vernachlässigbar.

Die nachfolgend beschriebene Betrachtung beruht auf den in Abbildung 2.3 dargestellten Situation. Der Faservolumenanteil bei unbelasteter Faser (Bild 1) ergibt sich zu:

$$V_0 = \frac{r}{\delta_{max} + r + e} \quad (2.20)$$

Hier stellt r den Faserradius, ρ_{max} den maximalen für Verformung der Faser zur Verfügung stehenden Abstand und e den unter sehr hoher Belastung verbleibenden Restabstand dar. Bei kleiner Belastung biegen sich die Fasern etwas nach unten und verringern die Zellenhöhe um den Wert δ (Bild 2).

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

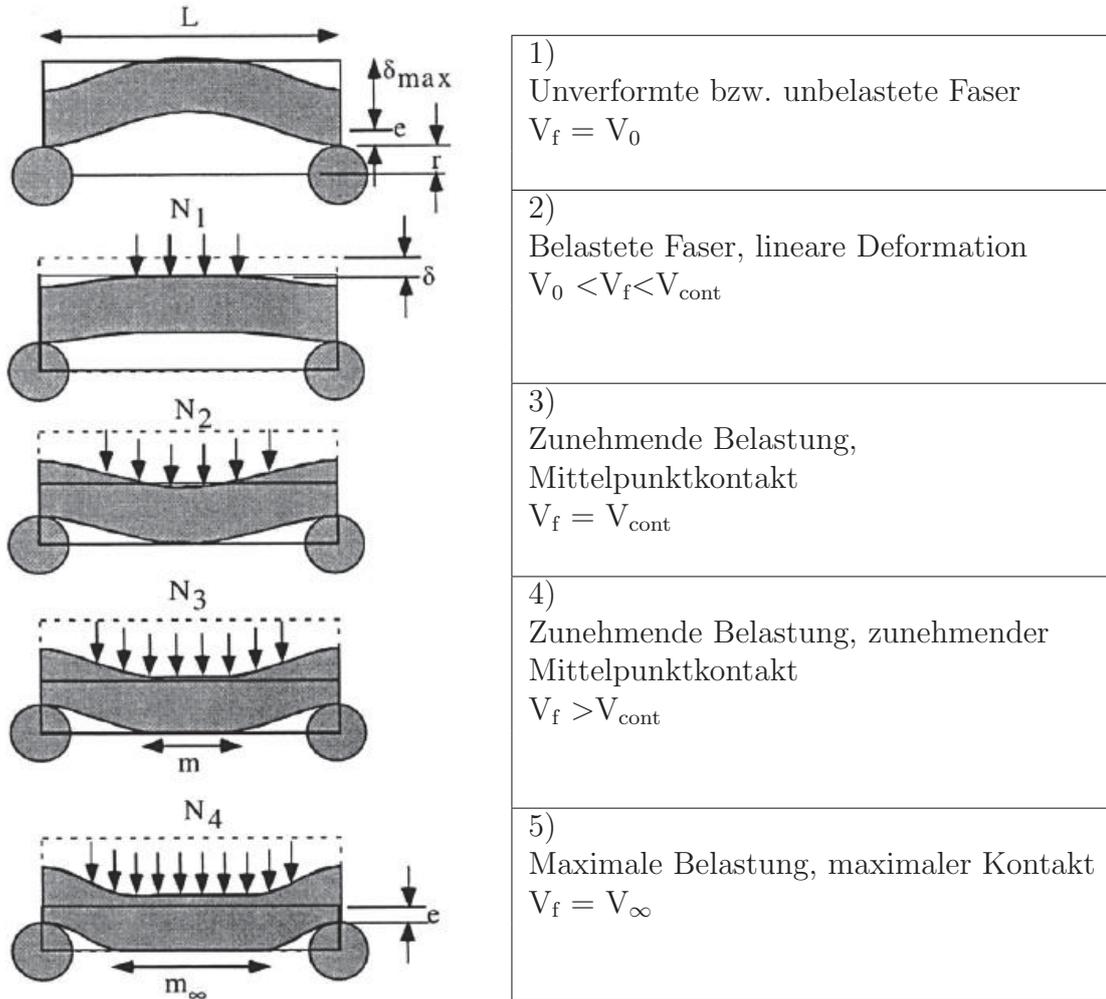


Abbildung 7: Kompaktierungsmodell von Batch, Cumiskey und Macosko [8]

$$V_0 = \frac{r}{\delta_{max} + r + e - \delta} \quad (2.21)$$

Bei zunehmender Belastung stellt sich ein Mittelpunktkontakt ein (Bild 3). Die weitere Kompaktierung wird schwieriger, weil sich die Faser nun in der Mitte abstützt. Bei zunehmender Belastung wird die Kontaktlinie größer (Bild 4) und erreicht schließlich die maximale Kontaktlinie m_∞ . Der maximale Faservolumenanteil wird mit $\rho = \rho_{max}$ zu:

$$V_0 = \frac{r}{r + e} \quad (2.22)$$

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

Eine weitere Kompaktierung ist ohne Faserbruch nicht möglich. Für das Modell wird nun ein zylindrischer Balken mit der Länge L und einer in der Mitte angreifenden Last F verwendet:

$$F = N \cdot A = \frac{E \cdot I}{\alpha \cdot L^3} \cdot \delta \quad (2.23)$$

E ist hier der Elastizitätsmodul der Fasern, I das Flächenträgheitsmoment des Faserquerschnittes ($I = \pi \cdot r^4/4$) und α eine Konstante ($\alpha = 5/384$ aus Randbedingungen beim Lösen der Differentialgleichung). Die effektive Fläche der Faser ist:

$$A = \frac{2 \cdot r \cdot L}{V_f} \quad (2.24)$$

Eingesetzt in Gleichung 2.23 und umgeformt auf N ergibt das:

$$N = \frac{47 \cdot \pi \cdot r^4 \cdot E \cdot V_f \cdot \delta}{5 \cdot L^4 \cdot r} \quad (2.25)$$

Der Verdichtungsdruck ist proportional δ/r . Das Verhältnis von δ/r kann über den Ausgangsfaservolumenanteil und den momentanen Faservolumenanteil dargestellt werden:

$$\frac{\delta}{r} = \frac{1}{V_0} - \frac{1}{V - f} \quad (2.26)$$

Für den Bereich $V_f < V_{\text{cont}}$ wird ein lineares Verhalten vorhergesagt und eine Federkonstante K eingeführt:

$$N = K \cdot (V_f - V_0) \quad (2.27)$$

Aus dem Zusammenhang von Formel 2.25 und 2.27 ergibt sich für die Federkonstante für $V_f < V_{\text{cont}}$:

$$K = K_0 = \frac{48 \cdot \pi \cdot E}{5 \cdot \left(\frac{L}{r}\right)^4 \cdot V_0} \quad (2.28)$$

Wenn die Faser den Fall 3 mit Mittelpunktkontakt erreicht hat, nimmt die Kontaktlänge m bei weiter steigender Belastung zu, um den Druck über eine größere

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

Stützfläche zu verteilen. Dadurch wird eine weitere Kompaktierung schwieriger, die Federkonstante nimmt zu. Dies kann durch die empirische Gleichung 2.29 beschrieben werden:

$$K = \frac{K_0}{1 - \frac{m}{m_\infty}} \quad (2.29)$$

Mit der Abhängigkeit vom Verhältnis m/m_∞ gegenüber dem Faservolumenanteil kann die Federkonstante für beide Fälle in Abhängigkeit des Faservolumenanteils dargestellt werden [8]:

$$\frac{m}{m_\infty} = \frac{\frac{1}{V_{cont}} - \frac{1}{V_f}}{\frac{1}{V_{cont}} - \frac{1}{V_\infty}} \quad (2.30)$$

2.4 Modelle für das viskoelastische Verhalten

Robitaille und Gauvin [17] verwenden ein weiteres Modell nach Gleichung 2.31, um Relaxationseffekte als Funktion der Zeit beschreiben zu können, wobei sie die Versuche mit trockenen und mit von destilliertem Wasser durchtränkten Geweben bei Raumtemperatur durchgeführt haben:

$$\frac{p}{p_0} = 1 - C \cdot t^{\frac{1}{D}} \quad (2.31)$$

In der Gleichung 2.31 stellt p den Druck zur Zeit t dar, p_0 den ursprünglich aufgebrauchten Druck; C ist der Druckabfall nach einer Sekunde und D ist der Relaxationskoeffizient. Carnaby und Pan berücksichtigen in ihrem Modell auch die Reibung zwischen den Fasern und zeigten, dass die Proben den viel beobachteten Hysteresekurven folgten. Bei diesem Modell handelt es sich um ein micromechanisches Modell, bei dem Faserdurchmesser, Fasersteifigkeit und der Reibungskoeffizient zwischen den Fasern berücksichtigt werden [35].

Das viskoelastische Verhalten von Faserbündeln während bzw. nach dem Kompaktieren kann mit Kombinationen von Federn und Dämpfern charakterisiert werden. Kelly verwendet eine Parallelschaltung von nicht-linearen Maxwell-Modellen (Feder und Dämpfer in Serie), die mit jeweils charakteristischer Relaxationszeit t_R beschrie-

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

die Federdehnung, η die Viskosität des Dämpfungsfluids, und $d\varepsilon_d/dt$ die Dehnrade dar. In einem Maxwellmodell ergibt sich die resultierende Dehnung sowie die resultierende Dehnrade durch die Summe der Dehnungen bzw. Dehnraten der Feder und des Dämpfers:

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_d \quad (2.35)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_s}{dt} + \frac{d\varepsilon_d}{dt} \quad (2.36)$$

Durch Differenzieren und Einsetzen in die erste Gleichung erhält man:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \cdot \sigma \quad (2.37)$$

Bei konstanter Belastung ist die Dehnrade $d\varepsilon_d/dt$ null:

$$\frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} = -\frac{1}{\eta} \cdot \sigma \quad (2.38)$$

Durch Umformen, Integrieren und weiteres Umformen kommt man zum folgenden Ausdruck:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{E}{\eta} \cdot dt \quad (2.39)$$

$$\ln(\sigma) = \left[-\frac{E \cdot t}{\eta} \right] + C \quad (2.40)$$

$$\sigma = e^{[(-\frac{E \cdot t}{\eta}) + C]} = e^{(-\frac{E \cdot t}{\eta})} \cdot e^C \quad (2.41)$$

Da zum Zeitpunkt $t=0s$ $\sigma=\sigma_{\max}$ ist, gilt $e^C=\sigma_{\max}$ und man erhält:

$$\sigma_t = \sigma_{\max} \cdot e^{(-\frac{E \cdot t}{\eta})} \quad (2.42)$$

Für das Verhältnis der Viskosität η zum Elastizitätsmodul E wird die Relaxationszeitkonstante τ eingeführt:

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

$$\sigma_t = \sigma_{max} \cdot e\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.43)$$

Für die Kombination zweier Maxwellmodelle und einer Feder in paralleler Anordnung ergibt sich durch Addition der einzelnen Ausdrücke das Gesamtmodell:

$$\sigma_t = \sigma_0 + \sigma_1 \cdot e\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + \sigma_2 \cdot e\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (2.44)$$

Je nach Anforderung kann das Modell durch weitere Maxwellelemente erweitert werden. Saunders et al. [10] verwenden ein einziges Maxwellelement zur Beschreibung der Relaxation und zeigen, dass die Relaxationszeit mit der Anzahl der Zyklen zunimmt. Beim ersten Kompaktierungsvorgang lagern sich die einzelnen Fasern in kurzer Zeit um. Beim nachfolgenden Versuch ist weniger freier Platz zum Umlagern verfügbar, das Faservolumen ist nahe dem Packungslimit, daher dauern die Umlagerungsvorgänge länger. Bei sehr hohen Faservolumenanteilen findet bei weiterer Kompression ein elastisches Biegen der Fasern statt. Durch den elastischen Beitrag an der Verformung nimmt die Relaxationszeit zu. Eine kurze Relaxationszeit deutet auf viskoses Verhalten hin, eine lange Relaxationszeit auf das elastische Verhalten der Feder im Maxwellmodell. Imprägnierte Fasern zeigen eine kürzere Relaxationszeit, da trockene Fasern zu höheren Faservolumenanteilen komprimiert werden können.

2.5 Modelle zur Beschreibung mittels Masterkurve

Kelly [35] entwickelt das Feder-Dämpfer Modell weiter und zeigt, dass das Kompaktierungsverhalten vieler Fasern bzw. Textilien bei verschiedenen Belastungsraten in Form einer Masterkurve „Spannung über Dehnung“ oder „Spannung über Zeit“ durch Normalisierung dargestellt werden kann. Werden die ermittelten Spannungen zweier unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeiten (Dehngeschwindigkeiten) bezogen auf eine Referenzbelastungsgeschwindigkeit bzw. eine Referenzdehnung, erhält man den von der Dehnrage unabhängigen Ausdruck:

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = f_\alpha(\dot{\varepsilon}) \cdot f_\beta(\varepsilon) \quad (2.45)$$

$$\frac{\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}_1)}{\sigma(\varepsilon_{ref}, \dot{\varepsilon}_1)} = \frac{\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}_2)}{\sigma(\varepsilon_{ref}, \dot{\varepsilon}_2)} = \frac{f_\beta(\varepsilon)}{f_\beta(\varepsilon_{ref})} \quad (2.46)$$

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 9 gezeigt. Im linken Bild ist die Spannungs – Dehnungskurve für verschiedene Dehnraten dargestellt, im rechten Bild die normalisierte Masterkurve. Zur Beschreibung der Spannung verwendet Kelly den Faservolumenanteil und für die Dehnrate die Kompaktierungsgeschwindigkeit.

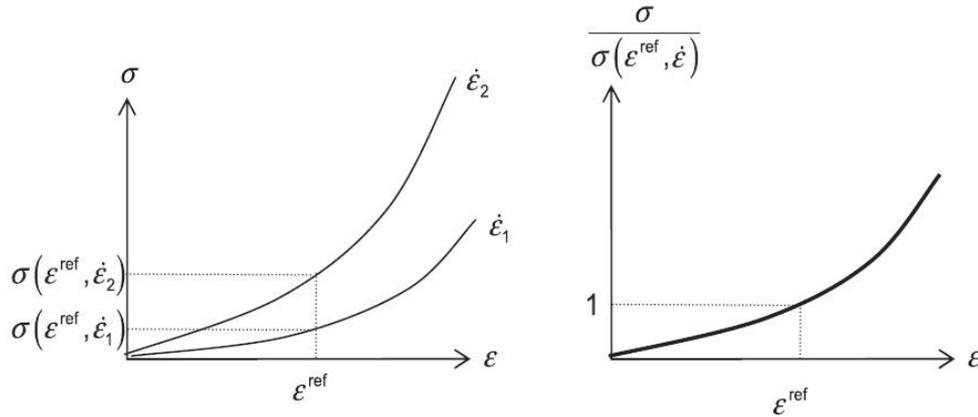


Abbildung 9: Spannungs-Dehnungskurve mit verschiedenen Dehnraten und Masterkurve [35].

2.6 Geometrie der Faserbündel

Aufgrund von Umlagerungen der einzelnen Fasern während des Herstellungsprozesses, Kontakt mit anderen Fasern oder Faserbündeln sowie der Kompaktierung durch den Verarbeitungsprozess weisen Faserbündel nach der Verarbeitung rechteckige, elliptische, oder linsenförmige Querschnittsformen auf [4]. Wong et al. [37] haben ein Modell zur Beschreibung des Faserquerschnittes entwickelt:

$$y = \pm \frac{h}{2} \cdot \left[1 - \frac{x^2}{\left(\frac{w}{2}\right)^2} \right]^n \quad (2.47)$$

Die Variablen x und y stehen hier für die Punktkoordinaten der Begrenzungskurve des Faserquerschnittes, h ist die Faserbündelhöhe (maximale Ausdehnung der Faser in y -Richtung) und w die Faserbündelbreite (maximale Ausdehnung des Faserbündels in x -Richtung). Der Exponent n beschreibt hier die Form des Querschnittes, Sonderfälle sind $n = 0,5$ elliptisch, $n = 0$ rechteckig und $n = 1$ linsenförmig. Endruweit, Gommer und Long [5] haben Schlifffbilder von mit Epoxidharz imprägnierten

2 Literatur zum Kompaktierungsverhalten von Faserbündeln

Faserbündeln mit Matlab[®] ausgewertet und den Faservolumenanteil bei verschiedenen Kompaktierungsdrücken sowie den Faserquerschnitt berechnet. Sie konnten zeigen, dass die meisten Faserbündel bei niedrigen Kompaktierungsdrücken eher elliptisch und bei höheren Kompaktierungsdrücken eher rechteckig vorlagen. Um das Kompaktierungsverhalten zu beschreiben, verwendeten sie das Modell in Form von Gleichung 2.48:

$$\sigma_0 = 0,33 \cdot A_m^{-0,27} \quad (2.48)$$

A_m bezeichnet die errechnete Faserquerschnittsfläche und σ_0 den Kompaktierungsdruck. Da der Faservolumenanteil über die reine Querschnittsfläche der Fasern in einer direkten Beziehung zur Faserquerschnittsfläche A_m steht, ist dieses Modell ähnlich wie das von van Wyk [16] oder Kelly [18].

3 Experimentelles

3.1 Prüfaufbau und verwendete Geräte

Zur Bestimmung des Faservolumenanteiles verschiedener Fasertypen unter unterschiedlichen axialen Spannungen wurde ein Lichtschnittsensor des Types VCNano-3D y1237.5-IP der Firma Vision Components verwendet. Die Lichtschnittkamera hat eine Abtastrate von bis zu 400 MHz und emittiert Laserlicht mit einer Wellenlänge von 635 nm mit einer Leistung von 5 mW. Das Messprinzip beruht dabei auf einer Laserdiode, die in einem definierten Winkel zu einer Kamera angebracht ist. Die Laserdiode projiziert einen linienförmigen Lichtstreifen auf das zu untersuchende Objekt. Durch den definierten Winkel zwischen Kamera und Laserdiode kann mittels Triangulation ein Höhenprofil des untersuchten Objektes errechnet und in Form von Punktkoordinaten abgespeichert werden. In Abbildung 10 ist schematisch die Funktionsweise der Lichtschnitttechnik dargestellt.

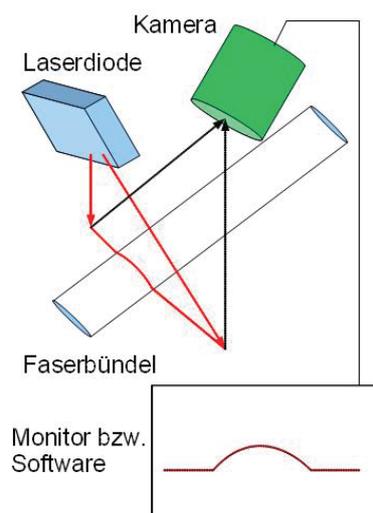


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Lichtschnitttechnik

3 Experimentelles

Die Kamera mit eingebauter Laserdiode wurde auf einem Prüfstand mit Aufspannvorrichtung für die Rovingspule montiert. Der Roving wurde dabei durch zwei Fadenaugen sowie um mehrere Umlenkrollen und eine Umlenkgeometrie, die als Messhintergrund fungierte, geführt. In Abbildung 11 ist der Aufbau des Prüfstandes schematisch dargestellt. Die Umlenkgeometrie besitzt dabei die Form eines halben Zylinders mit einem Durchmesser von 20 cm und einer Breite von 10 cm. Entlang des Umfanges ist mittig eine 4 cm breite und 1,5 cm tiefe Nut mit Radien eingelassen. In dieser Nut liegt das Faserbündel während des Messvorganges. Die Spule mit dem Roving wird pneumatisch geklemmt, um ein Abwickeln des Rovings bei axialer Zugbeanspruchung zu verhindern. Um axiale Spannung aufzubringen, wurde am rechten Ende des Faserbündels ein Kunststoffbecher befestigt, in den verschiedene Gewichte eingelegt wurden.

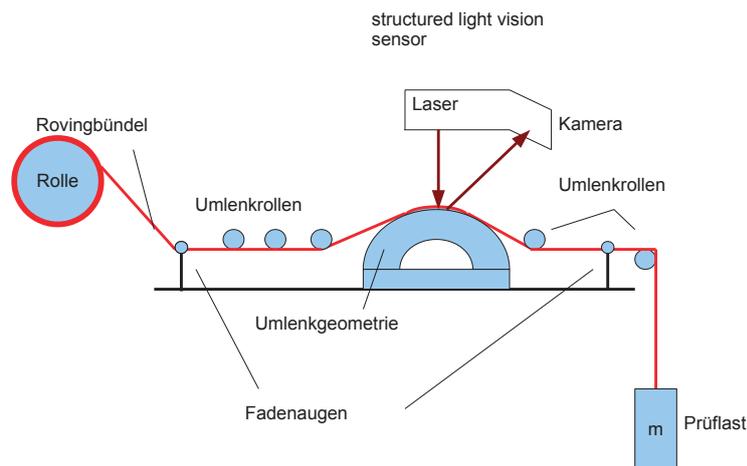


Abbildung 11: Schematischer Aufbau des Prüfstandes

Das Messfenster der Kamera weist eine Trapezform auf. Um die maximale Genauigkeit zufolge der gegebenen Auflösung zu erzielen, wurde die Kamera so positioniert, dass sich das Faserbündel im oberen Bereich des trapezförmigen Messfensters befindet. Abbildung 12 zeigt das trapezförmige Messfenster der Kamera.

Der Mittelpunkt des trapezförmigen Messfensters liegt 90 mm unterhalb des Kameragehäuses. Berücksichtigt man die Höhe des Messfensters von ± 35 mm vom Mittelpunkt, ergibt sich ein Abstand von 55 mm zwischen dem Kameragehäuse und dem

3 Experimentelles

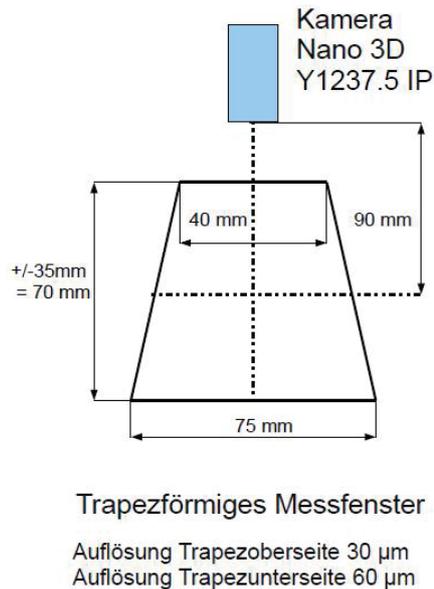


Abbildung 12: Trapezförmiges Messfenster der Kamera

oberen Rand des Messfensters. Damit die Kamera das Faserbündel fokussieren kann, muss der Abstand zwischen der Kamera und dem Faserbündel bzw. der Kamera und der Nut der Umlenkgeometrie (in dieser befindet sich das Faserbündel während des Messvorganges) etwas mehr als 55 mm betragen. Da sich die Bildpunkte der Kamera mit einer Auflösung von 1280 Pixel bzw. 6,784 mm in x-Richtung (Breite des Faserbündels) und 1024 Pixel bzw. 5,427 mm in y-Richtung (Höhe des Faserbündels) durch die Trapezform des Messfensters mit einer Breite von oben 40 mm aufteilen, wird im oberen Bereich des Messfensters eine Auflösung von 30 μm erzielt, während im unteren Bereich durch die Breite von 70 mm eine Auflösung von nur 60 μm erreicht wird. Aus diesem Grund wurde versucht, die Kamera so zu positionieren, dass der Abstand zwischen der Kamera und der Nut der Umlenkgeometrie ca. 60 mm betrug. Erste Experimente mit der Kamera haben gezeigt, dass der Laserstrahl bei manchen Materialien als Hintergrundreferenz (Umlenkgeometrie aus weißem POM) nicht vollständig reflektiert wird, sondern teilweise in das Material eindringt und im Material gestreut wird, was zu einer breiten, verschwommenen Laserlinie und nicht brauchbaren Messergebnissen führt. Verschiedenste Materialien (Papier, verschiedene Folien, Klebebänder, etc.) mit unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten (Rauigkeit) und Farben wurden hinsichtlich deren Eignung als Hintergrundmaterial der Nut der Umlenkgeometrie getestet. Die besten Eigenschaften (scharfe Laserkon-

3 Experimentelles

tur, geringes Rauschen des Messsignals) konnten mit einer schwarzen LDPE Folie erreicht werden. Aus diesem Grund wurde die Nut der Umlenkgeometrie mit dieser Folie beklebt. Sinnvolle Ergebnisse können nur aufgezeichnet werden, wenn das Faserbündel direkt auf der Umlenkgeometrie liegt – d.h. es ist immer eine gewisse axiale Belastung notwendig. Mittels der zum Kamerasystem gehörenden Software können sowohl Bilder als Messdaten in Form von Punktkoordinaten am angeschlossenen PC angezeigt als auch für die spätere Weiterverarbeitung abgespeichert werden. Eine Erklärung aller in der Software vorhandenen Parameter würde den Rahmen dieses Kapitels sprengen, daher werden hier nur kurz die Bedienung und die wichtigsten Parameter zur Bedienung der Software erklärt. Das zu untersuchende Faserbündel wird durch Nut der Umlenkgeometrie, um die Umlenkrollen und durch die Fadenaugen geführt und an einem Ende am Prüfstand befestigt. Alternativ zur Befestigung kann auch mittels Pneumatik die Spule, auf der sich der Roving befindet, fixiert werden. Am anderen Ende des Rovings wird ein Kunststoffbecher mit der Prüflast befestigt. Im nächsten Schritt muss die Stromversorgung für den Prüfstand (Hauptschalter ein) und den angeschlossenen PC hergestellt sowie am PC die Software „VC3D“ gestartet werden. In der oberen Leiste der Software befindet sich ein Button „Connect“ zur Herstellung der Verbindung zwischen dem PC und der Kamera. Um eine Messung durchführen zu können, müssen die Parameter für Shutter (Belichtungszeit) und Gain (Verstärkung) eingestellt werden. Im nächsten Schritt kann durch Klicken auf den „Fotokamera“-Button in der Menüleiste eine Aufnahme gemacht werden, wie die nachfolgende Abbildung 13 zeigt.

Die weißen, strichlierten Linien wurden im Nachhinein zur besseren Abgrenzung der Faser gegenüber der Hintergrundlinie der Nut in der Umlenkgeometrie eingefügt. Seitlich an den Rändern des Bildes erkennt man an der Krümmung der Referenzlinie den Beginn des Radius der Nut. Anzumerken ist hier, dass das Bild in der Software auf dem Kopf steht, wodurch der Radius der Nut nach unten gekrümmt ist. Um die Messgenauigkeit der Kamera auf den wesentlichen Bereich des Faserbündels zu fokussieren, wird nun in der Software der Bildausschnitt mittels 4 Parametern beschnitten. Die Werte für „Start Point x“ und „Start Point y“ stellen jeweils den Ausgangspunkt des zuvor erwähnten Darstellungsbereiches von 1280 x 1024 Pixel dar. In x-Richtung muss der Anfangspunkt der Faser durch Ausprobieren iteriert werden, in y-Richtung erweist sich aufgrund der Positionierung der Umlenkgeometrie mit Faser ein Wert von 900 als guter Ausgangswert. Der Parameter „Width dx“

3 Experimentelles

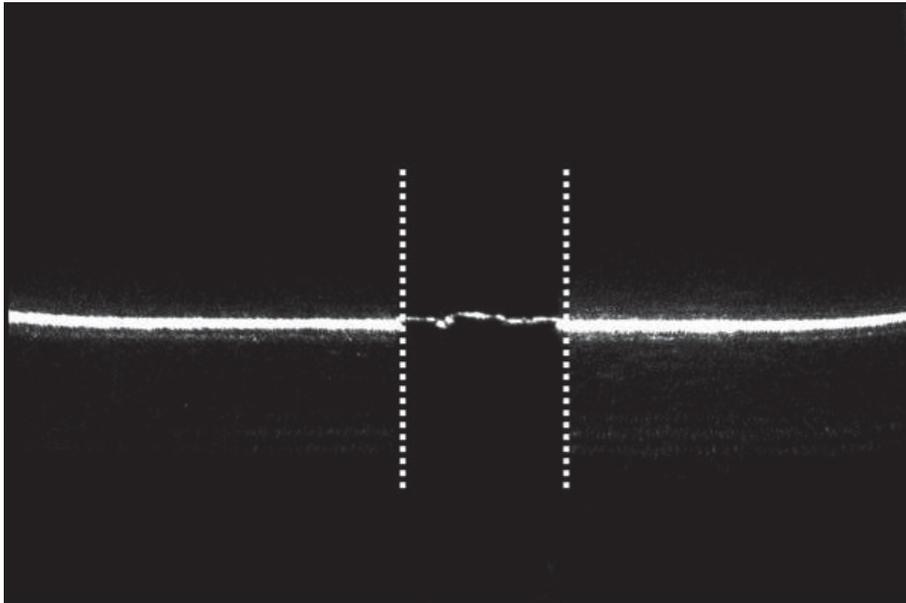


Abbildung 13: Um 180° gedrehte Aufnahme eines Faserbündels mittels Lichtschnitttechnik

beschreibt die Breite des Bildausschnittes – meist in der Größenordnung von 300 bis 500, der Parameter „Height dy“ die Höhe des Bildausschnittes – hier reicht ein Wert von 100. Durch erneutes Klicken auf den „Fotokamera“-Button wird das beschnittene Bild dargestellt, wie Abbildung 14 zeigt. Zwischen den beiden strichlierten Linien befindet sich das zu untersuchende Faserbündel.

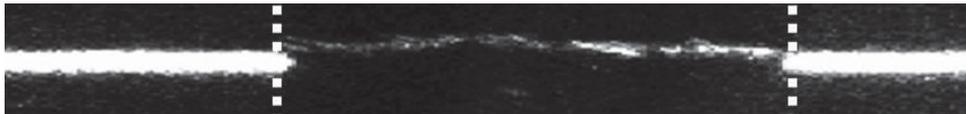


Abbildung 14: Um 180° gedrehter beschnittener Bildausschnitt mit Faserbündel

Um nun ein Profil in Form von Punkten zu erhalten, muss in der Software der Parameter „Display mode“ von „Sensor Image“ auf „Profile“ umgestellt werden und die Registerkarte „2D-Profil“ gewählt werden. Durch erneutes Klicken auf den „Fotokamera“-Button wird nun das gemessene Profil ausgegeben, wie in Abbildung 15 gezeigt ist.

Wichtig für die spätere Weiterverarbeitung der Messdaten ist, dass sich an beiden Seiten des Rovings ausreichend (ca. 20 bis 30) Punkte der Hintergrundreferenz befinden. Dies ist notwendig, um später mittels Matlab[®] die Verschiebung in y-

3 Experimentelles

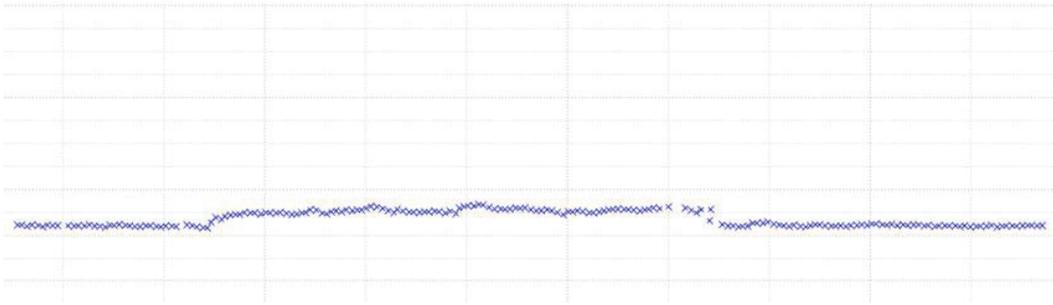


Abbildung 15: 2D-Profil eines Kohlenstofffaserrovings

Richtung zur Nulllinie, die Drehung (um eine horizontale Referenzlinie zu erhalten) durchzuführen und den Anfang und das Ende des Faserbündels automatisiert zu ermitteln und damit den Querschnitt zu errechnen. Um das Profil in Punktform abzuspeichern, muss zuerst die Anzahl der zu speichernden Profile mittels Parameter „no of frames captured“ eingestellt werden. Ein Wert von -1 bedeutet eine kontinuierliche Messung und das Abspeichern der Profile im Umfang von ca. 3 bis 5 Bildern je Sekunde (je nach Größe des Ausschnittes) bis der im Parameter „Max no of profiles saved“ angegebene Wert erreicht wird. Will man nur ein Profil abspeichern, muss man den Wert 5 eingeben, für 2 Bilder den Wert 10 usw. In einer Textdatei werden die Profile in folgender Form gespeichert:

```
.....  
21.080; 0; 39.162;  
21.105; 0; 39.168;  
21.128; 0; 39.195;  
21.183; 0; 39.157;  
21.209; 0; 39.142;  
21.232; 0; 39.179;  
21.257; 0; 39.186;  
.....
```

Die erste Spalte stellt dabei die x-Koordinate eines Punktes in mm dar, die dritte Spalte die y-Koordinate in mm. Die zweite Spalte bezeichnet eine Laufnummer für das jeweilige Profil (wenn der Parameter „no of frames captured“ auf -1 oder z.B. 10 gesetzt wurde) – hier stellt 0 das erste aufgezeichnete Profil dar. Durch die Laufnummer können später mittels Matlab[®] aus einer Messdatei einzelne Profile voneinander separiert werden.

3.2 Kompaktierungsmodell

In der nachfolgenden Abbildung 16 ist die Situation am Prüfstand mit den Abständen y_1 , y_2 , x_1 , x_2 und d dargestellt. Tabelle 3 zeigt die geometrischen Abstände, r_{Rolle} bezeichnet den Radius der Umlenkrollen. Mit Hilfe der Abstände und von Winkelfunktionen kann die Kompaktierungskraft, wie in Abbildung 17 und den nachfolgenden Formeln dargestellt ist, errechnet werden. F_G stellt die im Faserbündel wirkende Gewichtskraft, hervorgerufen durch die Masse m , dar. F_K bezeichnet die Kompaktierungskraft, bestehend aus den Komponenten F_{K1} und F_{K2} .

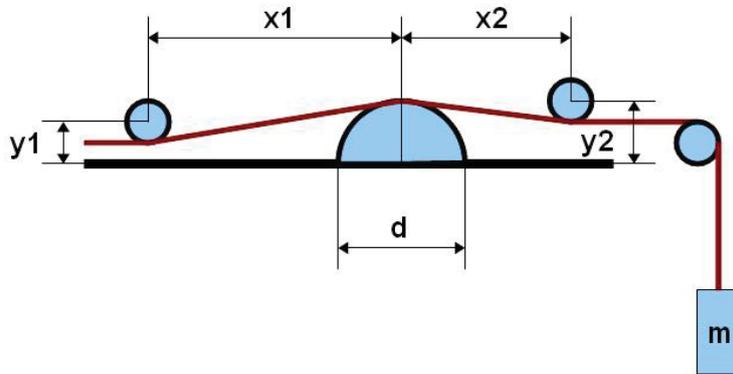


Abbildung 16: Situation am Prüfstand mit den geometrischen Abmessungen

Bezeichnung	x_1	x_2	y_1	y_2	d	r_{Rolle}
Abstand [cm]	50	40	7	7	20	2,5

Tabelle 3: Werte der geometrischen Abmessungen

Es gelten die nachfolgenden geometrischen Beziehungen:

$$\tan\alpha = \frac{d/2 - y_1 + r_{\text{Rolle}}}{x_1} \quad (3.1)$$

$$\alpha = 6,28^\circ \quad (3.2)$$

$$\tan\beta = \frac{d/2 - y_2 + r_{\text{Rolle}}}{x_2} \quad (3.3)$$

$$\beta = 7,83^\circ \quad (3.4)$$

$$F_{K1} = F_G \cdot \sin(\alpha) \quad (3.5)$$

3 Experimentelles

$$F_{K2} = F_G \cdot \sin(\beta) \quad (3.6)$$

$$F_K = F_{K1} + F_{K2} \quad (3.7)$$

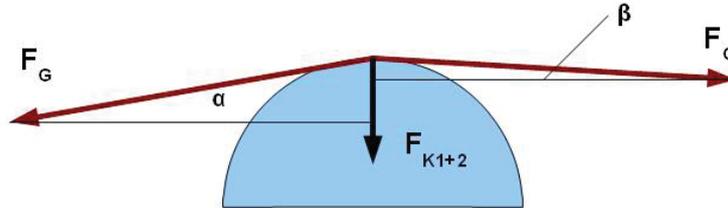


Abbildung 17: Kräfte an der Umlenkgeometrie

Für die Kompaktierungskraft ergeben sich durch diese Zusammenhänge in Abhängigkeit der Masse m folgende in Tabelle 4 dargestellten Werte:

m [g]	100	300	500	700	900	1100
F_K [N]	0,24	0,72	1,20	1,68	2,17	2,65

Tabelle 4: Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft

Durch die Kompaktierungskraft tendieren alle Fasern des Bündels dazu, so nahe wie möglich an die Umlenkgeometrie zu wandern. Das Faserbündel reduziert dadurch seine Höhe und wächst in die Breite, wie Abbildung 18 zeigt.



Abbildung 18: Veränderung der Geometrie des Faserbündels bei Belastung

Da die einzelnen Filamente im Faserbündel in der Realität nicht vollständig parallel angeordnet sind, sondern teilweise wellig bzw. verschlauft vorliegen, berühren sich die Faserbündel nur punktwise. Durch die zunehmende Belastung kommt es zur partiellen Streckung der Faserbündel (Entwellung), wodurch eine geringe axiale Bewegung stattfindet. Dieser Bewegung wirkt an den Berührungspunkten der Faserbündel eine Reibkraft entgegen. Um einen weiteren Abbau der Welligkeit zu ermöglichen und den Faservolumenanteil durch Nachrücken der Faserbündel in Richtung der Umlenkgeometrie zu ermöglichen, muss diese Reibkraft überwunden werden. In Abbildung 19 ist diese Situation schematisch dargestellt.

3 Experimentelles

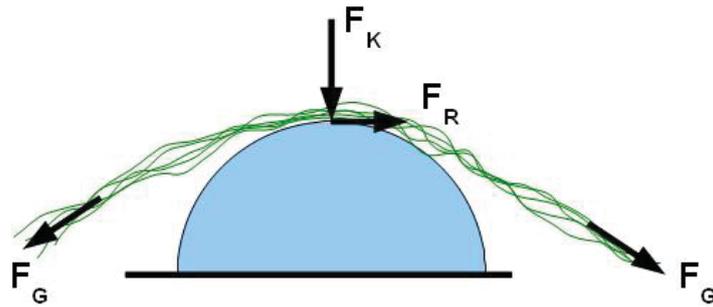


Abbildung 19: Behinderung der Entwelling der Faserbündel durch Reibung

Mit zunehmender Filamentanzahl des Faserbündels nimmt die Anzahl der Punkte, an denen sich die einzelnen Filamente berühren, zu. Dadurch wächst die zu überwindende Reibungskraft, das heißt das Kompaktierungsverhalten ändert sich mit der Anzahl der Filamente. Die Umlagerungs- und Abgleitvorgänge sind auch von der Oberflächenbeschaffenheit der Filamente, d.h. der Schlichte, abhängig, da diese den Reibkoeffizienten beeinflusst.

3.3 Auswertung der Messergebnisse

Ein wesentlicher Teil der vorliegenden Arbeit bestand aus der Entwicklung einer Routine in Matlab[®] zur automatischen Auswertung der generierten Messdaten. Für die Auswertung der Messdaten wurden zwei Matlab[®]-Programme verfasst. Das Programm „splitter.m“ wird verwendet, wenn mehrere Profile in eine Datei geschrieben wurden (Parameter „no of frames captured“ hat den Wert -1 oder größer/gleich 10). Im Anhang ist der Quellcode zum Programm „splitter.m“ mit Kommentarzeilen abgedruckt. In der nachfolgenden Tabelle 5 ist erklärt, was in den jeweiligen Programmzeilen passiert. Das Programm liest jede Datei im Verzeichnis „input/“, sucht in dieser Datei jede Zeile ab und erkennt, welche Zeilen zu einem Profil gehören. Jedes Profil wird im Ordner „output/“ für die spätere Auswertung abgespeichert.

Zeilen	Beschreibung
1-7	Programminformation, Löschen des Speichers.
9-11	Definition des Quellordners der Messdatei(en) und des Zielordners. Diese Verzeichnisse können gegebenenfalls angepasst werden.
14-17	Alle Dateien im Inputordner lesen und eine Liste mit den Namen der Dateien erstellen, Anzahl der vorhandenen Dateien ermitteln.
19	Beginn der 1. for Schleife: Diese wird für jede Datei im Inputordner durchlaufen.
20-22	Verzeichnispfad zusammensetzen und die n-te Datei öffnen.
24-25	Hilfsvariablen deklarieren: number ist hier die Laufvariable für das x-te Profil in der n-ten Messdatei.
26	Anzahl der Zeilen in der n-ten Datei feststellen.
28-37	Beginn der 2. for Schleife: Hier werden in der n-ten Messdatei alle Zeilen überprüft, ob sie zum x-ten Profil gehören. Ist dies der Fall, wird die entsprechende Zeile in die Matrix K geschrieben.
38-45	Wenn alle Punkte eines Profiles extrahiert wurden, wird die Laufvariable erhöht, ein Speicherverzeichnis zusammengesetzt und die Matrix K abgespeichert.
46-48	Werte zurücksetzen für den nächsten Durchlauf.
50	Ende der 2. for Schleife (x-tes Profil in der n-ten Datei).
51	Ende der 1. for Schleife (n-te Datei im Verzeichnis).

Tabelle 5: Beschreibung zu splitter.m

Nach dem Durchlauf von „splitter.m“ liegen die Messwerte der einzelnen Profile in Form einzelner Dateien im Outputverzeichnis vor. Im nächsten Schritt werden von all diesen extrahierten Profilen mit „auswertung.m“ folgende Operationen ausgeführt:

3 Experimentelles

- Extremwerte bzw. Störungen ausserhalb des Messbereiches wegfiltern
- Drehen der gesamten Messkurve, so dass diese horizontal liegt
- Absenken der gesamten Messkurve, so dass diese bei $y = 0$ beginnt
- Ausgabe und Abspeichern der Messkurve zur visuellen Kontrolle
- Automatische Detektion des Beginns und des Endes des Faserbündels
- Extraktion der Punkte des Faserbündels, Verschieben zu $x = 0$, Ausgabe und Abspeichern der extrahierten Punkte (nur Faserbündel) für visuelle Kontrolle, sowie Abspeichern der extrahierten Punkte in Koordinatenform für spätere Verwendung (z.B. zur Untersuchung der Form von Faserbündeln)
- Spaltenweises Aufsummieren der Fläche zwischen zwei Punkten
- Abspeichern der Fläche des jeweiligen Profiles in einer *.txt Datei
- Erzeugen einer Matrix mit allen Profilbezeichnungen und errechnetem Querschnitt mit abschließendem Export in Excel zur weiteren Verwendung der Daten

Der Quellcode zu „auswertung.m“ befindet sich ebenfalls im Anhang und ist dort auskommentiert. In der nachfolgenden Tabelle 6 sind die einzelnen Zeilen kurz erklärt. Wichtig für die Benutzung bzw. die individuelle Anpassung sind die Zeilen 7 bis 10, die die Verzeichnisstruktur enthalten, sowie die Zeilen 17 bis 24, die wichtige Parameter für die Behandlung der Messwerte darstellen.

Für die Adaptierung und Benutzung dieses Auswerteschemas ist eine genaue Beschreibung der in den Zeilen 16 bis 26 deklarierten Variablen notwendig. Die Variable „n“ bezeichnet die Anzahl der von beiden Enden aus betrachteten, verwendeten Punkte zur Ermittlung der Neigung der Messkurve. Die Messkurve wird gedreht, um eine horizontale Messkurve zu erhalten. Der Wert „m“ ist Analog zu „n“ zu verstehen und wird zur Ermittlung des durchschnittlichen y-Wertes für die Absenkung der Messdaten zur Nulllinie herangezogen. Für beide Parameter ist ein Wert von 10 gut geeignet. Die Parameter „grenze oben“ und „grenze unten“ beschränken das Messfenster in y-Richtung. Alle Punkte außerhalb dieses Fensters werden automatisch als Störung interpretiert und gelöscht. Vor allem bei dynamischen Versuchen kommt es häufig zu Ablösungen einzelner Filamente aus dem Bündel, die dann im Laserstrahl Störpunkte erzeugen können. In der verwendeten Höhenposition der

3 Experimentelles

Zeilen	Beschreibung
1-7	Programminformation, Löschen des Speichers.
8-15	Definition der Speicherverzeichnisse, diese können bei Bedarf angepasst werden.
16-26	Definition der Variablen.
27-34	Zeitmessung starten, Anzahl der Dateien im Input-Verzeichnis feststellen.
35	Start 1. for – Schleife.
37-51	Einlesen der i-ten Datei, Löschen nicht benötigter Spalten, Störungen wegfiltern .
52-88	Messkurve horizontal drehen und zu $y = 0$ verschieben.
89-162	Anfang und Ende des Faserbündels suchen und ausschneiden.
163-190	Messdaten als Diagramm ausgeben.
191-204	Flächeninhalt unter Kurve streifenweise aufsummieren.
205-219	Diagramm und errechneten Flächeninhalt abspeichern.
220-237	Beschnittene Messdaten (=Faserbündel) als Diagramm ausgeben und abspeichern.
238-254	Speichersname zusammensetzen, Flächeninhalt, Breite, Höhe, Name in Matrix schreiben, Ausgabe der errechneten Fläche, Ausgabe der Rechenzeit.
254	Ende der 1. for - Schleife.
255-263	Abspeichern als Excel – Datei für die spätere Weiterverarbeitung der Daten.

Tabelle 6: Beschreibung zu auswertung.m

Kamera haben sich Werte von 39 für “grenze unten“ bzw. 42 für “grenze oben“ als sinnvoll erwiesen. Wird die Position der Kamera zur Umlenkgeometrie verändert, müssen diese Grenzen auch sinngemäß angepasst werden. Für die Ermittlung des Anfangs und Endes des Faserbündels wird wie folgt vorgegangen: Der durchschnittliche y-Wert der ersten „r“ Punkte wird ermittelt. Zu diesem durchschnittlichen Wert wird der Wert von „threshold“ addiert. Dieser Wert wird im nachfolgenden als Schwelle bezeichnet. Anschließend sucht das Auswerteprogramm von den beiden Enden beginnend den ersten Punkt der Messwerte, der einen größeren y-Wert als die Schwelle aufweist und ermittelt die Position dieses Punktes. Für den Anfang der Faser untersucht die Software nun die nächsten „s“ Punkte links vom gefundenen Punkt und überprüft, ob dessen y-Wert kleiner ist als der vorhergehende. Hat der nächste Punkt einen y-Wert der nicht kleiner als der y-Wert des zuletzt untersuchten Punktes aufweist, wird der Beginn des Faserbündels in den zuletzt untersuchten

3 Experimentelles

Punkt gelegt. Gleiches passiert auf der anderen Seite des Faserbündels zum Finden des Endes des Bündels, hier wird die Variable „t“ verwendet. Gutes Verhalten hat sich gezeigt für Werte von „s“ = 6, „t“ = 6, „r“ = 10 und „threshold“ = 0,06. Für die Adaptierung empfiehlt sich, zuerst nur den Wert von „threshold“ an das vorliegende Faserbündel bzw. dessen Höhe anzupassen. In der nachfolgenden Abbildung 20 ist das so erhaltene extrahierte Messprofil dargestellt.

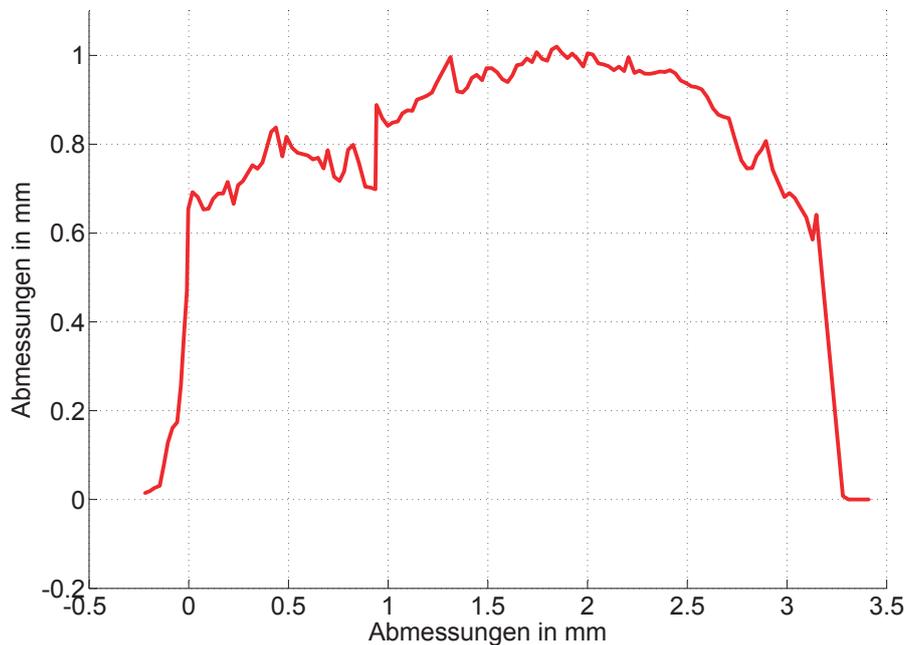


Abbildung 20: Extrahiertes Faserprofil

3.4 Ermittlung des Faservolumenanteiles

Mittels der entwickelten Software konnten so im Laufe dieser Arbeit mehrere Tausende Profile ausgewertet und deren Flächeninhalt errechnet werden. Um aus dem errechneten Flächeninhalt einen Faservolumenanteil zu ermitteln, muss die Summe der Fläche der einzelnen Fasern als Bezugsreferenz für einen Faservolumenanteil von 100% verwendet werden. Als Beispiel sei hier ein Kohlenstofffaserroving mit einer Feinheit von 800 tex, 12 k Filamenten und einem Filamentdurchmesser von 7

3 Experimentelles

um herangezogen. A bezeichnet hier die Querschnittsfläche eines Filaments, A_n die Querschnittsfläche von n -Filemanten, wie in den Gleichungen 3.8 und 3.9 gezeigt wird.

$$A = d^2 \cdot \pi \cdot 1/4 = (7 \cdot 10^{-6} \cdot m)^2 \cdot \pi \cdot 1/4 = 3,85 \cdot 10^{11} \cdot m^2 \quad (3.8)$$

$$A_n = n * A = 12.000 \cdot 3,85 \cdot 10^{11} \cdot m^2 = 0,4618mm^2 \quad (3.9)$$

Für Glasfasern gestaltet sich diese Rechnung etwas schwieriger, da hier die Anzahl der Filamente oft unbekannt ist. Liefert nun die Auswertung für eine untersuchte Kohlenstofffaser des oben genannten Typs einen Wert von $0,8672 \text{ mm}^2$ für den Querschnitt, ergibt das einen Faservolumenanteil ϕ nach Gleichung 3.10 von:

$$\Phi = 0,4618 \cdot mm^2 / 0,8672 \cdot mm^2 = 0,53 = 53\% \quad (3.10)$$

Der so ermittelte reine Faserquerschnitt A_n wurde auch als lasttragender Querschnitt zur Errechnung der durchschnittlichen Spannung σ in dem Faserbündel gemäß Gleichungen 3.11 und 3.12 für die statischen Versuche herangezogen. F stellt die Gewichtskraft, m die Masse und g die Erdbeschleunigung dar.

$$\sigma = F/A_n \quad (3.11)$$

$$F = m \cdot g \quad (3.12)$$

Mit diesen Gleichungen können Diagramme mit durchschnittlicher Spannung über Faservolumenanteil erstellt werden, wie Abbildung 21 zeigt. Durch die Ausgabe zweier Profile mit verschiedenen Belastungen ist die Kompaktierung des Faserbündels gut erkennbar.

3 Experimentelles

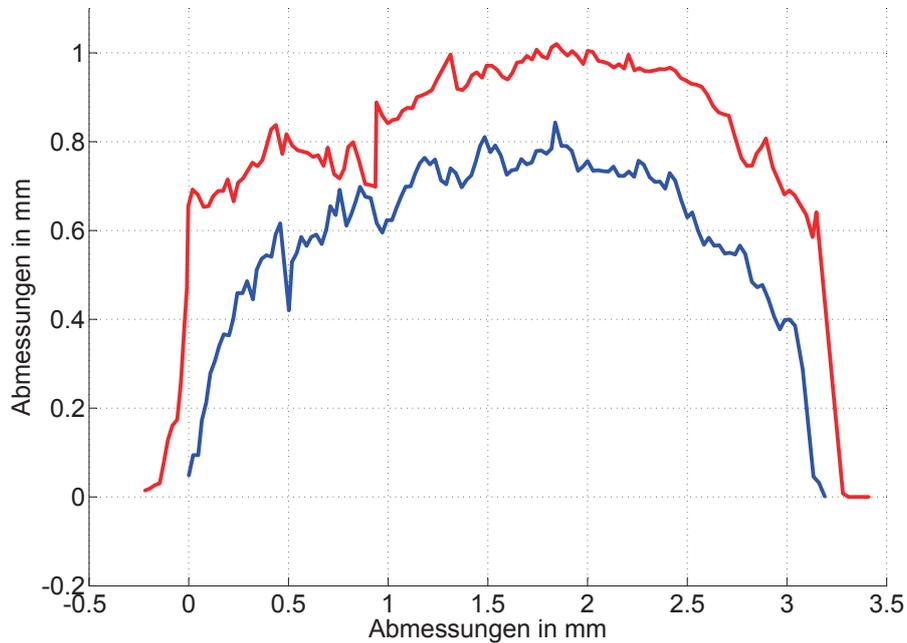


Abbildung 21: Faserquerschnitt bei 100 g Belastung (rot) und 1100 g (blau) eines 1600 tex Kohlenstofffaserrovings

3.5 Untersuchte Fasertypen

Ursprünglich war im Umfang dieser Arbeit geplant, zwei Glasfaserrovings und zwei Kohlenstofffaserrovings zu untersuchen. Da sich herausstellte, dass Glasfasern aufgrund deren Transparenz mit dem Lichtschnittverfahren nur bedingt untersucht werden können, wurden zwei weitere Kohlenstofffaserrovings untersucht. In den nachfolgenden Tabellen 7, 8 und 9 sind die Fasern beschrieben.

Nach der in Kapitel „3.3 Ermittlung des Faservolumenanteiles“ erklärten Methode wurde der reine Faserquerschnitt der Faserbündel (entspricht 100% Faservolumenanteil) ermittelt, wie Tabelle 10 zeigt.

3 Experimentelles

Kohlenstofffaserroving Toho Tenax[®]			
Markenname	Tenax [®]	Tenax [®]	Tenax [®]
Produktionsstandort	E	E	E
Faserfamilie	HTS40	HTS40	HTS45
Präparationseigenschaften	F13*	F13*	E23**
Filamentanzahl	12 k	24 k	12 k
Garnfeinheit [tex]	800	1600	800
Garndrehung [t/m]	0/10 Z	0/5 Z	0
Laufänge je kg [m/kg]	1250	625	1250
Spulengewicht, netto [kg]	2 / 4 / 6	2 / 4 / 6 / 8	2 / 4 / 6
Zugeigenschaften			
Zugfestigkeit [MPa]	4300	4300	4500
Zug-E-Modul [Gpa]	240	240	240
Eigenschaften			
Filamentdurchmesser [μm]	7		
Dichte [g/cm^3]	1,77		
Bruchdehnung [%]	1,8		
Spez. Wärmekapazität [J/kgK]	710		
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	10		
Wärmeausdehnungskoeff. [$10^{-6}/\text{K}$]	-0,1		
Spez. el. Widerstand [Ωcm]	$1,6 \cdot 10^{-3}$		

Tabelle 7: Daten der untersuchten Kohlenstofffaserbündel, Quelle: Datenblatt Toho Tenax[®]

*F13: 1% Präparationsauftrag auf Basis Polyurethan

**E23: 1,3% Präparationsauftrag auf Basis Epoxidharz

Kohlenstofffaserroving Sigrafil[®] C30 50k	
Fasertyp	Sigrafil C30 Standardmodul
Anzahl der Filamente	50 k
Garnfeinheit [tex]	3300
Dichte [g/cm^3]	1,8
Durchmesser [μm]	7
Schlichte	Epoxid
Schlichtegrad [%]	1
Zugfestigkeit [GPa]	4,0
E-Modul [GPa]	240
Bruchdehnung [%]	1,7

Tabelle 8: Daten der untersuchten Kohlenstofffaserbündel, Quelle: Datenblatt Sigrafil[®]

3 Experimentelles

Glasfaserroving OCV[®] Reinforcements P185 P185-1200-EC14 bzw. P185-2400-EC14	
Garndrehung [t/m]	0
Einsatzzweck	Wickeltechnik, Pultrusion
Schlichte	Geeignet für Polyester-, Vinylester-, Epoxidharze
Garnfeinheit [tex]	1200 bzw. 2400
Glührückstand [%]	0,6
Feuchtigkeit [%]	Max. 0,20
Fasertyp	EC: E-Glas, kontinuierliches Filament
Filamentdurchmesser [µm]	14

Tabelle 9: Daten der untersuchten Glasfasern, Quelle: Datenblatt OCV[®] Reinforcements

Faserbündel	Reiner Faserquerschnitt [mm²]
Kohlenstofffaser Tenax [®] E-HTS 40 F13 12 k	0,4618
Kohlenstofffaser Tenax [®] E-HTS 40 F13 24 k	0,9236
Kohlenstofffaser Tenax [®] E-HTS 45 E23 12 k	0,4618
Kohlenstofffaser Sigrafil [®] C30 50 k	1,9242
Glasfaser P185-1200-EC14	0,5080*
Glasfaser P185-2400-EC14	1,0160*

Tabelle 10: Querschnittsflächen der untersuchten Faserbündel

* unter der Annahme von 3300 bzw. 6600 Filamenten (Daten nicht genau bekannt)

4 Untersuchung von Belichtungszeit und Verstärkung

4.1 Belichtungszeit und Verstärkung für Kohlenstofffasern

Um mittels Lichtschnitttechnik die bestmöglichen Ergebnisse hinsichtlich Meßgenauigkeit und Datenerfassung zu erreichen, wurde vor Beginn der statischen Messungen eine Vielzahl an Einstellungen getestet. Die zwei wichtigsten Parameter für die genaue Erfassung eines Faserprofils stellen dabei die Werte für die Belichtungszeit (in der Software mit shutter bezeichnet) und Verstärkung (in der Software mit gain bezeichnet) dar. Diese Werte sind abhängig von dem Material bzw. der Farbe des untersuchten Faserbündels sowie vom Hintergrund auf dem das Faserbündel während der Aufnahme liegt. Es hat sich gezeigt, dass Kohlenstofffasern am besten auf einem schwarzen Hintergrund - im vorliegenden Fall eine schwarze LDPE-Folie - vermessen werden können. Zudem wurde der Messbereich mit schwarzer LDPE-Folie abgedunkelt um gleichbleibende Lichtverhältnisse während des Tagesverlaufs zu gewährleisten. Für die Parameter Shutter und Gain wurden für Kohlenstofffasern 100 Kombinationen mit den Bereichen von $500 \mu s$ bis $50.000 \mu s$ für die Belichtungszeit (shutter) und 0 bis 2.000 für die Verstärkung (gain) untersucht. In der nachfolgenden Tabelle 4.1 sind jene Kombinationen aufgelistet, die zu brauchbaren Messergebnissen führten, wobei die besten Ergebnisse in weiterer Folge mit Shutter = $50.000 \mu s$ und Gain = 0 erzielt wurden.

Beide Parameter beeinflussen das Messergebnis. Sind die Parameter zu groß gewählt, werden viele Störungen, d.h. Messpunkte an Stellen, an denen sich keine Fasern befinden, aufgenommen. Ausserdem kommt es am Anfang und am Ende des Fa-

4 Untersuchung von Belichtungszeit und Verstärkung

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Gain [-]	200	400	0	100	200	400	0	50	100
Shutter [μs]	1000	1000	4000	4000	4000	4000	8000	8000	8000
Nr.	10	11	12	13	14				
Gain [-]	200	50	0	50	0				
Shutter [μs]	8000	16000	30000	30000	50000				

Tabelle 11: Kombinationen der Parameter Shutter und Gain

serbündels zu einer Kraterbildung, d.h. die Messpunkte werden unter die Null-Linie gesetzt. Die nachfolgende Abbildung 22 zeigt Störpunkte im markierten Bereich, die Abbildung 23 Kraterbildung am Faserende. Wird die Verstärkung bei geringer Belichtungszeit zu gering gewählt (oder umgekehrt), ist die Messkurve lückenhaft, wie Abbildung 24 zeigt. Im Extremfall fehlen so viele Messpunkte, dass der Verlauf der Oberflächenkontur zwischen den vorhandenen Punkten nur mehr errahnt werden kann.

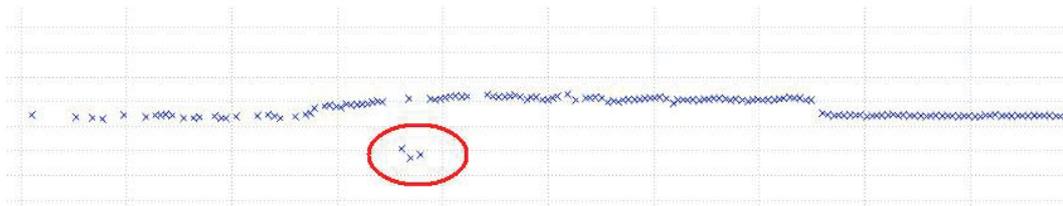


Abbildung 22: Störpunkte im Messprofil durch schlecht gewählte Messparameter

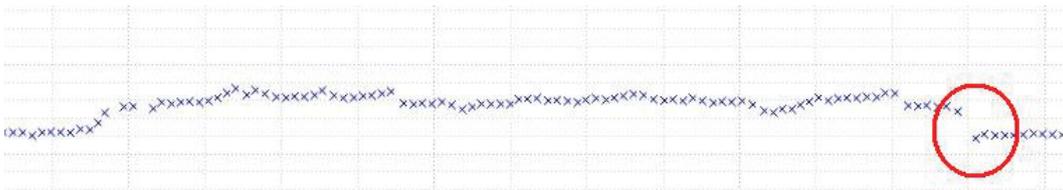


Abbildung 23: Kraterbildung am Ende des Faserbündels durch schlecht gewählte Messparameter

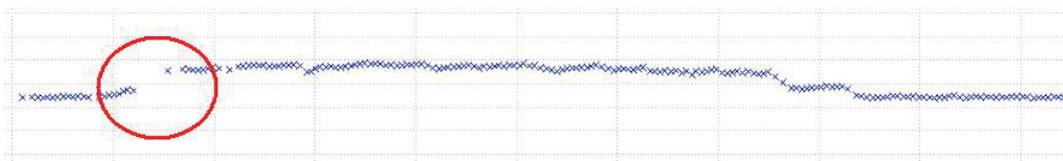


Abbildung 24: Fehlende Messpunkte durch schlecht gewählte Messparameter

4.2 Belichtungszeit und Verstärkung für Glasfasern

Wie sich gezeigt hat, lassen sich transparente bzw. nicht eingefärbte Glasfasern mittels Lichtschnitttechnik schlecht bis gar nicht vermessen. Ein Teil des Laserstrahls wird an der Oberfläche des Faserbündels reflektiert, was auch für die Messung gewünscht wird. Jedoch dringen auch Teile des Laserstrahls in das Bündel ein und werden dann im Bündel reflektiert oder gestreut, so dass mittels Lichtschnittkamera nicht mehr genau festgestellt werden kann, wo sich die Kontur des Faserbündels abzeichnet. Um die besten Messparameter für Shutter (Belichtungszeit) und Gain (Verstärkung) zu finden, wurde an der Glasfaser P185-2400-EC14 von OCV ReinforcementsTM mit 2400 tex Feinheit je eine Messreihe mit 300 g Belastung und mit 1100 g Belastung bei verschiedenen Parameterkombinationen durchgeführt. Dabei wurden für die Belichtungszeit Werte von 300 bis 500 μs und für die Verstärkung Werte von 90 bis 1000 untersucht. Die besten Messergebnisse wurden bei den Werten Shutter = 700 μs und Gain = 90 gefunden. Insgesamt wurden 2 x 34 Parameterkombinationen untersucht. Während eine Änderung der Parameter bei der Untersuchung von Kohlenstofffasern zu einem lückenhaften Profil, Störungen oder Kraterbildung führt, wie die Abbildungen 22, 23 und 24 zeigen, führt bei transparenten Glasfasern die Veränderung der Parameter zu verschobenen Messkurven, wie die Abbildung 25 für Shutter = 700 μs und verschiedene Werte für Gain und die Abbildung 26 für Gain = 90 und verschiedene Werte für Shutter zeigen. In Abbildung 26 ist die in cyan dargestellte Kurve jene der Parameter Gain = 90 und Shutter = 700 μs , in Abbildung 25 ist es die grüne Kurve.

4 Untersuchung von Belichtungszeit und Verstärkung

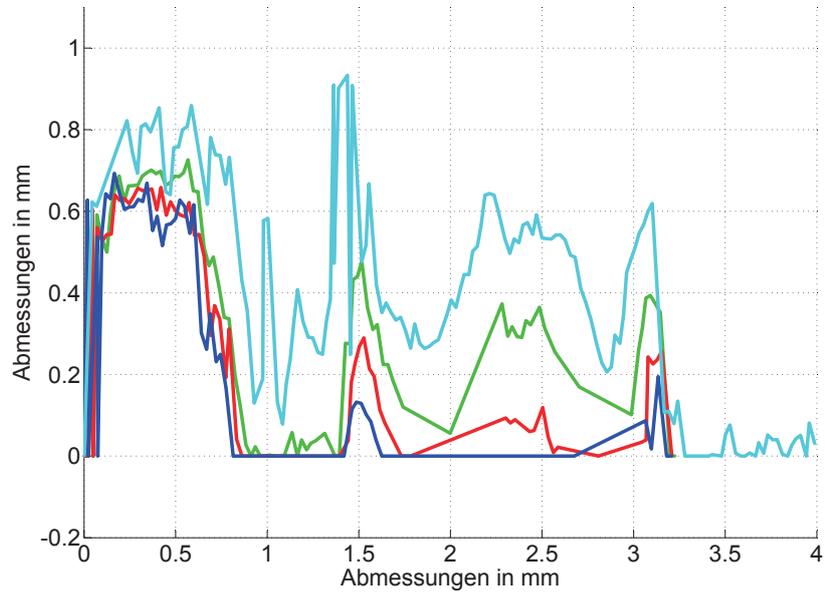


Abbildung 25: Glasfaser 2400 tex: Shutter = $700 \mu\text{s}$ und verschiedene Werte für Gain

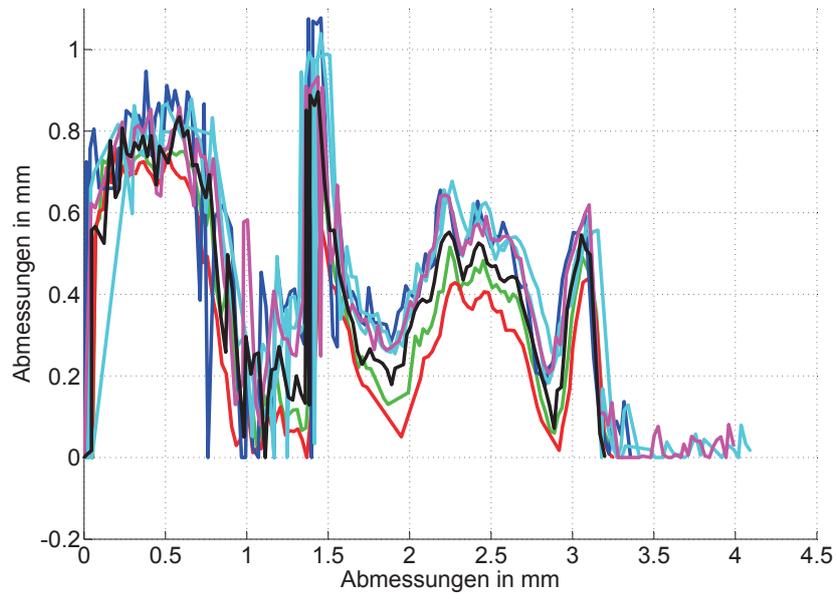


Abbildung 26: Glasfaser 2400 tex: Gain = 90 und verschiedene Werte für Shutter

5 Statische Messungen

5.1 Darstellung der Messgenauigkeit

Um die Funktionalität des Messsystems zu testen und die Messgenauigkeit zu untersuchen, wurde eine 2 Euro-Centmünze mit dem Lichtschnittkamarasystem vermessen. Die Münze weist eine maximale Dicke am Rand von 1,67 mm auf. Die gemessene Dicke beträgt 1,72 mm bzw. 1,68 mm, die Abweichung also zwischen 5/100 und 1/100 mm. Die Breite der Münze kann hier nicht als Vergleichswert herangezogen werden, da nicht sichergestellt ist, dass die Laserlinie der Kamera durch den Mittelpunkt der Münze geht - der Laserstrahl teilt die Münze nicht in zwei gleich große Teile. Abbildung 27 zeigt das Messergebnis einer 2-Euro-Centmünze, die mittels Lichtschnittkamarasystem und Auswertungssoftware untersucht wurde.

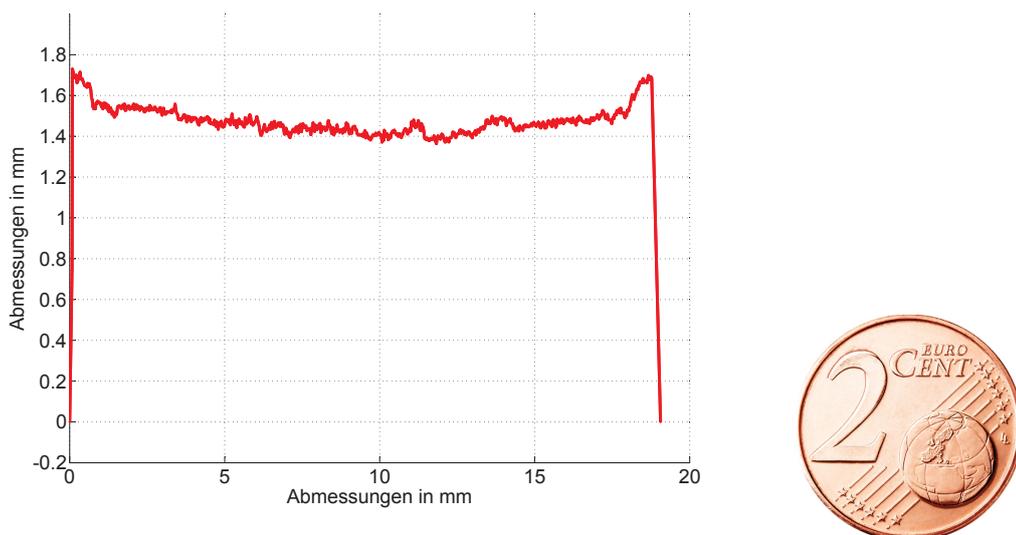


Abbildung 27: Messergebniss der 2-Euro-Centmünze

5.2 Bestimmung des Zeitfensters

Da die untersuchten Kohlenstofffasern viskoelastisches Verhalten zeigen, ist das Kompaktierungsverhalten zeitabhängig. Um einen nahezu konstanten, endgültigen Querschnitt des untersuchten Faserbündels nach der Belastung zu erhalten, wurden für verschiedene Belastungen Faserbündel kontinuierlich von der Beaufschlagung mit Last mittels Lichtschnittkammersystem vermessen und so die Änderung des Querschnittes über die Zeit ermittelt. Je nach Größe der Belastung und Vorgeschichte des Faserbündels kommt es im Laufe der Zeit zu einer leichten Zunahme des Querschnittes (Entspannung des Faserbündels) oder zu einer weiteren Kompaktierung des Faserbündels. Bei geringen Lasten tritt der erste Fall ein.

Da die axiale Spannung während des Aufwickelns größer war als die axiale Belastung im Versuch, nimmt der Faserquerschnitt im Laufe des Beobachtungszeitraums zu. Ist die Spannung hingegen größer (ab ca. 300 g) als die in der Vorgeschichte der Faser durch die Produktion und das Aufwickeln eingebrachte Spannung, wird das Faserbündel im Laufe der Zeit weiter komprimiert. Die Versuche haben gezeigt, dass nach einer Zeit von etwa 5 Minuten keine wesentlichen Querschnittsänderungen statt finden, daher wurde für die nachfolgenden Versuche immer 5 Minuten nach der Belastung des Faserbündels gewartet, bis die Messungen durchgeführt wurden. Das nachfolgende Diagramm in Abbildung 28 zeigt 5 Trendlinien kontinuierlicher Messreihen faserquerschnitt über Zeit an einer Tenax[®] Kohlenstofffaser mit 800 tex und einer Belastung von 100 g. Die rot-strichlierte Linie stellt das Messfenster von 5 Minuten dar. Jede Trendlinie basiert auf ca. 100 Messpunkten (entspricht ca. 100 gemessenen Faserquerschnitten). Abbildung 29 zeigt ebenfalls 5 Trendlinien an einer Tenax[®] 800 tex Kohlenstofffaser mit 300 g Belastung.

5 Statische Messungen

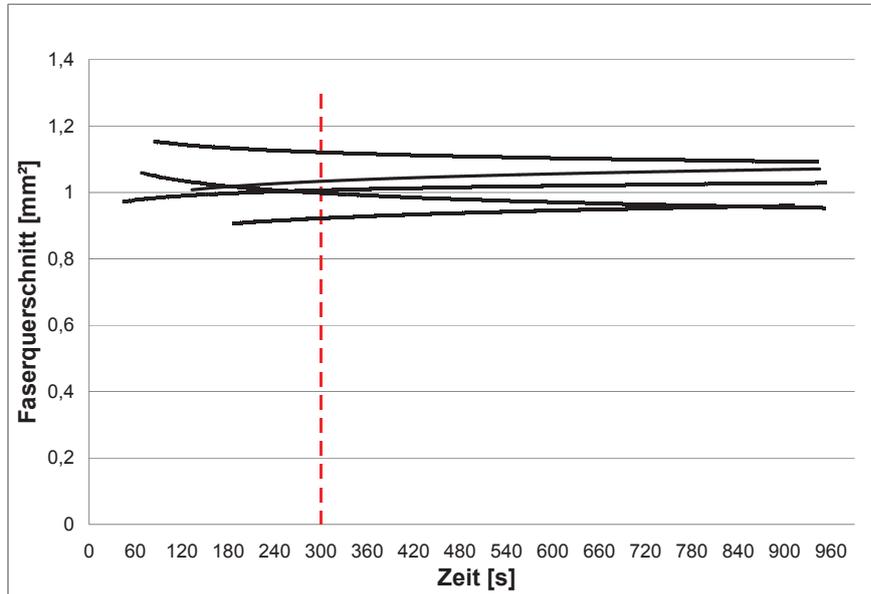


Abbildung 28: 5 Messreihen an Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex mit 100 g Belastung

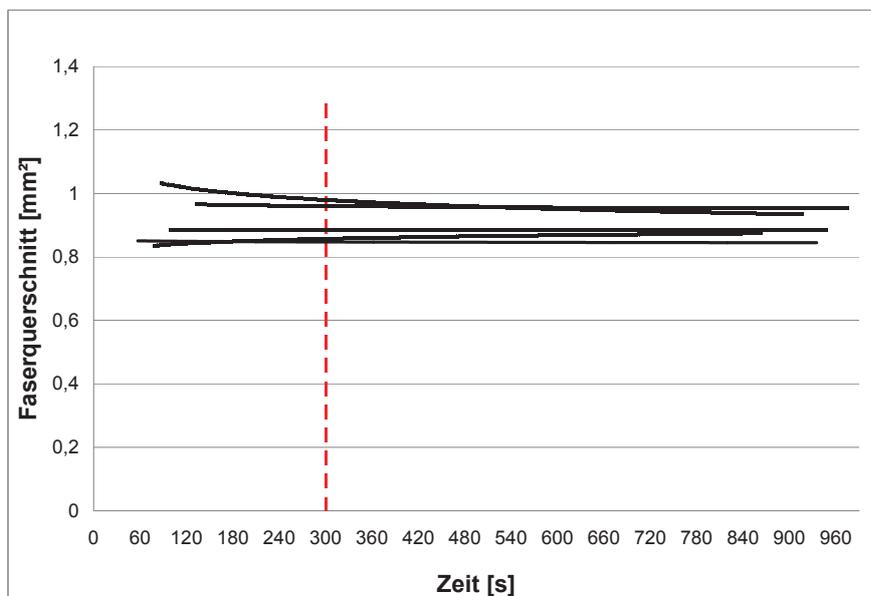


Abbildung 29: 5 Messreihen an Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex mit 300 g Belastung

5.3 Statische Versuche an Kohlenstofffaserrovings

5.3.1 Beschreibung der statischen Versuche

Die statischen Versuche wurden mit dem Messaufbau gemäß Kapitel "3. Experimentelles" durchgeführt. Dazu wurde jeweils eine Prüfstandlänge (ca. 2 m) des zu untersuchenden Rovings von der Spule abgewickelt. Am Ende des Rovings wurde ein Doppelknoten gemacht, um eine Schlaufe zur Befestigung eines Kunststoffbehälters zu erhalten. In den Kunststoffbehälter mit Eigengewicht von 77 g wurde ein Sandsack mit 23 g gelegt um das Startgewicht von 100 g für die statischen Versuche zu erreichen. Nach dem Verstreichen von 5 Minuten wurden 5 Querschnittsmessungen durchgeführt. Anschließend wurde das Gewicht durch Zugabe eines Sandsackes mit 200 g Masse erhöht und nach weiteren 5 Minuten erneut gemessen. Die 5 Messwerte wurden arithmetisch gemittelt und zur Darstellung in einem Diagramm "durchschnittliche Spannung über Faservolumenanteil" herangezogen. Aus 10 bzw. 5 Messkurven wurde eine Durchschnittskurve sowie eine Trendlinie gezeichnet. So wurden für die Kohlenstofffasern Tenax[®] mit 800 tex Schlichte E13, 800 tex Schlichte F13 und 1600 tex Schlichte F13 jeweils 10 Proben mit je 6 Messpunkten von 100 g bis 1100 g mit je 5 Messwerten durchgeführt. Für die Kohlenstofffaser Sigrafil[®] mit 3300 tex wurden 5 Proben mit je 6 Messpunkten von 100 g bis 1100 g mit je 5 Messwerten untersucht. Zusätzlich wurde die Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex Schlichte F13 an 10 Proben mit je 6 Messungen von 200 bis 2200 g, d.h. mit der doppelten Belastung, untersucht, um einen Vergleich zur Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex Schlichte F13 anstellen zu können.

5.3.2 Statische Versuche an Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex Schlichte E13

Die nachstehende Tabelle 12 zeigt 10 Messreihen an der Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex Schlichte E13, bestehend aus 6 Messpunkten von 100 g bis 1100 g Belastung. Jeder Messpunkt entspricht dabei dem Mittelwert aus 5 einzelnen Messungen. σ_m bezeichnet die durchschnittliche Spannung, σ_x die Standardabweichung des Faservolumenanteils. Abbildung 30 zeigt die 10 einzelnen Messungen, Abbildung 31 eine Trendlinie durch die Mittelwerte der 10 Messungen. Bezieht man die gemessenen Fa-

5 Statische Messungen

servolumenanteile auf die Kompaktierungskraft F_K , so erhält man die in Abbildung 32 dargestellte Kurve. Tabelle 13 zeigt den Zusammenhang zwischen der Belastung m , der Spannung σ_m und der Kompaktierungskraft F_K .

	Faservolumenanteil [-]					
σ_m [MPa]	SC800_1	SC800_2	SC800_3	SC800_4	SC800_5	SC800_6
2,124	0,573	0,497	0,445	0,365	0,455	0,493
6,373	0,611	0,532	0,505	0,451	0,525	0,557
10,621	0,621	0,548	0,579	0,482	0,549	0,570
14,870	0,626	0,582	0,539	0,529	0,542	0,580
19,119	0,617	0,562	0,589	0,603	0,621	0,579
23,367	0,633	0,610	0,556	0,607	0,586	0,587

	Faservolumenanteil [-]					
σ_m [MPa]	SC800_7	SC800_8	SC800_9	SC800_10	SC800	σ_x
2,124	0,541	0,545	0,523	0,483	0,485	0,060
6,373	0,559	0,569	0,561	0,510	0,534	0,044
10,621	0,590	0,605	0,573	0,524	0,561	0,040
14,870	0,615	0,580	0,582	0,549	0,571	0,032
19,119	0,636	0,577	0,609	0,556	0,594	0,027
23,367	0,633	0,603	0,628	0,547	0,598	0,030

Tabelle 12: Messwerte von Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex Schlichte E13

m [g]	100	300	500	700	900	1100
F_K [N]	0,24	0,72	1,20	1,68	2,17	2,65
σ_m [MPa]	2,124	6,373	10,621	14,870	19,119	23,367

Tabelle 13: Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft

5 Statische Messungen

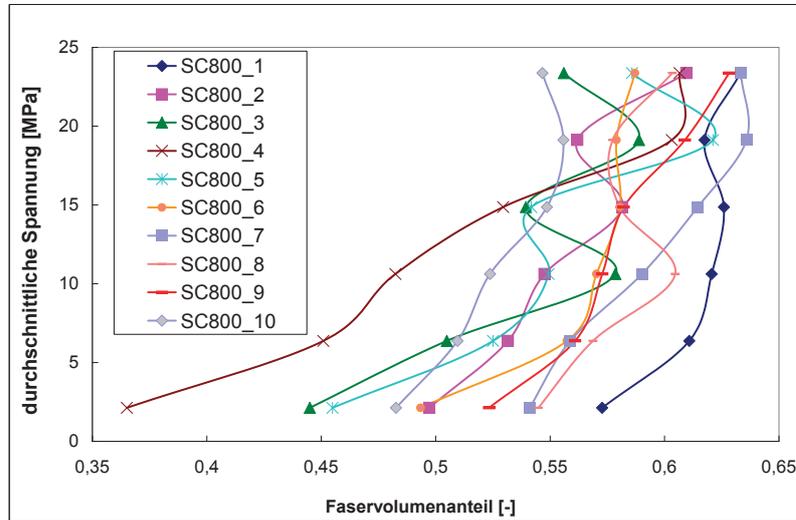


Abbildung 30: 10 Messreihen Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex mit Schlichte E13

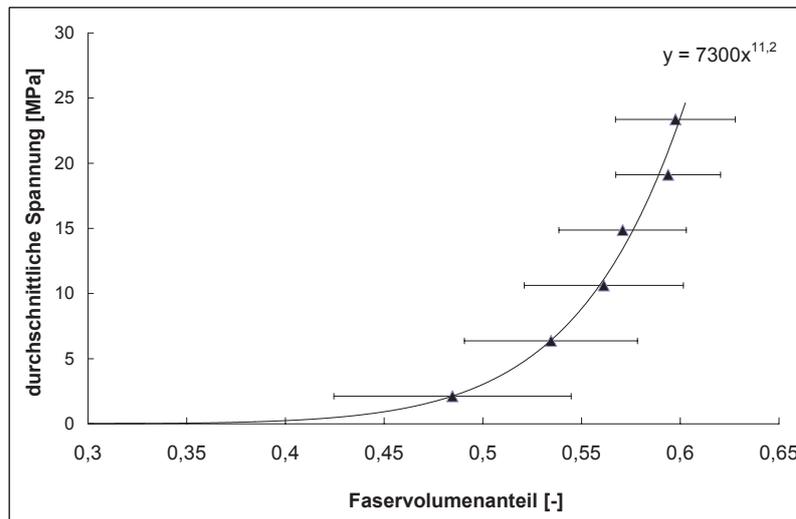


Abbildung 31: Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex mit Schlichte E13

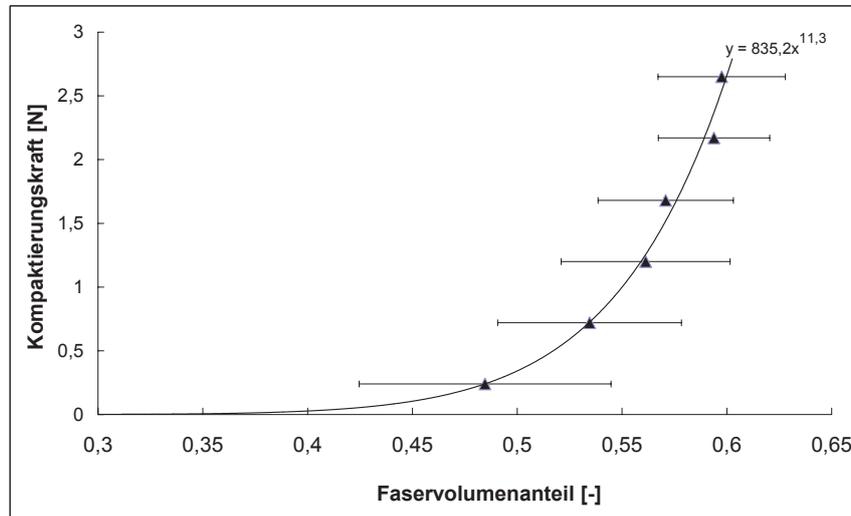


Abbildung 32: Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex mit Schlichte E13

5.3.3 Statische Versuche an Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex Schlichte F13

Die nachstehende Tabelle 14 zeigt 10 Messreihen an der Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex Schlichte F13, bestehend aus 6 Messpunkten von 100 g bis 1100 g Belastung. Jeder Messpunkt entspricht dabei dem Mittelwert aus 5 einzelnen Messungen. σ_m bezeichnet die durchschnittliche Spannung, σ_x die Standardabweichung des Faservolumenanteils. Abbildung 33 zeigt die 10 einzelnen Messungen, Abbildung 34 eine Trendlinie durch die Mittelwerte der 10 Messungen. Bezieht man die gemessenen Faservolumenanteile auf die Kompaktierungskraft F_K , so erhält man die in Abbildung 35 dargestellte Kurve. Tabelle 15 zeigt den Zusammenhang zwischen der Belastung m , der Spannung σ_m und der Kompaktierungskraft F_K .

5 Statistische Messungen

	Faservolumenanteil [-]					
σ_m [MPa]	SC800_1	SC800_2	SC800_3	SC800_4	SC800_5	SC800_6
2,124	0,444	0,425	0,477	0,430	0,467	0,513
6,373	0,485	0,482	0,546	0,509	0,529	0,537
10,621	0,510	0,527	0,554	0,547	0,542	0,599
14,870	0,534	0,544	0,551	0,567	0,609	0,618
19,119	0,533	0,571	0,581	0,593	0,611	0,583
23,367	0,549	0,590	0,607	0,637	0,590	0,630

	Faservolumenanteil [-]					
σ_m [MPa]	SC800_7	SC800_8	SC800_9	SC800_10	SC800	σ_x
2,124	0,397	0,466	0,467	0,425	0,449	0,033
6,373	0,450	0,492	0,517	0,469	0,500	0,031
10,621	0,466	0,526	0,532	0,515	0,530	0,034
14,870	0,485	0,542	0,541	0,554	0,552	0,038
19,119	0,504	0,559	0,588	0,554	0,566	0,031
23,367	0,519	0,564	0,551	0,557	0,577	0,038

Tabelle 14: Messwerte von Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex Schlichte F13

m [g]	100	300	500	700	900	1100
F_K [N]	0,24	0,72	1,20	1,68	2,17	2,65
σ_m [MPa]	2,124	6,373	10,621	14,870	19,119	23,367

Tabelle 15: Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft

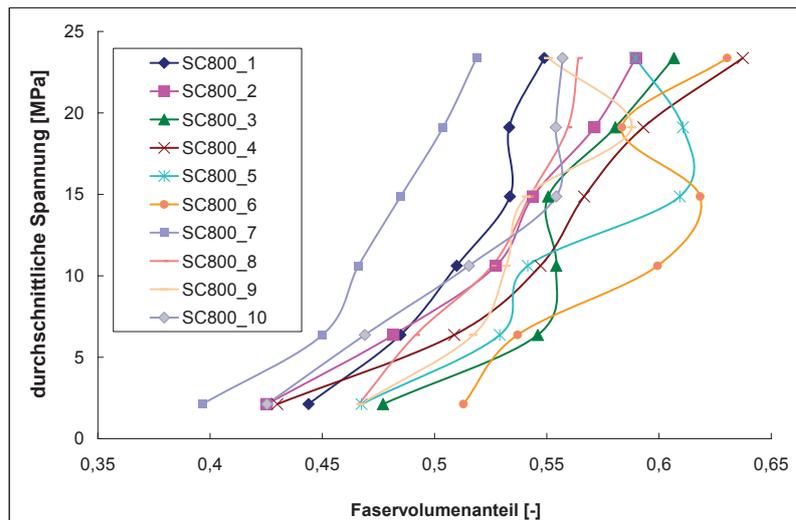


Abbildung 33: 10 Messreihen Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex mit Schlichte F13

5 Statische Messungen

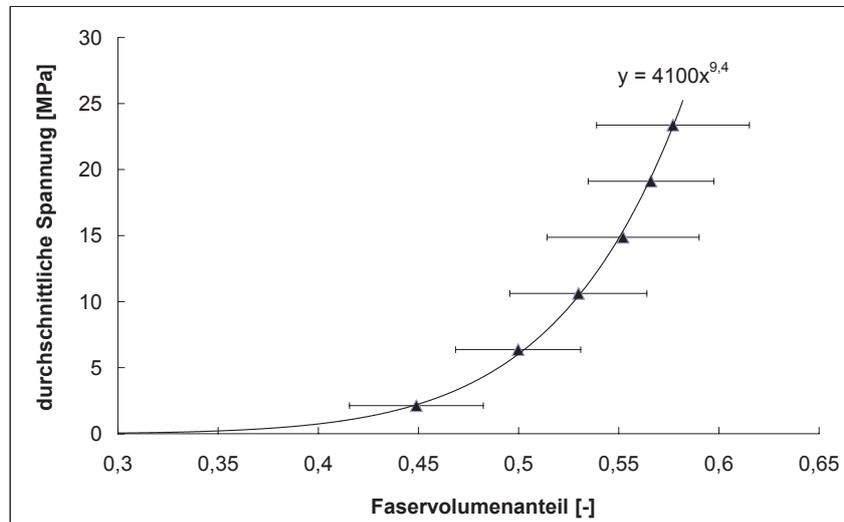


Abbildung 34: Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex mit Schlichte F13

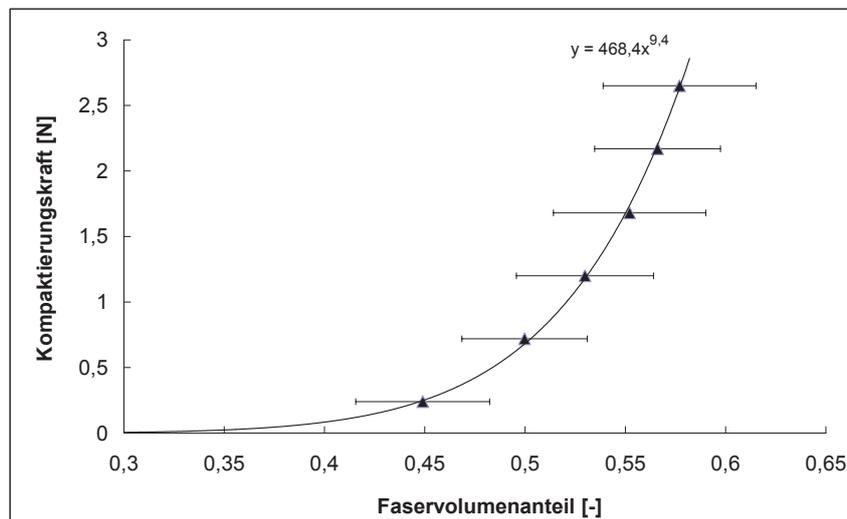


Abbildung 35: Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax[®] 800 tex mit Schlichte F13

5.3.4 Statische Versuche an Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex Schlichte F13

Die nachstehende Tabelle 16 zeigt 10 Messreihen an der Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex Schlichte F13, bestehend aus 6 Messpunkten von 100 g bis 1100 g Belastung. Jeder Messpunkt entspricht dabei dem Mittelwert aus 5 einzelnen Messungen. σ_m bezeichnet die durchschnittliche Spannung, σ_x die Standardabweichung des Faservolumenanteils. Abbildung 36 zeigt die 10 einzelnen Messungen, Abbildung 37 eine Trendlinie durch die Mittelwerte der 10 Messungen. Bezieht man die gemessenen Faservolumenanteile auf die Kompaktierungskraft F_K , so erhält man die in Abbildung 38 dargestellte Kurve. Tabelle 17 zeigt den Zusammenhang zwischen der Belastung m , der Spannung σ_m und der Kompaktierungskraft F_K .

	Faservolumenanteil [-]					
σ_m [MPa]	SC1600_1	SC1600_2	SC1600_3	SC1600_4	SC1600_5	SC1600_6
1,062	0,334	0,389	0,380	0,349	0,312	0,311
3,186	0,367	0,422	0,404	0,388	0,382	0,374
5,311	0,404	0,458	0,431	0,428	0,418	0,412
7,435	0,438	0,443	0,444	0,434	0,449	0,419
9,559	0,459	0,494	0,460	0,465	0,464	0,439
11,684	0,463	0,509	0,480	0,476	0,480	0,427

	Faservolumenanteil [-]					
σ_m [MPa]	SC1600_7	SC1600_8	SC1600_9	SC1600_10	SC1600	σ_x
1,062	0,321	0,328	0,333	0,348	0,339	0,027
3,186	0,379	0,388	0,375	0,399	0,387	0,017
5,311	0,443	0,432	0,408	0,423	0,425	0,017
7,435	0,466	0,420	0,423	0,456	0,439	0,016
9,559	0,443	0,459	0,434	0,467	0,458	0,017
11,684	0,474	0,446	0,465	0,484	0,469	0,022

Tabelle 16: Messwerte von Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex Schlichte F13

m [g]	100	300	500	700	900	1100
F_K [N]	0,24	0,72	1,20	1,68	2,17	2,65
σ_m [MPa]	1,062	3,186	5,311	7,435	9,559	11,684

Tabelle 17: Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft

5 Statische Messungen

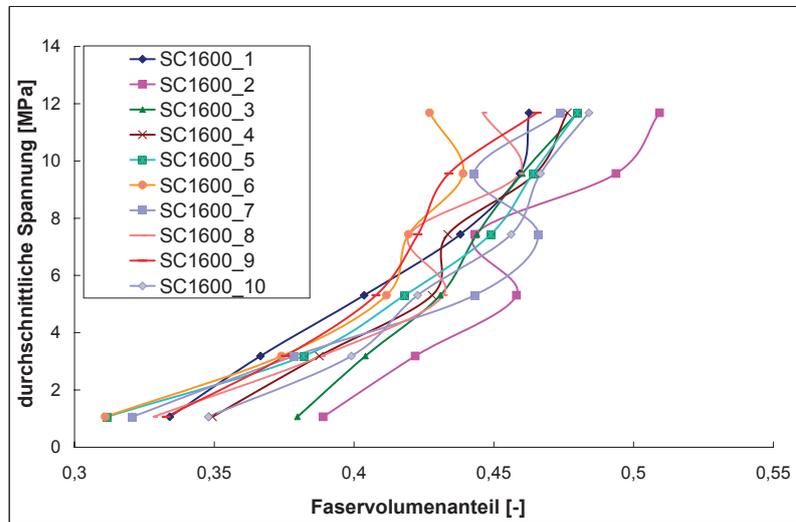


Abbildung 36: 10 Messreihen Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex mit Schlichte F13

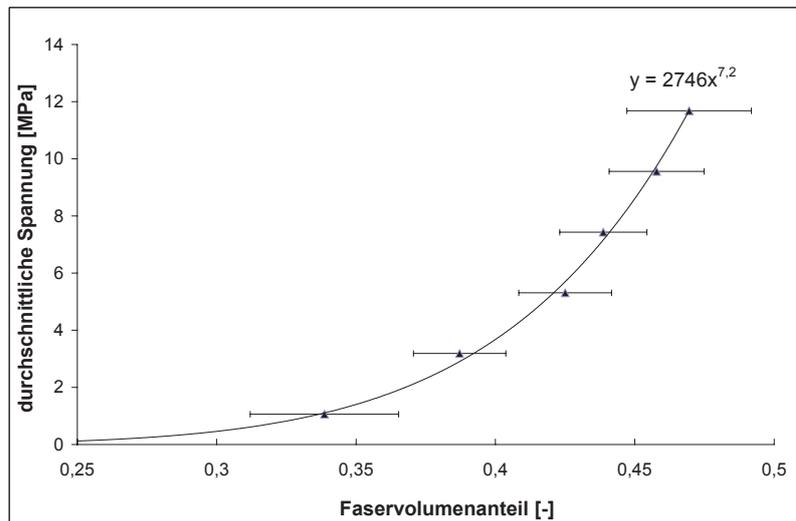


Abbildung 37: Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex mit Schlichte F13

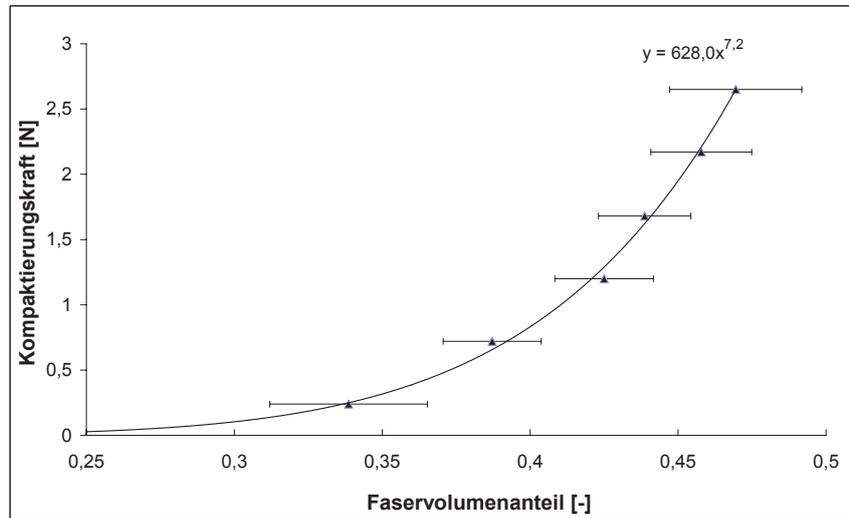


Abbildung 38: Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex mit Schlichte F13

5.3.5 Statische Versuche an Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex Schlichte F13 mit doppelter Belastung

Die nachstehende Tabelle 18 zeigt 10 Messreihen an der Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex Schlichte F13, bestehend aus 6 Messpunkten von 200 g bis 2200 g Belastung. Jeder Messpunkt entspricht dabei dem Mittelwert aus 5 einzelnen Messungen. σ_m bezeichnet die durchschnittliche Spannung, σ_x die Standardabweichung des Faservolumenanteils. Abbildung 39 zeigt die 10 einzelnen Messungen, Abbildung 40 eine Trendlinie durch die Mittelwerte der 10 Messungen. Bezieht man die gemessenen Faservolumenanteile auf die Kompaktierungskraft F_K , so erhält man die in Abbildung 41 dargestellte Kurve. Tabelle 19 zeigt den Zusammenhang zwischen der Belastung m , der Spannung σ_m und der Kompaktierungskraft F_K .

5 Statische Messungen

	Faservolumenanteil [-]					
σ_m [MPa]	SC1600_1	SC1600_2	SC1600_3	SC1600_4	SC1600_5	SC1600_6
2,124	0,399	0,376	0,366	0,342	0,391	0,422
6,373	0,480	0,488	0,463	0,450	0,439	0,485
10,621	0,515	0,516	0,494	0,503	0,464	0,511
14,870	0,525	0,573	0,582	0,533	0,494	0,532
19,119	0,554	0,558	0,603	0,578	0,508	0,551
23,367	0,549	0,558	0,649	0,635	0,523	0,556

	Faservolumenanteil [-]					
σ_m [MPa]	SC1600_7	SC1600_8	SC1600_9	SC1600_10	SC1600	σ_x
2,124	0,463	0,419	0,365	0,376	0,389	0,037
6,373	0,496	0,455	0,421	0,440	0,461	0,025
10,621	0,531	0,476	0,471	0,442	0,491	0,023
14,870	0,533	0,511	0,493	0,514	0,528	0,031
19,119	0,537	0,526	0,521	0,482	0,540	0,030
23,367	0,546	0,534	0,537	0,499	0,555	0,045

Tabelle 18: Messwerte von Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex, doppelte Belastung

m [g]	200	600	1000	1400	1800	2200
F_K [N]	0,48	1,44	2,40	3,36	4,34	5,30
σ_m [MPa]	2,124	6,373	10,621	14,870	19,119	23,367

Tabelle 19: Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft

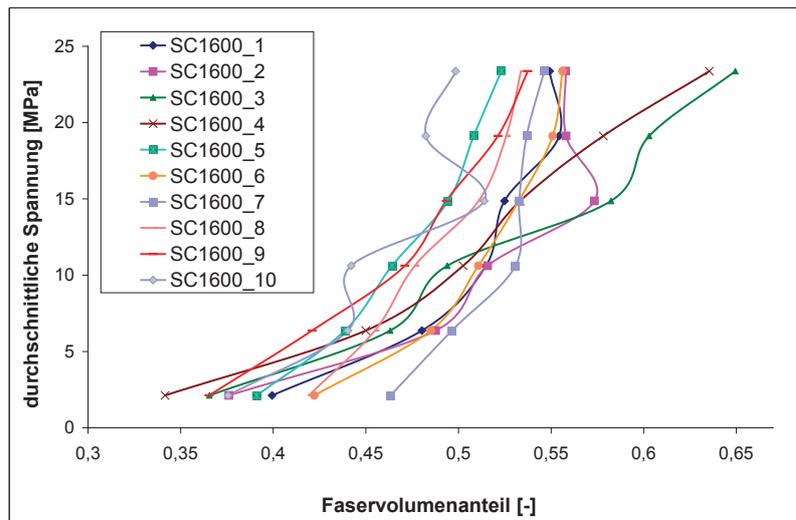


Abbildung 39: 10 Messreihen Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex, doppelte Belastung

5 Statische Messungen

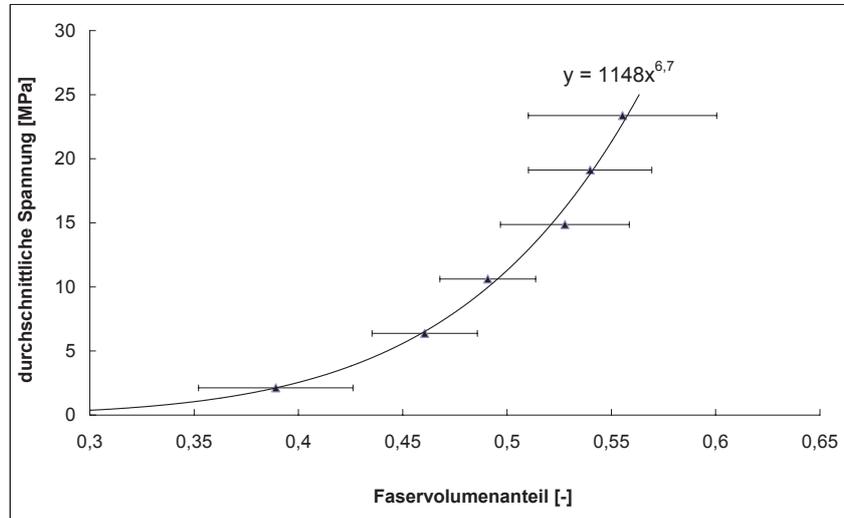


Abbildung 40: Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex, doppelte Belastung

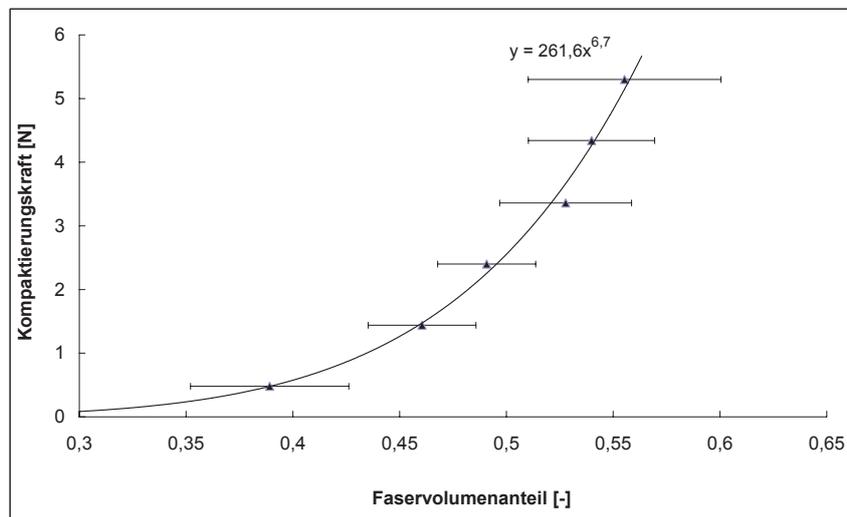


Abbildung 41: Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax[®] 1600 tex, doppelte Belastung

5.3.6 Statische Versuche an Kohlenstofffaser Sigrafil[®] 3300 tex

Die nachstehende Tabelle 20 zeigt 5 Messreihen an der Kohlenstofffaser Sigrafil[®] 3300 tex, bestehend aus 6 Messpunkten von 100 g bis 1100 g Belastung. Jeder Messpunkt entspricht dabei dem Mittelwert aus 5 einzelnen Messungen. σ_m bezeichnet die durchschnittliche Spannung, σ_x die Standardabweichung des Faservolumenanteils. Abbildung 42 zeigt die 5 einzelnen Messungen, Abbildung 43 eine Trendlinie durch die Mittelwerte der 5 Messungen. Bezieht man die gemessenen Faservolumenanteile auf die Kompaktierungskraft F_K , so erhält man die in Abbildung 44 dargestellte Kurve. Tabelle 21 zeigt den Zusammenhang zwischen der Belastung m , der Spannung σ_m und der Kompaktierungskraft F_K .

σ_m [MPa]	Faservolumenanteil [-]						σ_x
	3300_1	3300_2	3300_3	3300_4	3300_5	3300	
0,510	0,325	0,262	0,299	0,263	0,345	0,295	0,037
1,529	0,388	0,390	0,365	0,334	0,394	0,373	0,025
2,549	0,424	0,433	0,409	0,437	0,445	0,429	0,014
3,569	0,466	0,467	0,415	0,488	0,479	0,461	0,028
4,588	0,481	0,487	0,456	0,527	0,476	0,485	0,026
5,659	0,532	0,518	0,478	0,552	0,507	0,517	0,028

Tabelle 20: Messwerte von Kohlenstofffaser Sigrafil[®] 3300tex

m [g]	100	300	500	700	900	1100
F_K [N]	0,24	0,72	1,20	1,68	2,17	2,65
σ_m [MPa]	0,510	1,529	2,549	3,569	4,588	5,659

Tabelle 21: Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft

5 Statische Messungen

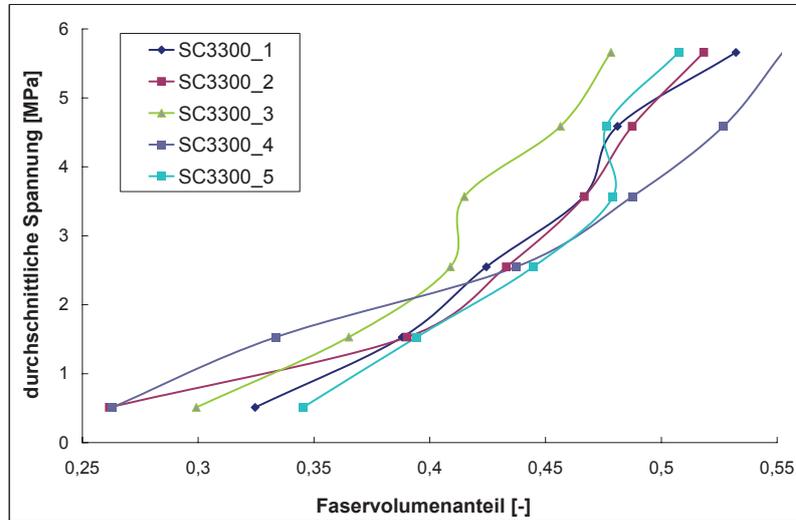


Abbildung 42: 5 Messreihen von Kohlenstofffaser Sigrafil[®] 3300 tex

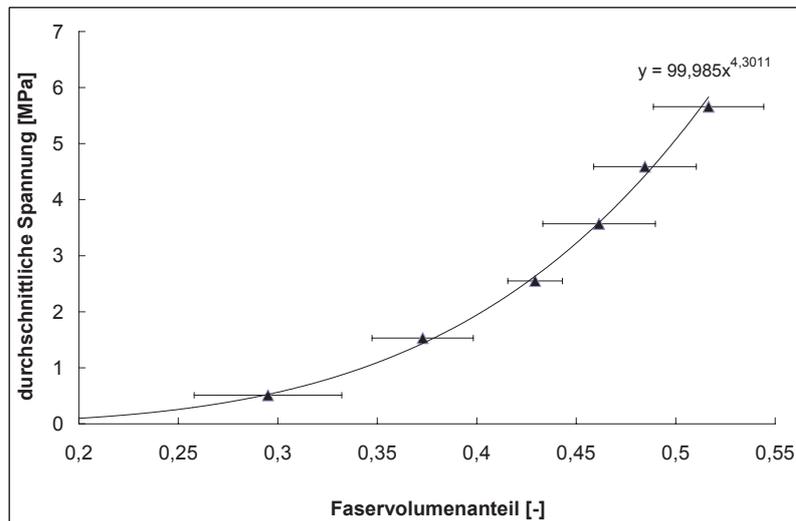


Abbildung 43: Trendlinie Kohlenstofffaser Sigrafil[®] 3300 tex

5 Statische Messungen

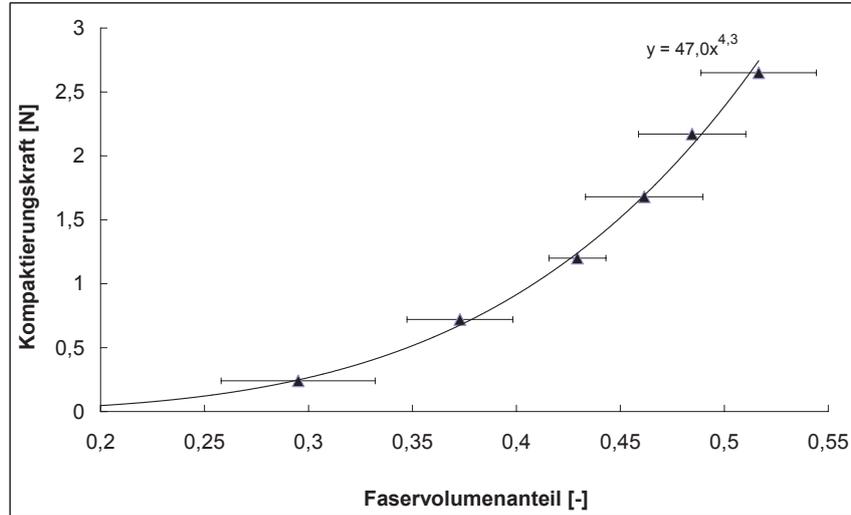


Abbildung 44: Trendlinie Kohlenstofffaser Sigrafil® 3300 tex

5.3.7 Zusammenfassung statischer Versuche an Kohlenstofffaser

Die folgenden Abbildungen 46 und 47 zeigen alle untersuchten Kohlenstofffaserrovings in einem Diagramm dargestellt. Gut erkennbar ist, dass alle untersuchten Rovings dem Modell mit $\sigma = A \cdot V^n$ folgen. In den Abbildungen 48 und 49 sind die Messergebnisse in Form des Faserverteilungsverhältnisses dargestellt. Das Faserverteilungsverhältnis FDBR (fibre distribution ratio) ist über den durchschnittlichen Abstand z zweier einzelner Filamentmittelpunkte der hexagonalen Packung (entspricht der Seitenlänge eines gleichseitigen Dreiecks) und dem Filamentradius r_{filament} über den Faservolumenanteil ϕ definiert, wie in Abbildung 48 und den Gleichungen 5.1 bis 5.4 beschrieben ist:

$$A_{\text{filament}} = r_{\text{filament}}^2 \cdot \pi \quad (5.1)$$

$$A_{\text{ges}} = A_{\text{filament}} / \phi \quad (5.2)$$

$$z = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{\text{ges}}}{\sqrt{3}}} \quad (5.3)$$

5 Statische Messungen

$$FDBR = z/r_{filemanet} \quad (5.4)$$

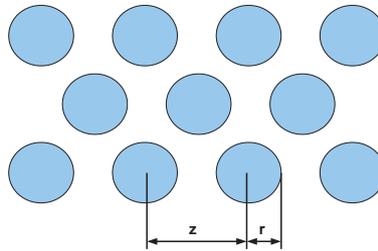


Abbildung 45: Faserverteilungsverhältnis FDBR

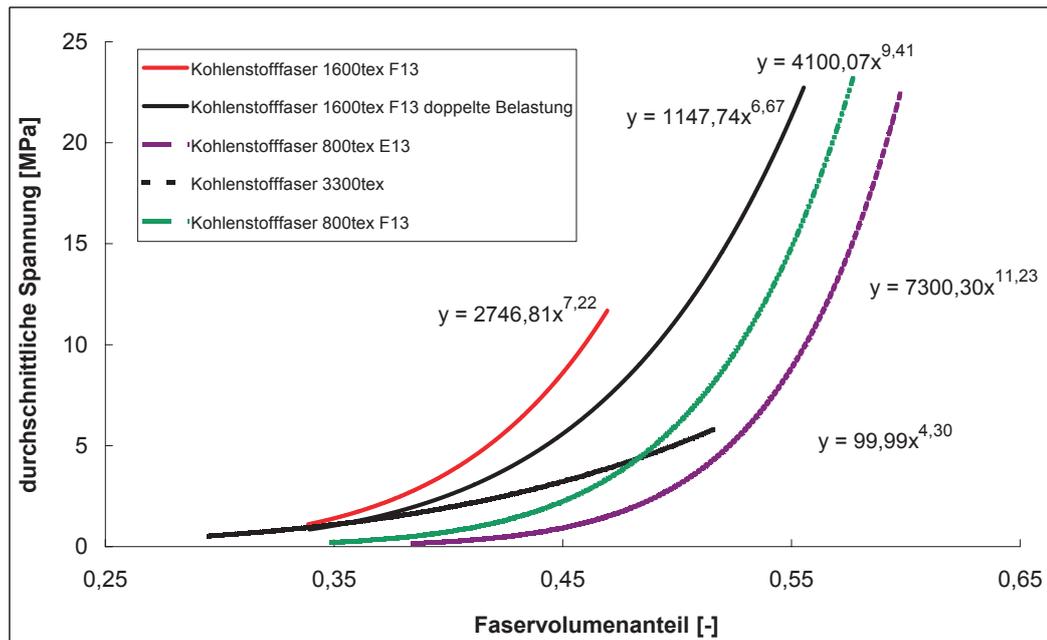


Abbildung 46: Alle untersuchten Kohlenstofffaserrovings im Vergleich

5 Statische Messungen

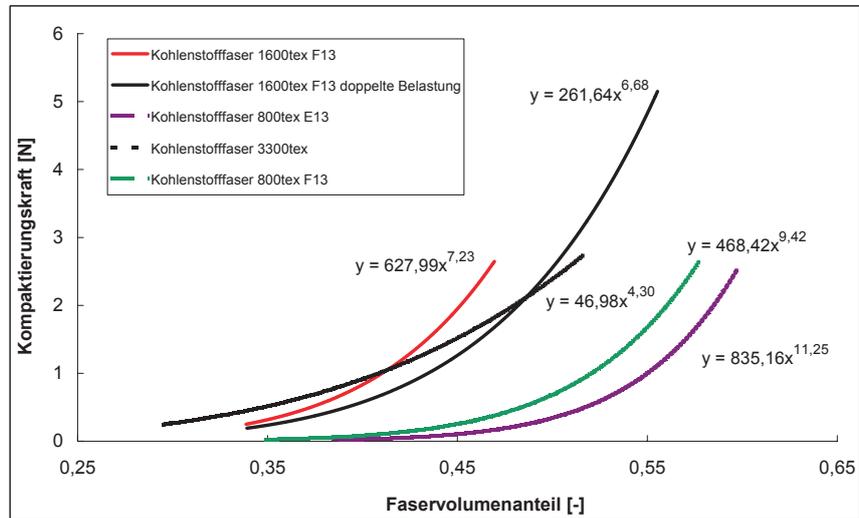


Abbildung 47: Alle untersuchten Kohlenstofffaserrovings im Vergleich

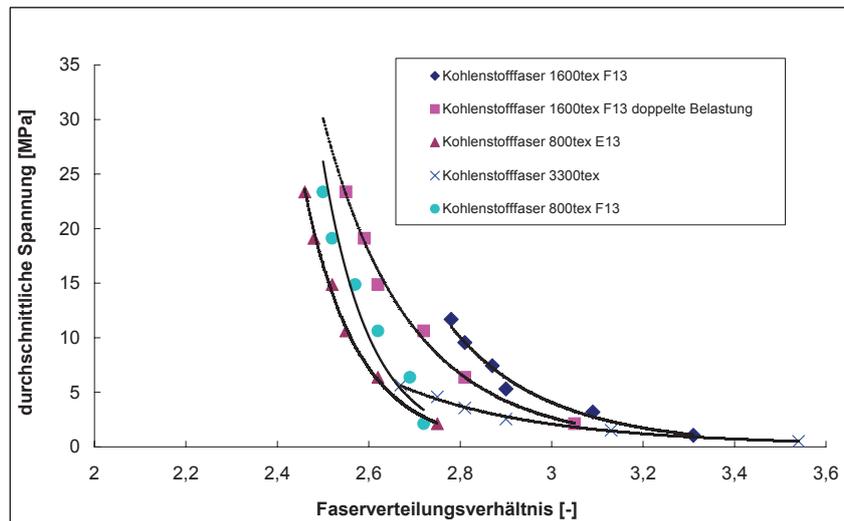


Abbildung 48: Faserverteilungsverhältnis der verschiedenen untersuchten Rovings

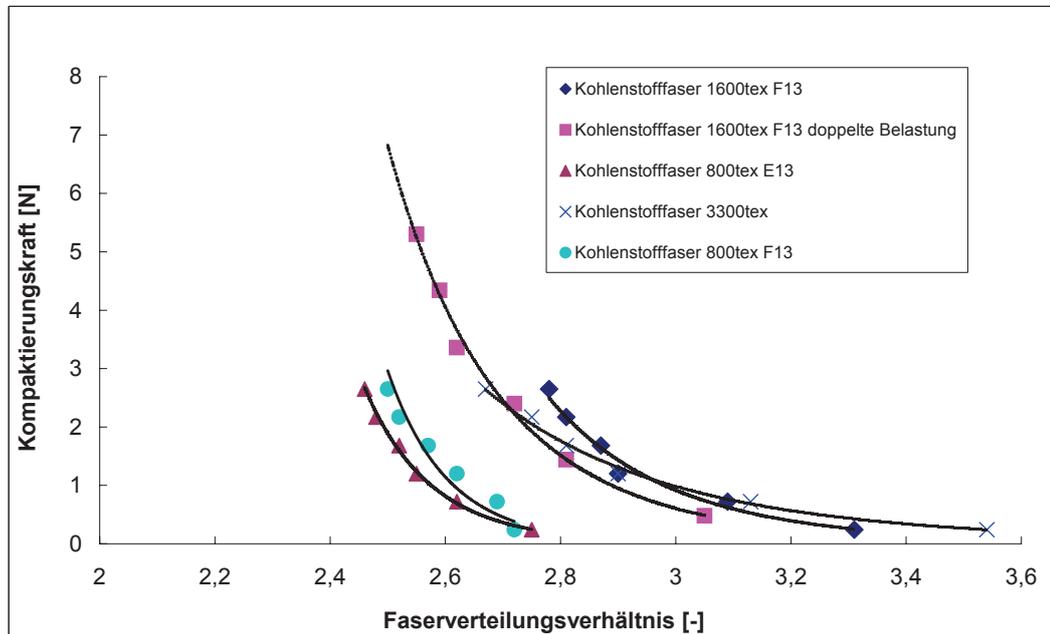


Abbildung 49: Faserverteilungsverhältnis der verschiedenen untersuchten Rovings

5.4 Statische Versuche an Glasfaserrovings

5.4.1 Statische Versuche an Glasfaser OCV™Reinforcements 2400 tex

Wie bereits im Kapitel Belichtungszeit und Verstärkung für Glasfasern erläutert, ist das Untersuchen von transparenten bzw. nicht eingefärbten Glasfasern mittels Lichtschnitttechnik schwierig und das Messergebnis unvollständig. Mit den Messparametern Shutter = 700 μ s und Gain = 90 wurden 10 Messreihen zu je 6 Belastungen von 100 g bis 1100 g im Intervall von 200 g zu je 5 einzelnen Messwerten an einem Glasfaserroving 2400 tex von OCV™Reinforcements durchgeführt, wie Tabelle 22 zeigt. σ_m bezeichnet die durchschnittliche Spannung, σ_x die Standardabweichung des Faservolumenanteils. Abbildung 50 zeigt die 10 einzelnen Messungen, Abbildung

5 Statische Messungen

51 eine Trendlinie durch die Mittelwerte der 10 Messungen. Hier ist deutlich erkennbar, dass der gemessene Querschnitt zu gering ist, der Faservolumenanteil übersteigt 91%, was in der Realität nicht vorkommen kann. Grund sind Informationsverluste durch die Transparenz des untersuchten Faserbündels - ein Teil des Laserstrahls dringt in das Faserbündel ein und wird im Inneren des Bündels reflektiert, wodurch es zu einem zu kleineren Messwert kommt. Tabelle 23 zeigt den Zusammenhang zwischen der Belastung m , der Spannung σ_m und der Kompaktierungskraft F_K .

	Faservolumenanteil [-]					
σ_m [MPa]	SE2400_1	SE2400_2	SE2400_3	SE2400_4	SE2400_5	SE2400_6
1,038	0,391	0,414	0,582	0,552	0,574	0,386
3,114	0,469	0,582	0,647	0,683	0,653	0,480
5,190	0,547	0,687	0,839	0,799	0,728	0,551
7,267	0,731	0,771	0,912	0,825	0,787	0,641
9,343	0,854	0,801	0,935	1,083	0,884	0,720
11,419	1,078	0,941	0,987	1,263	0,960	0,805

	Faservolumenanteil [-]					
σ_m [MPa]	SE2400_7	SE2400_8	SE2400_9	SE2400_10	SE2400	σ_x
1,038	0,454	0,512	0,665	0,565	0,494	0,094
3,114	0,533	0,637	0,747	0,709	0,600	0,095
5,190	0,598	0,689	0,810	0,753	0,685	0,106
7,267	0,612	0,798	0,876	0,849	0,768	0,096
9,343	0,744	0,812	0,961	0,851	0,853	0,108
11,419	0,833	0,953	1,007	0,866	0,954	0,132

Tabelle 22: 10 Messreihen an Glasfaserroving OCV™Reinforcements 2400 tex

m [g]	100	300	500	700	900	1100
F_K [N]	0,24	0,72	1,20	1,68	2,17	2,65
σ_m [MPa]	1,038	3,114	5,190	7,267	9,343	11,419

Tabelle 23: Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft

Um die Messwerte der transparenten Glasfaser zu überprüfen, wurde das Faserbündel mit einem schwarzen Permanentmarker im Messbereich eingefärbt. Dadurch war es möglich, mit den gleichen Parametern wie für Kohlenstofffaserbündel (Shutter = 50.000 μ s und Gain = 0) Messungen durchzuführen. Es wurden 5 Messreihen mit 6 Messpunkten von 100 g bis 1100 g zu je 5 Einzelmessungen durchgeführt, wie Tabelle 24 zeigt. σ_m bezeichnet die durchschnittliche Spannung, σ_x die Standardabweichung des Faservolumenanteils.

5 Statistische Messungen

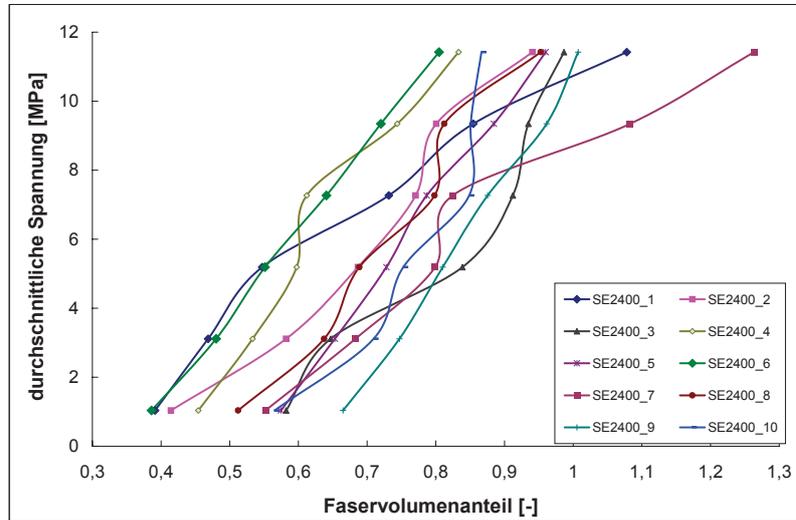


Abbildung 50: 10 Messreihen von Glasfaser OCV™Reinforcements 2400 tex

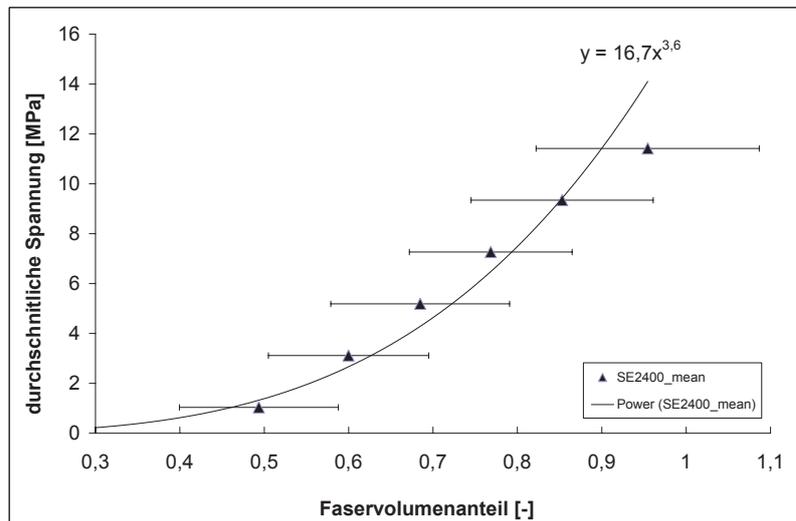


Abbildung 51: Trendlinie Glasfaser OCV™Reinforcements 2400 tex

5 Statische Messungen

	Faservolumenanteil [-]						
σ_m [MPa]	2400_1	2400_2	2400_3	2400_4	2400_5	2400	σ_x
1,038	0,269	0,341	0,509	0,477	0,371	0,373	0,099
3,114	0,278	0,345	0,515	0,479	0,370	0,378	0,098
5,190	0,287	0,357	0,539	0,498	0,368	0,389	0,105
7,267	0,311	0,368	0,546	0,490	0,353	0,396	0,100
9,343	0,358	0,376	0,545	0,483	0,382	0,417	0,081
11,419	0,372	0,384	0,543	0,506	0,413	0,434	0,077

Tabelle 24: 5 Messreihen von eingefärbter Glasfaser OCV™Reinforcements 2400 tex

Abbildung 52 zeigt die 5 einzelnen Messungen, Abbildung 53 die Gegenüberstellung der Trendline der eingefärbten Glasfaser zur Trendlinie der nicht eingefärbten Glasfaser. Abbildung 54 zeigt die beiden Kurven bezogen auf die Kompaktierungskraft. Durch das Einfärben kommt es zu einem Verkleben der einzelnen Filamente, was zu einer Verformungsbehinderung führt. Die Messungen an den Glasfasern müssten an von Haus aus schwarz eingefärbten Fasern durchgeführt werden, um korrekte Messergebnisse zu erhalten.

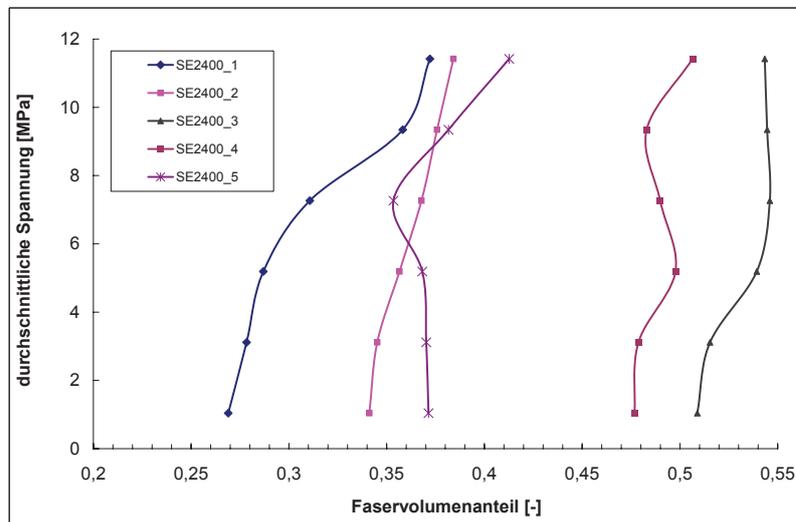


Abbildung 52: 5 Messreihen eingefärbte Glasfaser OCV™Reinforcements 2400 tex

5 Statische Messungen

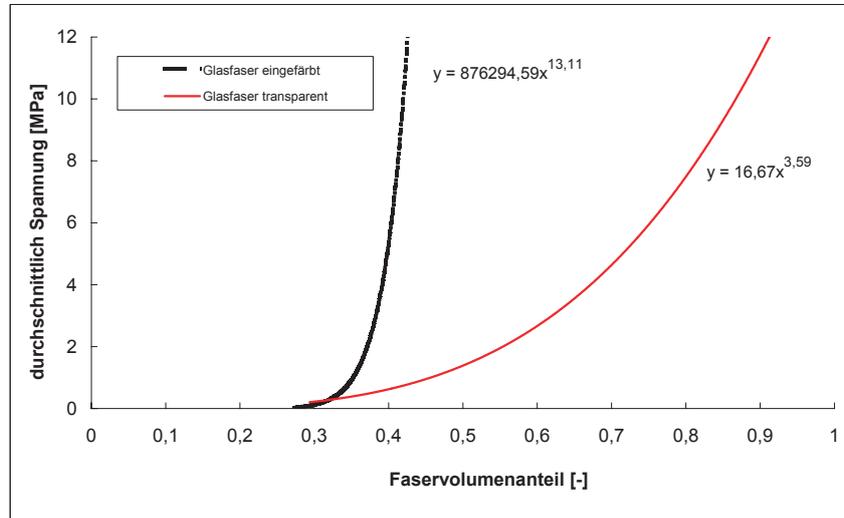


Abbildung 53: Trendlinien eingefärbter und transparenter Glasfasern

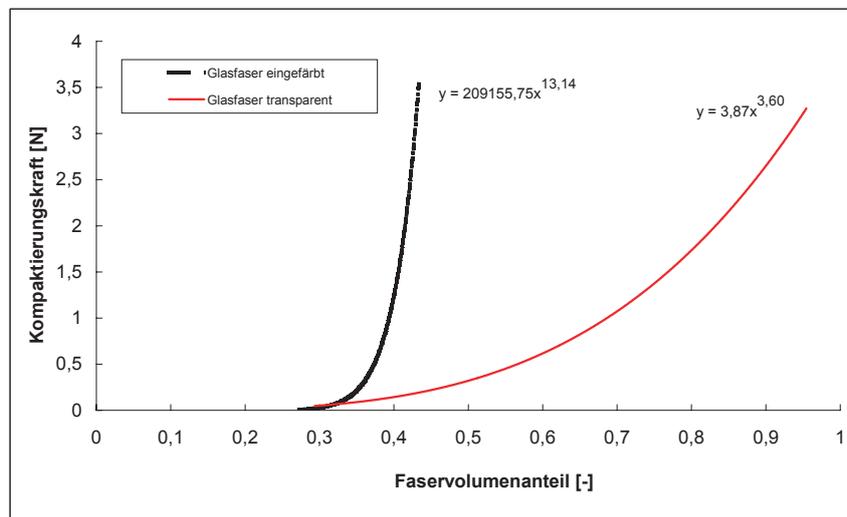


Abbildung 54: Trendlinien eingefärbter und transparenter Glasfasern

5.5 Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Krafteinleitung

Bei den in den vorhergehenden Kapitel beschriebenen statischen Versuchen erfolgte die Krafteinleitung über einen Knoten. Der Becher, in dem sich die Gewichte befanden, wurde mittels Knoten am Faserbündel befestigt. In einer weiteren Versuchsreihe wurden Aufleimer aus Aluminiumplatten an die zu untersuchenden Faserbündel Tenax[®] Kohlenstofffaser mit 1600 tex mittels Zwei-Komponentenkleber angebracht. Durch eine Bohrung wurde der Becher mittels Schäckel befestigt. Da zum Aufkleben der Aluminiumplatten bzw. zur Aushärtung des Klebers die Proben mehrere Stunden ruhen müssen, wurden zwei Vergleichsproben ohne Aufleimer der gleichen Lagerung ausgesetzt. Durch die Lagerung abseits der Spule ohne Belastung kommt es zu einer Erholung der Faserbündel, d.h. der Querschnitt ist zu Beginn des Versuches größer, der Faservolumenanteil geringer. Die nachfolgende Tabelle 26 zeigt die Messwerte von 6 Proben mit Aufleimer sowie 2 Vergleichsproben ohne Aufleimer mit der gleichen Lagerung. σ_m bezeichnet die durchschnittliche Spannung, σ_x die Standardabweichung des Faservolumenanteils. In Abbildung 55 sind die 6 Messungen mit Aufleimer und 2 Referenzmessungen ohne Aufleimer dargestellt. Abbildungen 56 und 57 zeigen die Trendlinie der Proben mit Aufleimer. Es ist kein wesentlicher Unterschied zwischen dem Verlauf der Messkurven von Proben mit Aufleimer und der Messkurven von Proben ohne Aufleimer bei gleicher Lagerung erkennbar. Tabelle 25 zeigt den Zusammenhang zwischen der Belastung m , der Spannung σ_m und der Kompaktierungskraft F_K .

m [g]	100	300	500	700	900	1100
F_K [N]	0,24	0,72	1,20	1,68	2,17	2,65
σ_m [MPa]	1,062	3,186	5,311	7,435	9,559	11,684

Tabelle 25: Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft

5 Statistische Messungen

σ_m [MPa]	1600_AL1	1600_AL2	1600_AL3	1600_AL4	1600_AL5
1,062	0,197	0,278	0,341	0,284	0,374
3,186	0,247	0,325	0,422	0,306	0,407
5,311	0,307	0,369	0,451	0,321	0,436
7,435	0,346	0,401	0,464	0,380	0,463
9,559	0,385	0,406	0,477	0,411	0,482
11,684	0,425	0,439	0,458	0,444	0,506

σ_m [MPa]	1600_AL6	1600_oAL7	1600_oAL8	1600_AL	σ_x
1,062	0,310	0,313	0,200	0,274	0,056
3,186	0,376	0,397	0,319	0,340	0,064
5,311	0,399	0,420	0,380	0,379	0,056
7,435	0,430	0,450	0,425	0,416	0,045
9,559	0,436	0,465	0,440	0,435	0,038
11,684	0,443	0,460	0,444	0,451	0,026

Tabelle 26: 6 Proben mit Aufleimer und 2 Vergleichsproben von Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex

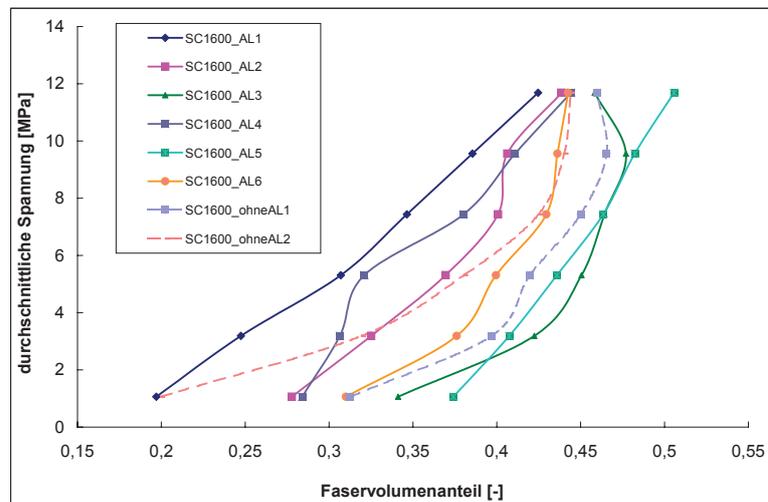


Abbildung 55: 8 Statische Versuche mit und ohne Aufleimer an Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex

5 Statische Messungen

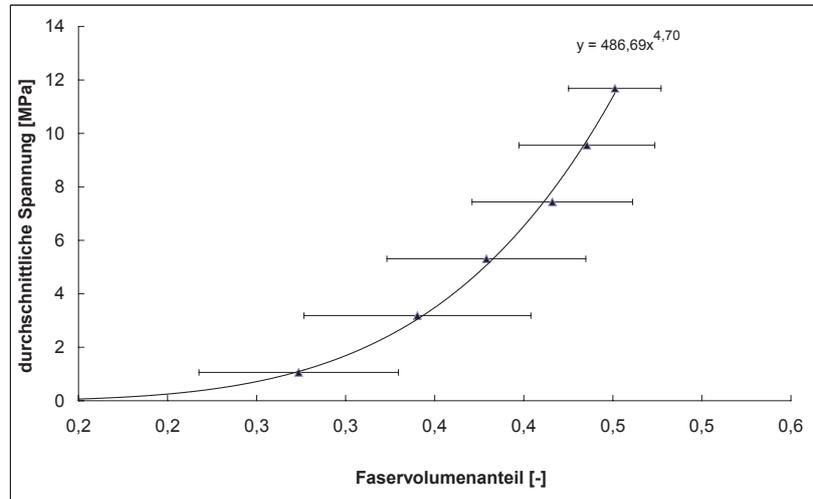


Abbildung 56: Trendlinie statischer Versuche mit Aufleimer an Tenax[®]Kohlenstofffaser 1600 tex

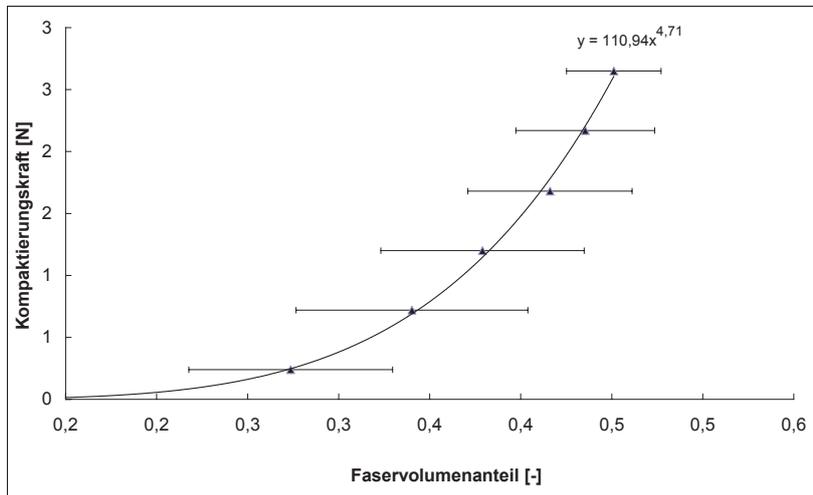


Abbildung 57: Trendlinie statischer Versuche mit Aufleimer an Tenax[®]Kohlenstofffaser 1600 tex

5.6 Versuche mit kontinuierlich zunehmender Last

Um Versuche mit kontinuierliche zunehmender Last durchführen zu können, wurde eine Wasserpumpe mit einem regelbaren Labornetzgerät verwendet. Die nachfolgende Tabelle 27 zeigt die technischen Parameter der Wasserpumpe. Um den Zusammenhang zwischen an der Pumpe angelegter elektrischer Spannung und gefördertem Massenstrom zu ermitteln, wurde bei 5 verschiedenen elektrischen Spannungen je 5 mal die geförderte Wassermasse nach 30 Sekunden gewogen. Tabelle 28 zeigt die Messwerte und den gemittelten Massenstrom in Gramm je Sekunde. Diese Messungen wurden so ausgeführt, dass Pumpe, Zielbehälter und Tank bzw. die Schlauchenden in den Gefäßen auf einem Niveau waren. Die weiteren Messungen wurden ebenfalls so durchgeführt. Bei vertikalem Abstand zwischen den Schlauchenden bzw. der Pumpe kommt es zu einer Abweichung der ermittelten Fördermenge, da zusätzlich Arbeit (potentielle Energie) geleistet werden muss oder frei wird. In Abbildung 58 ist der Zusammenhang zwischen angelegter elektrischer Spannung und Massenstrom dargestellt. Die Beziehung ist im betrachteten elektrischen Spannungsbereich nahezu linear.

Technische Daten Wasserpumpe	
elektrische Betriebsspannung [V]	3,5 - 12
Förderhöhe [m]	0,5 - 2
Fördermenge [l/min]	0,7 - 2

Tabelle 27: Technische Daten der verwendeten Wasserpumpe

el. Spannung [V]	Massenstrom						
	Messreihe					Mittelwert	
	[g/30s]	[g/30s]	[g/30s]	[g/30s]	[g/30s]	[g/30s]	[g/s]
4	250	251	261	259	254	255	8,5
6	452	440	452	447	452	448,6	14,95
8	605	627	605	616	630	616,6	20,55
10	756	750	744	750	758	751,6	25,05
12	888	855	879	879	876	875,4	29,18

Tabelle 28: Volumenstrom der verwendeten Pumpe bei verschiedenen elektrischen Spannungen

5 Statische Messungen

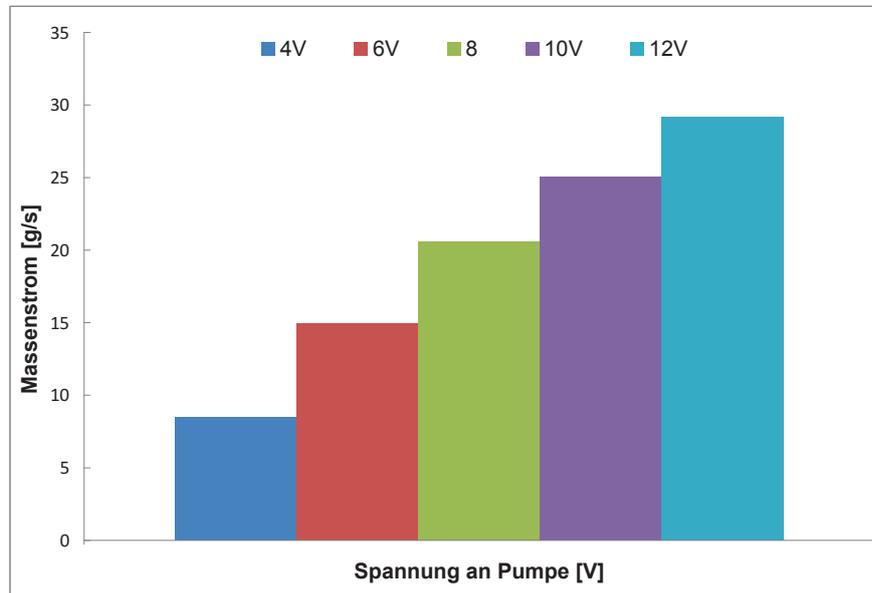


Abbildung 58: Volumenstrom der verwendeten Pumpe bei verschiedenen elektrischen Spannungen

Anstelle von definierten Gewichten wurde mittels Wasserpumpe kontinuierlich eine definierte Menge Wasser in den am Faserbündel befestigten Becher gepumpt. Während bei den statischen Messungen Einzelaufnahmen mittels Lichtschnittsensor für die weitere Auswertung gemacht wurden, wurde bei den kontinuierlichen Experimenten mit Wasserpumpe eine fortwährende Aufzeichnung des Faserbündelquerschnittes durchgeführt. An Tenax[®] Kohlenstofffaserbündel mit 1600 tex und 800 tex wurde das Kompaktierungsverhalten im elektrischen Spannungsbereich von 4 bis 12 Volt mit den dadurch resultierenden Massenströmen gemäß Tabelle 28 untersucht. Da dabei eine Vielzahl an Messpunkten aufgenommen wurde, zeigt die nachfolgende Abbildung 59 ausgewählte, normiert dargestellte Messkurven an Tenax[®] Kohlenstofffaser mit 1600 tex unter direkter Belastung (Wasser wird in den Becher geleert) sowie bei Belastungsraten von 15 g/s und 25 g/s. Die so ermittelten Messpunkte können in ein Diagramm "durchschnittliche Spannung (mechanische Belastung) über Faservolumenanteil" überführt werden. Abbildung 60 zeigt das Verhalten der Tenax[®] Kohlenstofffaser mit 1600 tex bei verschiedenen Belastungsraten.

5 Statische Messungen

Deutlich erkennbar ist, dass mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit die Kurven flacher verlaufen, d.h. es werden bei steigender Belastungsgeschwindigkeit bei gleicher Belastung höhere Faservolumenanteile erreicht.

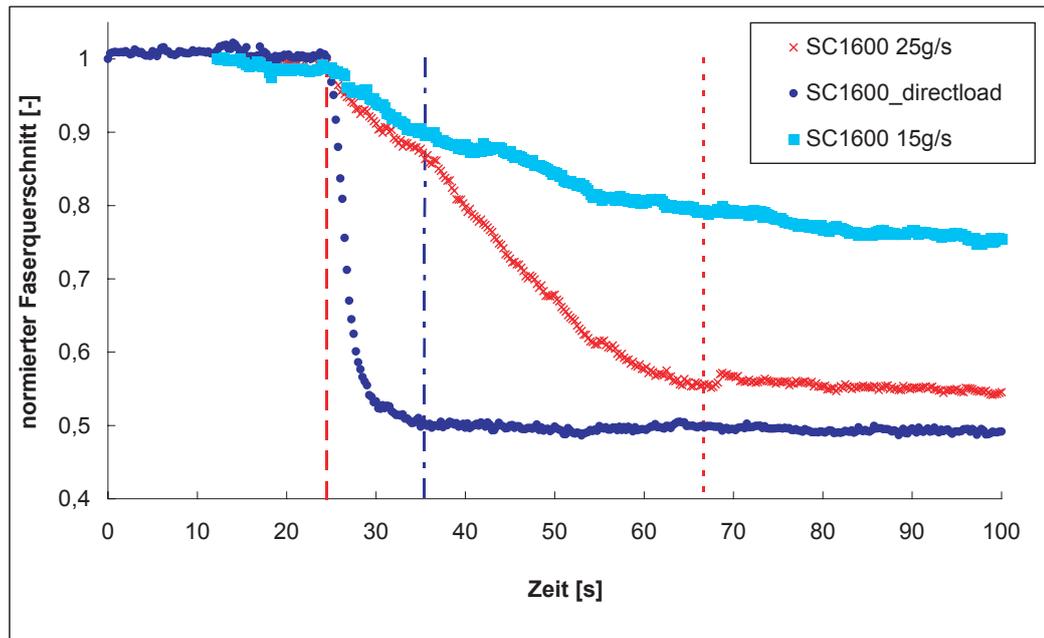


Abbildung 59: Normierte Darstellung der Messergebnisse verschiedene Belastungsraten an Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex

5 Statische Messungen

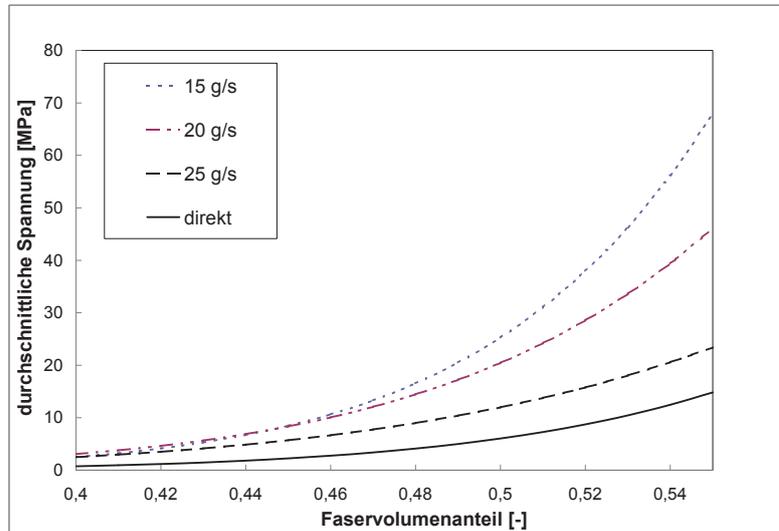


Abbildung 60: Zusammenhang Spannung über Faservolumenanteil bei verschiedenen Belastungsraten an Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex

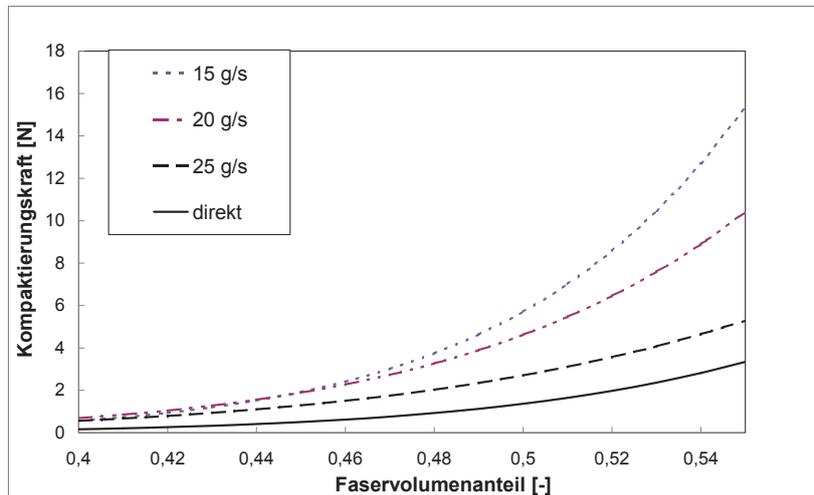


Abbildung 61: Zusammenhang Kompaktierungskraft über Faservolumenanteil bei verschiedenen Belastungsraten an Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex

5.7 Zyklische Versuche an Kohlenstofffaserrovings

Um einen Eindruck über das Kompaktierungsverhaltens von Faserbündeln bei wiederholter Belastung und Entlastung zu bekommen, wurden an Faserbündeln der Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex zwei Versuchsreihen durchgeführt. Im ersten Test wurde die Probe mittels Wasserpumpe kontinuierlich mit Last beaufschlagt. Nach dem Ausschalten des regelbaren Labornetzgerätes lief Wasser durch die Heberwirkung vom am Faserbündel befestigten Becher durch die Pumpe zurück zum Tank. Nach vollständiger Entleerung des Bechers wurde die Pumpe wieder mit Spannung beaufschlagt und das Wasser wieder in den am Faserbündel fixierten Becher gepumpt. Auf diese Art und Weise wurde unter kontinuierlicher Aufzeichnung mittels Lichtschnittsensor der Querschnitt über einen Zeitraum von 1600 Sekunden (entspricht 26,7 Minuten) 6 kompletten Zyklen (Be- und Entlastung) unterzogen, wie in Abbildung 62 dargestellt ist. Dabei ist die größte Abnahme des Querschnittes bei der ersten Belastung erkennbar, danach erholt sich das untersuchte Faserbündel nach Entlastung immer wieder auf Querschnittswerte von rund $1,8 \text{ mm}^2$. Die rot strichlierten Linien stellen den Übergang von der Belastungs zur Entlastungsphase bzw. umgekehrt dar.

In einer weiteren Messreihe wurde an Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex analog zu den statischen Versuchen ein zyklischer Versuch durchgeführt. Beginnend bei 100 g Masse im an der Probe befestigten Becher wurde im Abstand von 5 Minuten die Masse um 200 g erhöht bis zu einer Gesamtmasse von 1100 g. Anschließend wurde im Abstand von 5 Minuten die Masse um 200 g reduziert bis zur Ausgangssituation mit 100 g im Becher. Dieser Prozess wurde 5 mal wiederholt und anschließend ausgewertet. Abbildung 63 zeigt die zyklischen Versuche. Deutlich erkennbar ist, dass im ersten Kompaktierungszyklus eine Zunahme des Faservolumenanteils erfolgt, während die nachfolgenden Zyklen wieder am Ausgangspunkt enden. Die nachfolgende Tabelle 29 zeigt die Messwerte der Versuchsreihe.

5 Statische Messungen

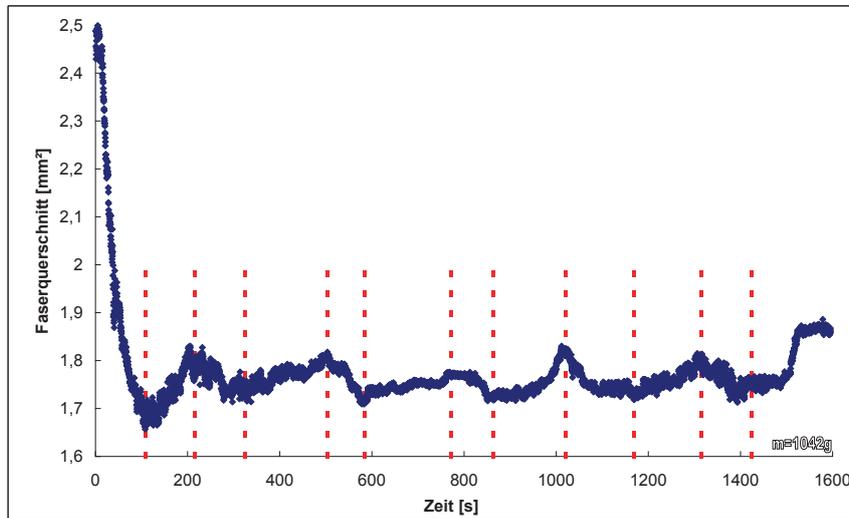


Abbildung 62: zyklische Versuche mittels Wasserpumpe an Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex

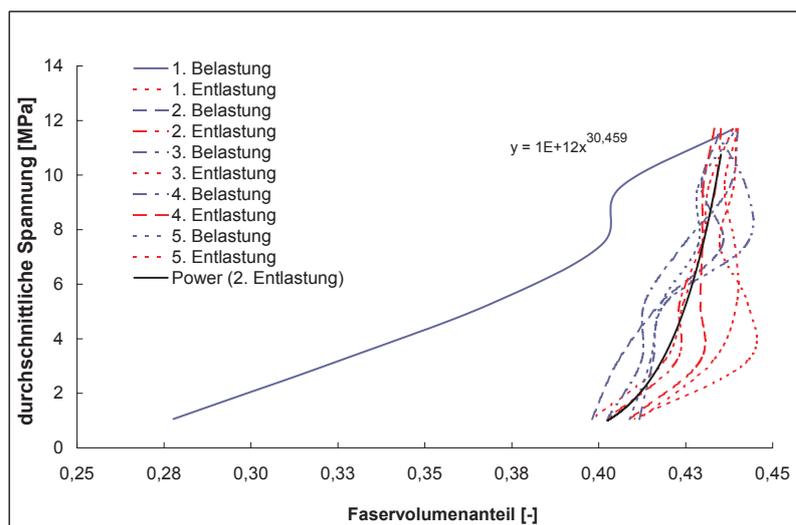


Abbildung 63: zyklische Versuche an Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex

5 Statische Messungen

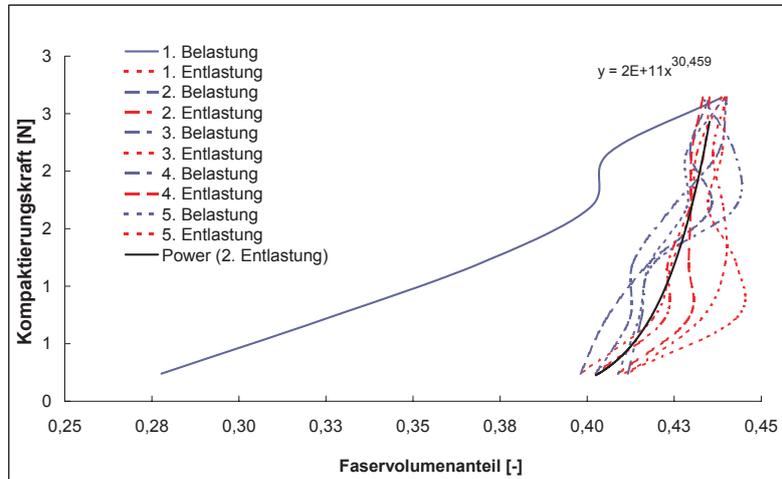


Abbildung 64: zyklische Versuche an Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex

	Faservolumenanteil bei Belastung Nr.				
σ_m [MPa]	1	2	3	4	5
1,062	0,278	0,398	0,402	0,412	0,409
3,186	0,325	0,406	0,412	0,416	0,415
5,311	0,369	0,418	0,413	0,419	0,418
7,435	0,401	0,436	0,424	0,442	0,429
9,559	0,406	0,430	0,438	0,442	0,429
11,684	0,439	0,435	0,440	0,433	0,440
	Faservolumenanteil bei Entlastung Nr.				
σ_m [MPa]	1	2	3	4	5
11,684	0,439	0,435	0,440	0,433	0,440
9,559	0,432	0,434	0,436	0,430	0,439
7,435	0,430	0,429	0,439	0,430	0,435
5,311	0,424	0,423	0,440	0,429	0,443
3,186	0,419	0,422	0,433	0,429	0,443
1,062	0,398	0,402	0,412	0,409	0,410

Tabelle 29: Messwerte der zyklischen Messreihe an Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex

6 Dynamische Versuche an Kohlenstofffaserrovings

Zur Durchführung der dynamischen Versuche wurde der verwendete Prüfstand umgebaut. Um die untersuchten Kohlenstofffaserrovings kontinuierlich über die Messgeometrie zu ziehen und währenddessen den Faserquerschnitt mittels Lichtschnittsensor zu untersuchen, wurde anstelle des Bechers (siehe statische Versuche) eine weitere pneumatische Spannvorrichtung zur Aufnahme einer leeren Spule installiert. Diese Spannvorrichtung wurde über einen Riementrieb und ein Getriebe von einem Elektromotor der Firma Beckhoff angetrieben. Durch eine entsprechende Software konnten verschiedene Abzugsgeschwindigkeiten eingestellt werden. Da bei längeren Versuchen durch das auf der leeren Spule aufgewickelte Fasermaterial der Durchmesser zunahm und sich somit die Geschwindigkeit bei längerem Betrieb erhöht hätte, wurde das Fasermaterial regelmäßig entfernt.

Neben der Abzugsgeschwindigkeit sollte der Einfluss der axialen Zugspannung auf das Kompaktierungsverhalten untersucht werden. Aus diesem Grund wurde eine der Umlenkrollen als Kraftmesssensor ausgeführt. Der Kraftmesssensor gibt die axiale Kraft im Faserbündel ebenfalls über die Software aus. Um eine axiale Kraft einbringen zu können, wurde zusätzlich zur Spule mit dem Faserbündel eine auf ca. 6 cm Breite gekürzte, leere Spule aufgespannt. Über diese Spule und eine Verstrebung des Prüfstandes wurde ein Zurring mit Ratsche gespannt. Durch Festziehen des Gurtes und Verändern des Umschlingungswinkels konnte so eine Riemenbremse geschaffen werden. In weiterer Folge wurde von Tenax[®] Kohlenstofffaserrovings mit 800 tex und 1600 tex bei verschiedenen Abzugsgeschwindigkeiten und verschiedenen axialen Kräften der Faserquerschnitt mittels Lichtschnittsensor vermessen. In Abbildung 65 ist der modifizierte Prüfstand mit zwei Spulen dargestellt.

6 Dynamische Versuche an Kohlenstofffaserrovings

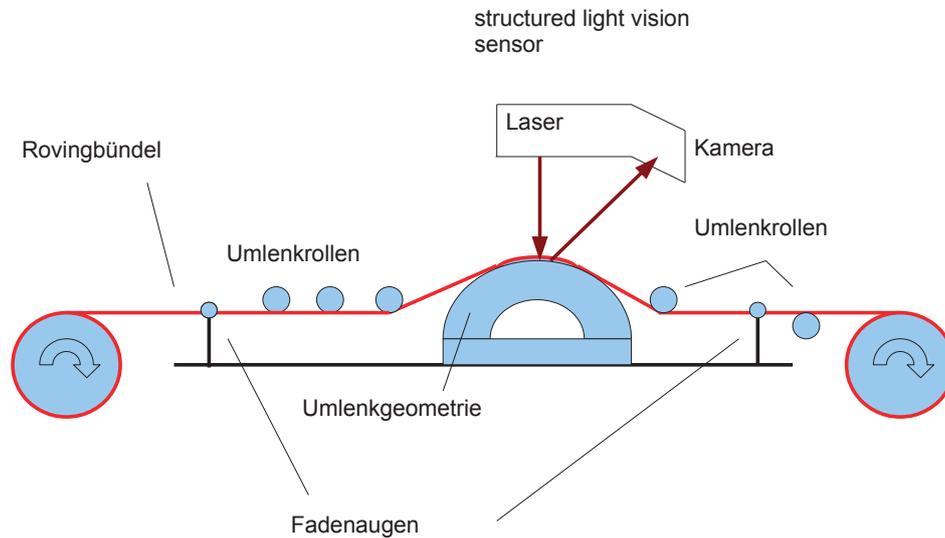


Abbildung 65: Aufbau

Aufgrund des kontinuierlichen Messvorganges wurde eine große Zahl an Messwerten aufgenommen. Die nachfolgende Abbildung 66 zeigt 3 Messreihen an Tenax[®] Kohlenstofffaserroving mit 800 tex bei Abzugsgeschwindigkeiten von 1 bis 200 mm/s und axialen Kräften von 6 N, 40 N und 60 N. Jede der drei Messreihen besteht dabei aus rund 500 bis 700 Einzelmessungen. Gerade bei hohen Geschwindigkeiten nimmt die Reibarbeit an den Umlenkrollen, Fadenaugen und an der Umlenkgeometrie zu, sodass es teilweise zu einem Fressen des Faserbündels an einer Rolle, gefolgt vom Abriss des Faserbündels, kam. Bei geringen Geschwindigkeiten kommt es zu einem Slip-Stick-Effekt: das Faserbündel bewegt sich nicht kontinuierlich über die Messgeometrie sondern ruckartig, wodurch es zu Abweichungen in der axialen Kraft und damit zu einem veränderten Kompaktierungsverhalten kommt. Tabelle 30 zeigt die gemittelten Messwerte, A steht dabei für die ermittelte Querschnittsfläche des Faserbündels, ϕ für den Faservolumenanteil.

6 Dynamische Versuche an Kohlenstofffaserrovings

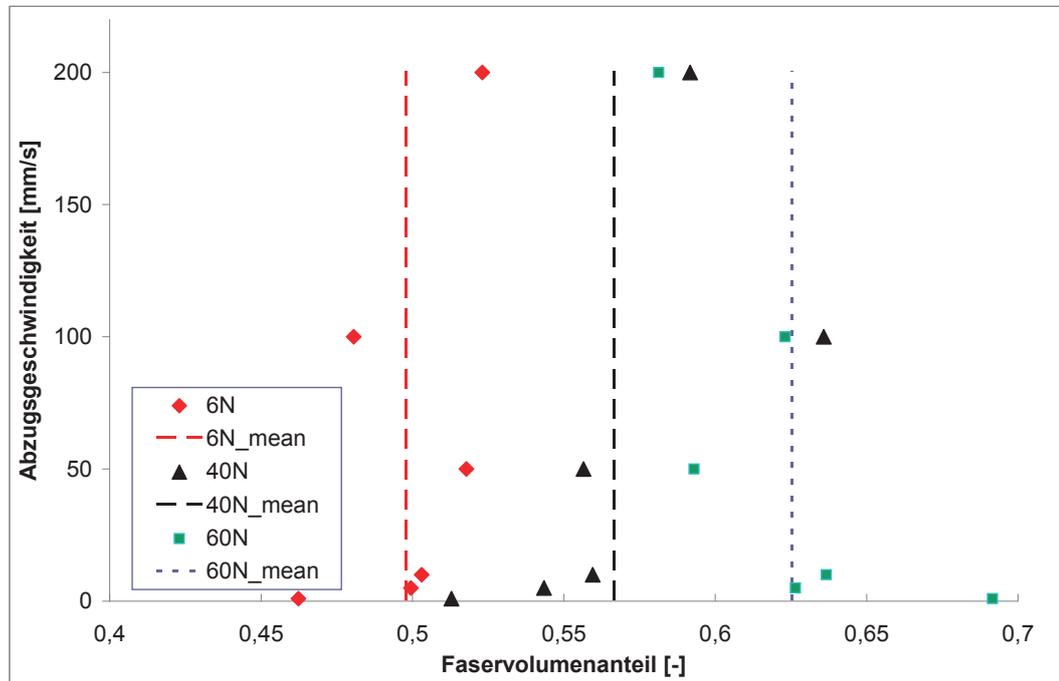


Abbildung 66: dynamische Versuche an Tenax[®] Kohlenstofffaser 800 tex

axiale Kraft	6 N		40 N		60N	
Abzugsgeschwindigkeit [mm/s]	A [mm ²]	ϕ	A [mm ²]	ϕ [-]	A [mm ²]	ϕ [-]
1	0,999	0,462	0,900	0,513	0,668	0,692
5	0,925	0,499	0,850	0,543	0,737	0,627
10	0,918	0,503	0,825	0,560	0,725	0,637
50	0,892	0,518	0,830	0,556	0,779	0,593
100	0,961	0,481	0,726	0,636	0,741	0,623
200	0,883	0,523	0,780	0,592	0,794	0,581

Tabelle 30: Dynamische Messung an Tenax[®] Kohlenstofffaser 800 tex

An Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex wurden zwei dynamische Untersuchungen durchgeführt. Die erste Messreihe mit axialen Kräften von 3 N und 10 N, wie Abbildung 67 zeigt. In einer zweiten Messreihe wurde versucht, die axiale Belastung so zu wählen, dass die Messwerte mit jenen aus den statischen Versuchen vergleichbar sind. Ab-

6 Dynamische Versuche an Kohlenstofffaserrovings

Abbildung 69 zeigt die ermittelte Kurve aus den statischen Versuchen für Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex und die Messwerte aus den dynamischen Versuchen für Abzugsgeschwindigkeiten von 1 mm/s, 5 mm/s, 10 mm/s und 50 mm/s bei axialen Belastungen von 7 N, 9 N und 13 N. Diese dynamischen Messungen beinhalten insgesamt über 5.200 einzelne Messwerte, die gemittelt wurden. In Tabellen 31 und 32 sind die gemittelten Querschnittswerte von jeweils 3 Messreihen a,b und c und deren Mittelwert dargestellt.

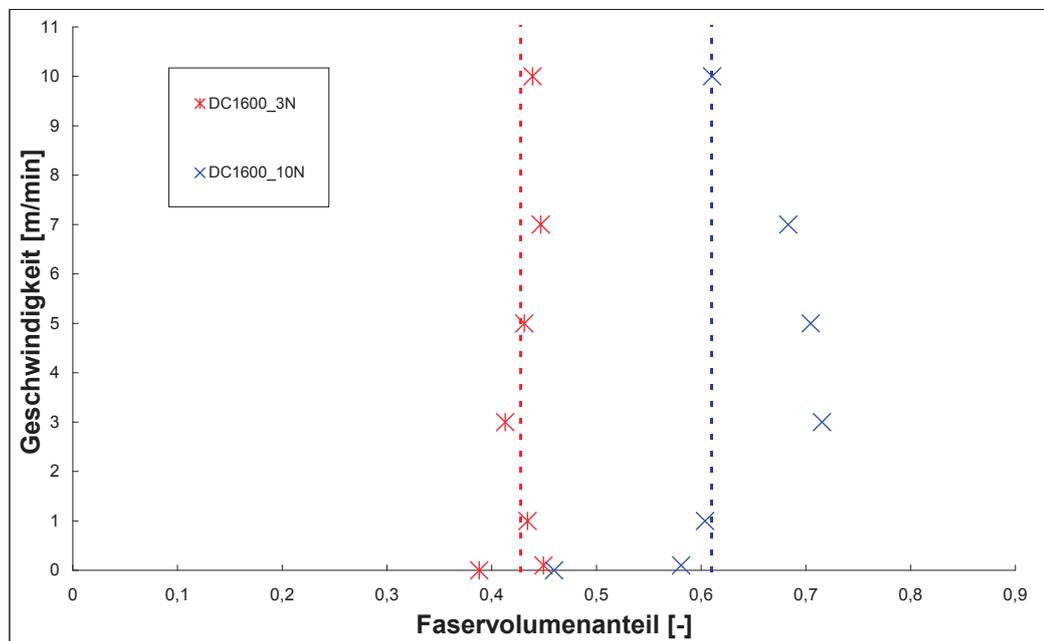


Abbildung 67: dynamische Versuche Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex, 1. Messreihe

6 Dynamische Versuche an Kohlenstofffaserrovings

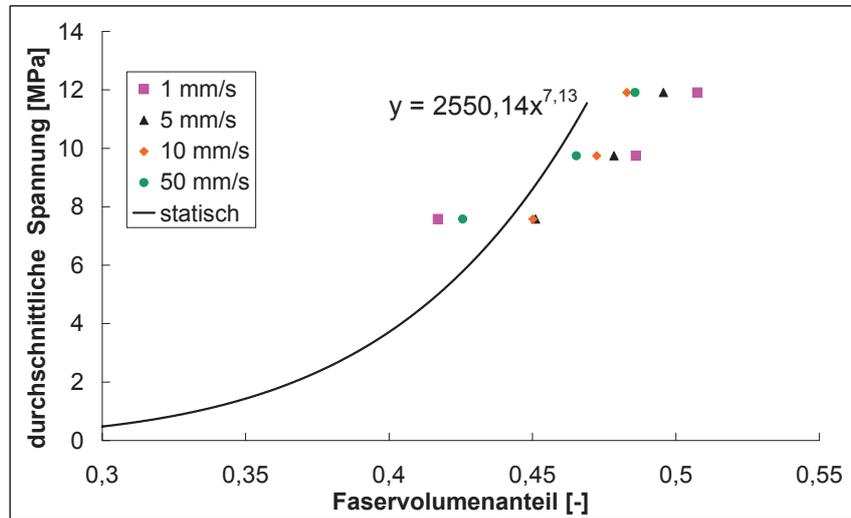


Abbildung 68: dynamische Versuche Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex, 2. Messreihe

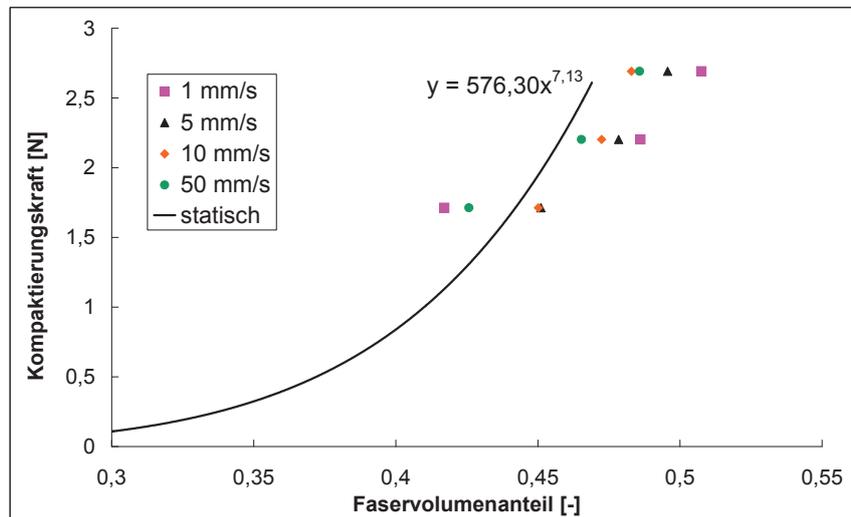


Abbildung 69: dynamische Versuche Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex, 2. Messreihe

6 Dynamische Versuche an Kohlenstofffaserrovings

Ermittelte Querschnittswerte an Kohlenstofffaser Tenax 1600 tex				
	Abzugsgeschwindigkeit [mm/s]			
axiale Kraft	1	5	10	50
7 N a	2,461	1,825	1,867	1,996
7 N b	1,768	1,955	1,935	2,358
7 N c	2,415	2,364	2,354	2,154
7 N mittel	2,215	2,048	2,052	2,170
9 N a	1,815	1,847	1,875	2,057
9 N b	1,986	1,998	2,061	2,034
9 N c	1,900	1,947	1,930	1,864
9 N mittel	1,900	1,931	1,955	1,985
13 N a	1,807	1,870	1,827	1,797
13 N b	1,784	1,817	2,005	1,927
13 N c	1,869	1,903	1,906	1,980
13 N mittel	1,820	1,863	1,913	1,901

Tabelle 31: Gemittelte Querschnittswerte von 3 Messreihen a,b c bei verschiedenen axialen Belastungen an Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex

Querschnitt [mm ²]	Spannung [MPa]	Faservolumenanteil [-]
Messreihe 1 mm/s		
2,215	7,579	0,417
1,900	9,744	0,486
1,820	11,910	0,508
Messreihe 5 mm/s		
2,048	7,579	0,451
1,931	9,744	0,478
1,863	11,910	0,496
Messreihe 10 mm/s		
2,052	7,579	0,450
1,955	9,744	0,472
1,913	11,910	0,483
Messreihe 50 mm/s		
2,170	7,579	0,426
1,985	9,744	0,465
1,901	11,910	0,486

Tabelle 32: Ergebnisse der dynamischen Versuche an Tenax[®] Kohlenstofffaser 1600 tex

7 Untersuchung der geometrischen Form von Faserbündeln

Zur Untersuchung der geometrischen Form von Faserbündeln wurden die Messwerte aus den statischen Experimenten von Kohlenstofffasern herangezogen. Dabei wurden folgende Querschnittsformen mit dem gemessenen Profil verglichen:

1. Trapez
 - a) Trapez durch den höchsten Punkt des Profiles, Steigung über 10 Punkte
 - b) Trapez durch den Mittelwert der 20 höchsten Punkte, Steigung über 10 Punkte
 - c) Trapez durch den höchsten Punkt des Profiles, Steigung über 5 Punkte
 - d) Trapez durch den Mittelwert der 20 höchsten Punkte, Steigung über 5 Punkte
 - e) Flächengleiches Trapez durch höchsten Punkt des Profiles
 - f) Flächengleiches Trapez durch Mittelwert der 20 höchsten Punkte
2. Rechteck
 - a) Flächengleiches Rechteck bei gleicher Breite
 - b) Flächengleiches Rechteck durch gleiche Höhe bei halber Breite
3. Ellipse
 - a) Ellipse durch Maximalwert des Profiles
 - b) Ellipse durch Mittelwert der 20 höchsten Punkte
 - c) Flächengleiche Ellipse

4. Kressegment

- a) Kressegment durch Punkt bei halber Breite
- b) Kressegment durch Maximalwert
- c) Kressegment durch Mittelwert der 10 höchsten Punkte

Die nachfolgenden Abbildungen 70, 71 und 72 zeigen ein Faserprofil und die beschreibenden Geometrien. Im Anhang befinden sich die Quellcodes. Im ersten Schritt wird die Geometrie mathematisch erzeugt, danach wird zu jedem x-Koordinatenwert der Messdatei ein y-Wert der Geometrie errechnet und die prozentuelle Abweichung zum y-Koordinatenwert der Messdatei ermittelt. Ein automatischer Durlauf untersucht so jeden Punkt jeder Messdatei im Inputverzeichnis, speichert das erzeugte grafische Bild im Outputverzeichnis ab und erstellt eine Excel-Liste mit der durchschnittlichen Abweichung eines Punktes der Messgeometrie von der jeweiligen beschreibenden Geometrie. Diese durchschnittlichen Abweichungen wurden über alle untersuchten Profile (über 1000) gemittelt um so jene geometrische Form zu finden, die die Faserbündel am besten beschreibt. Die geometrischen Formen mit der geringsten Abweichung sind in Abbildung 73 dargestellt.

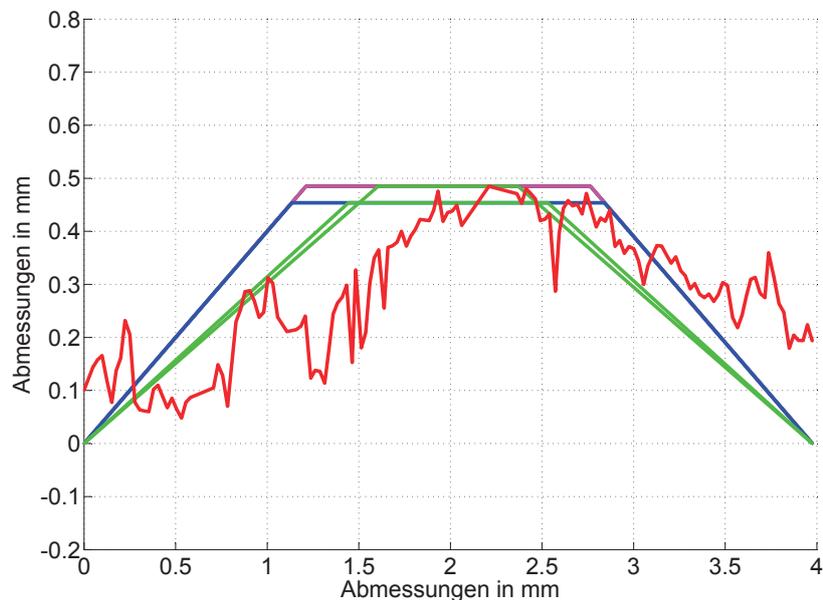


Abbildung 70: Beschreibung der Geometrie von Faserbündeln mittels Trapez

7 Untersuchung der geometrischen Form von Faserbündeln

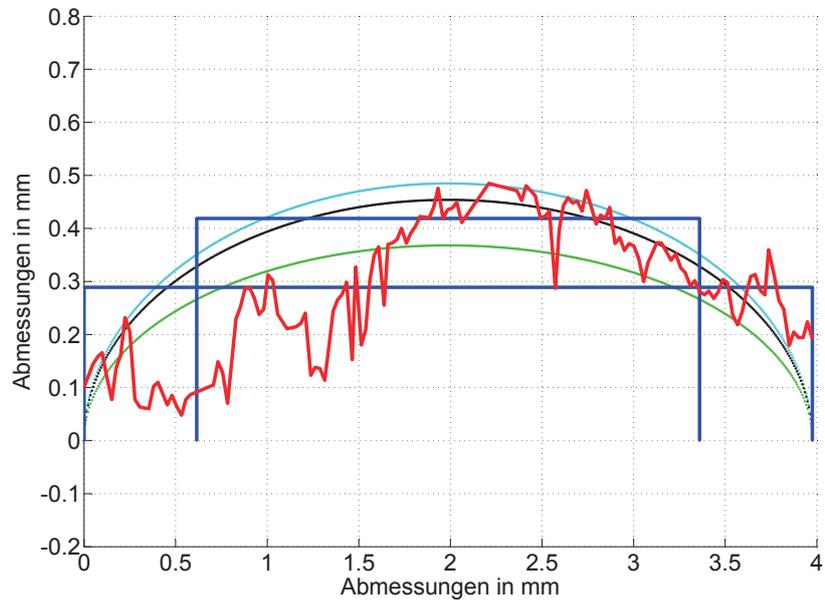


Abbildung 71: Beschreibung der Geometrie von Faserbündeln mittels Ellipse und Rechteck

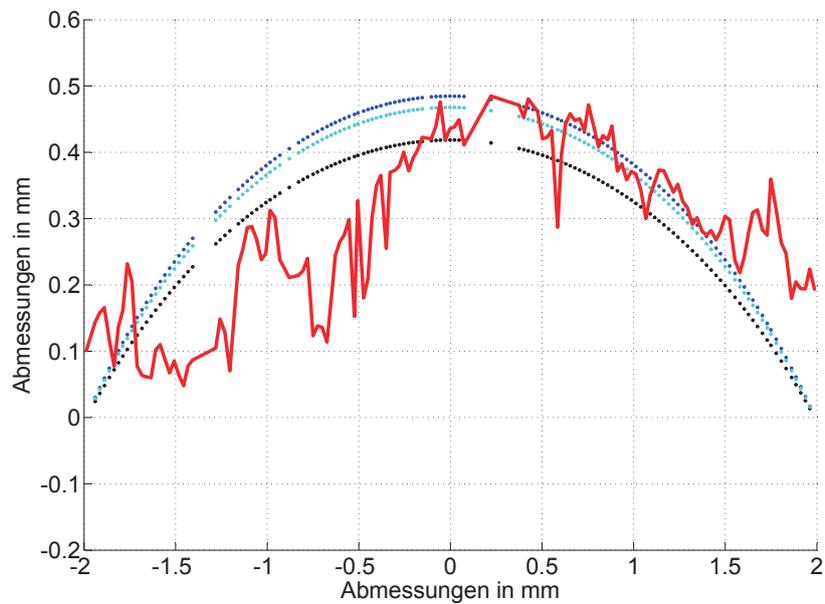


Abbildung 72: Beschreibung der Geometrie von Faserbündeln mittels Kreissegment

7 Untersuchung der geometrischen Form von Faserbündeln

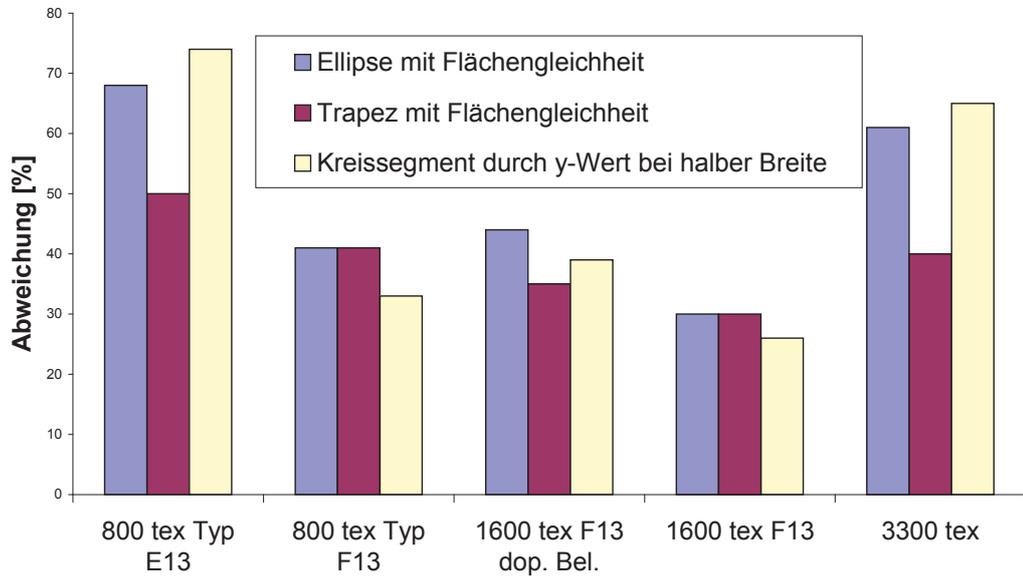


Abbildung 73: Statistische Auswertung der Untersuchung der Geometrie von Faserbündeln

8 Diskussion der Messergebnisse

Es konnte gezeigt werden, dass mittels Lichtschnittsentechnik die Geometrie von Faserbündeln im statischen und dynamischen Versuch vermessen werden können. Durch je eine Messreihe wurden die besten Messparameter für Kohlenstofffasern für Shutter = 50.000 μ s und Gain = 0 und für Glasfasern für Shutter = 700 μ s und Gain = 90 ermittelt. In einem Vergleichsversuch anhand einer Münze wurde die Messgenauigkeit des Systems mit einer Abweichung von 1/100 mm bis 5/100 mm dargestellt. Durch die Beobachtung des Verhaltens von Faserbündeln nach der Beaufschlagung mit der Prüfkraft konnte festgestellt werden, dass ein Großteil der Umlagerungsprozesse im Faserbündel nach etwa 3 bis 5 Minuten abgeschlossen ist. Die Untersuchungen an Glasfaserrovings haben gezeigt, dass transparente Fasern aufgrund der teilweisen Lichtdurchlässigkeit und Reflexion kaum untersucht werden können, schwarz eingefärbte hingegen durchaus. Allerdings sollten diese bereits im Produktionsprozess schwarz eingefärbt werden, da es beim späteren Auftragen von Farbe zum Verkleben der Filamente und damit zu einem anderen Verhalten kommt. Durch das Aufkleben von Aluminium-Aufleimerplatten konnte gezeigt werden, dass die Krafteinleitung mittels Knoten zu einem ähnlichen Messergebnis wie die Krafteinleitung mittels Aufleimer führt. Wie in der Literatur angegeben, zeigt das Material im ersten Kompaktierungszyklus ein anderes Verhalten als im nachfolgenden Zyklus. Dies wurde durch die zyklischen Versuche an Kohlenstofffaserrovings gezeigt. Die nach dem ersten Durchlauf folgenden Zyklen zeigen annähernd identisches Kompaktierungsverhalten wie der 2. Zyklus. Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit wurde ebenfalls, wie in der Literatur angegeben, nachgewiesen: eine hohe Belastungsgeschwindigkeit führt zu einer stärkeren Kompaktierung.

Die statischen Messungen an kontinuierlichen Faserbündeln haben gezeigt, dass das Kompaktierungsverhalten aller untersuchten Fasertypen in Übereinstimmung mit der Literatur mit einem Potenzgesetz (power law function) der Form in Gleichung 8.1 beschrieben werden kann. In Abbildung 74 sind alle Messergebnisse der stati-

8 Diskussion der Messergebnisse

schen Messungen an Kohlenstofffasern dargestellt. Tabelle 33 zeigt den Faktor A in [MPa] und den Exponent n der ermittelten Messkurven sowie Werte aus der Literatur.

$$\sigma = A \cdot V_f^n \quad (8.1)$$

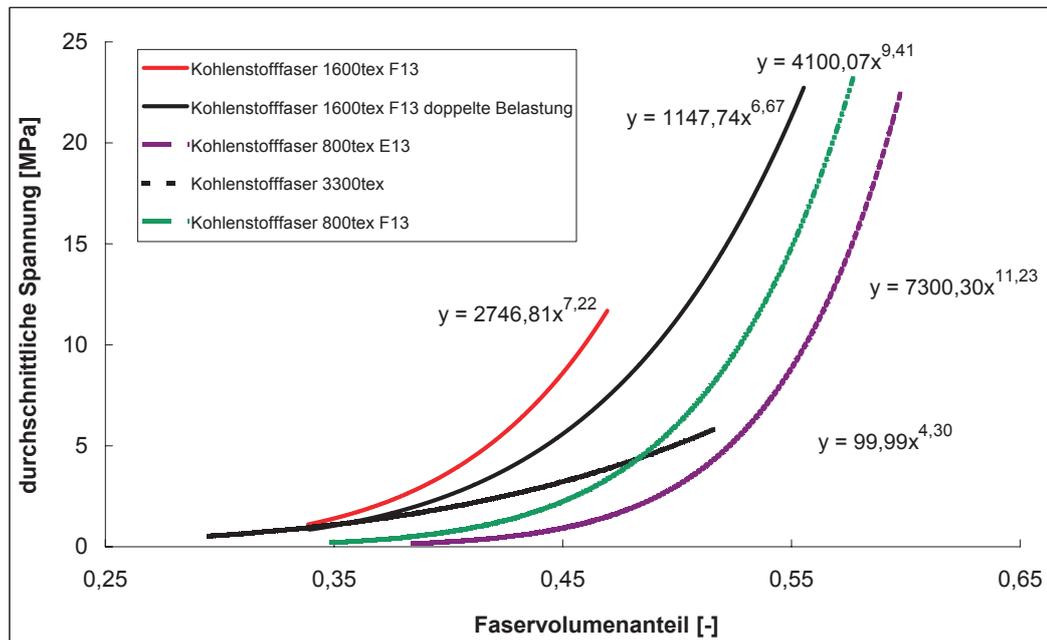


Abbildung 74: Darstellung aller Messergebnisse der statischen Versuche an Kohlenstofffasern

Erkennbar ist auch die Übereinstimmung des in der Literatur von Abdallah [7] angegebenen Faservolumenanteils ϕ von Kohlenstofffaserrovings auf der Spule von rund 31 Prozent. Da die Messreihen an Kohlenstofffaserbündeln mit einer unterschiedlichen Anzahl an Filamenten durchgeführt wurden, lässt sich der Exponent n in einen Zusammenhang mit der Anzahl der Filamente bringen, wie Formel 8.2 zeigt. Die Variable y steht hier für die Anzahl der Filamente. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 75 dargestellt.

8 Diskussion der Messergebnisse

$$y = 544530 \cdot n^{-1,63} \quad (8.2)$$

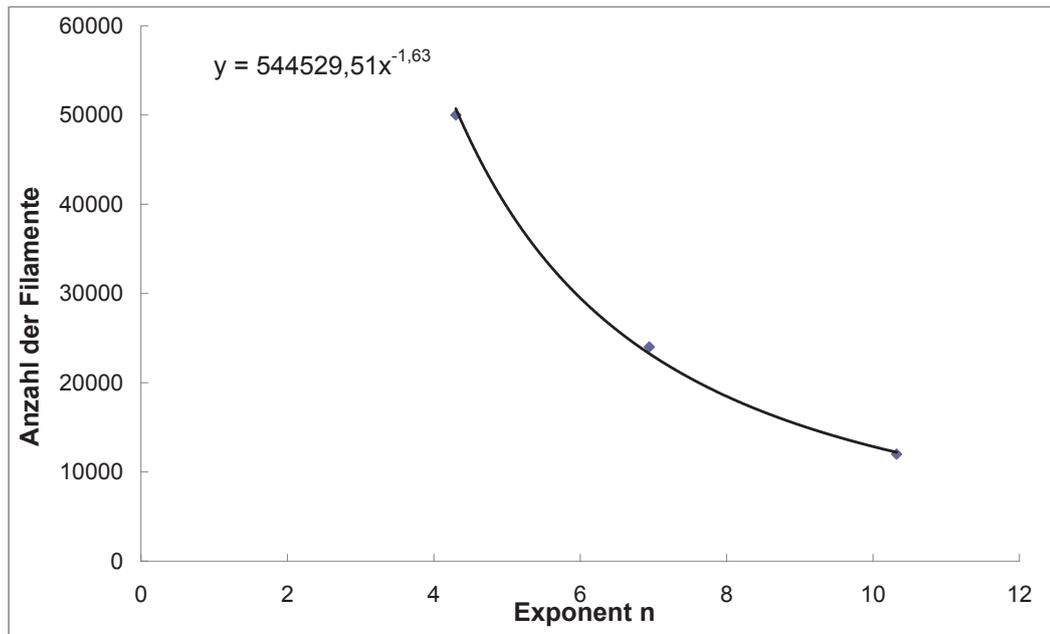


Abbildung 75: Anzahl der Filamente über Exponent n

Betrachtet man alle an Tenax[®] Kohlenstofffasern durchgeführten statischen Einzelmessungen in einem Diagramm wie in Abbildung 76 dargestellt, so erkennt man, dass der Übergang der Kurven fließend ist. Durch Bildung des Mittelwertes der Messkurven von Tenax[®] Kohlenstofffasern mit 800 tex und 1600 tex bei doppelter Belastung lässt sich so über den Mittelwert ein Potenzgesetz nach Gleichung 8.3 bilden, das alle Kohlenstofffasern von Tenax[®] gut beschreibt. Stellt man den Mittelwert der Messkurven von Tenax[®] Kohlenstofffasern mit 800 tex und 1600 tex bei doppelter Belastung in einem Diagramm "Kompaktierungskraft über Faser-volumenanteil" dar, kann man über den Mittelwert ein Potenzgesetz der Form 8.4 bilden.

8 Diskussion der Messergebnisse

$$\sigma = 3208,6 \cdot V_f^{9,02} \quad (8.3)$$

$$F_K = 725,11 \cdot V_f^{9,02} \quad (8.4)$$

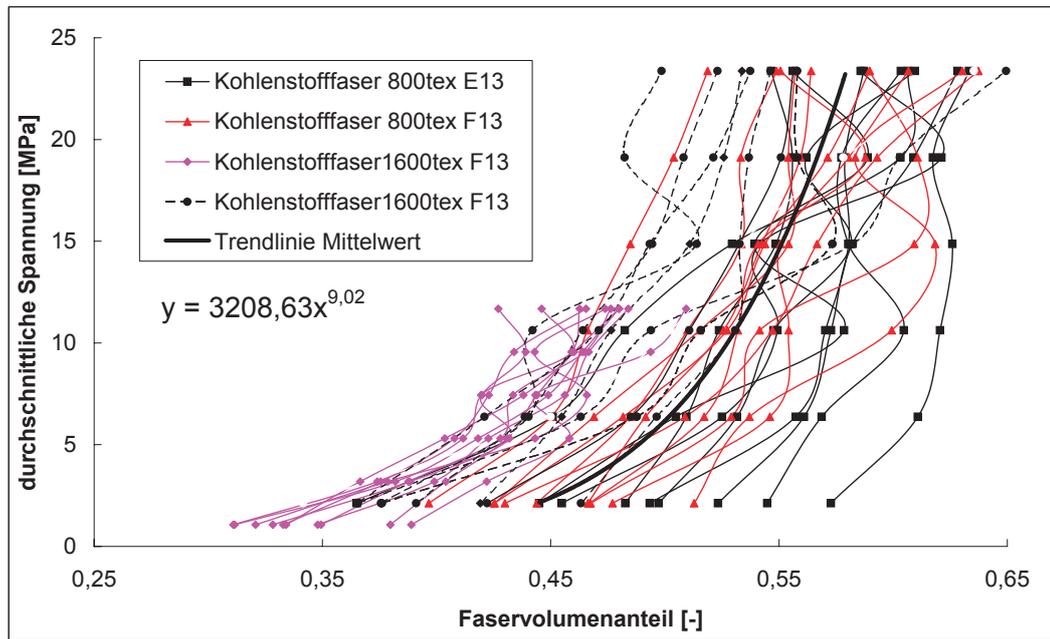


Abbildung 76: Alle Einzelmessungen an Tenax[®] Kohlenstofffaser mit Potenzfunktion

8 Diskussion der Messergebnisse

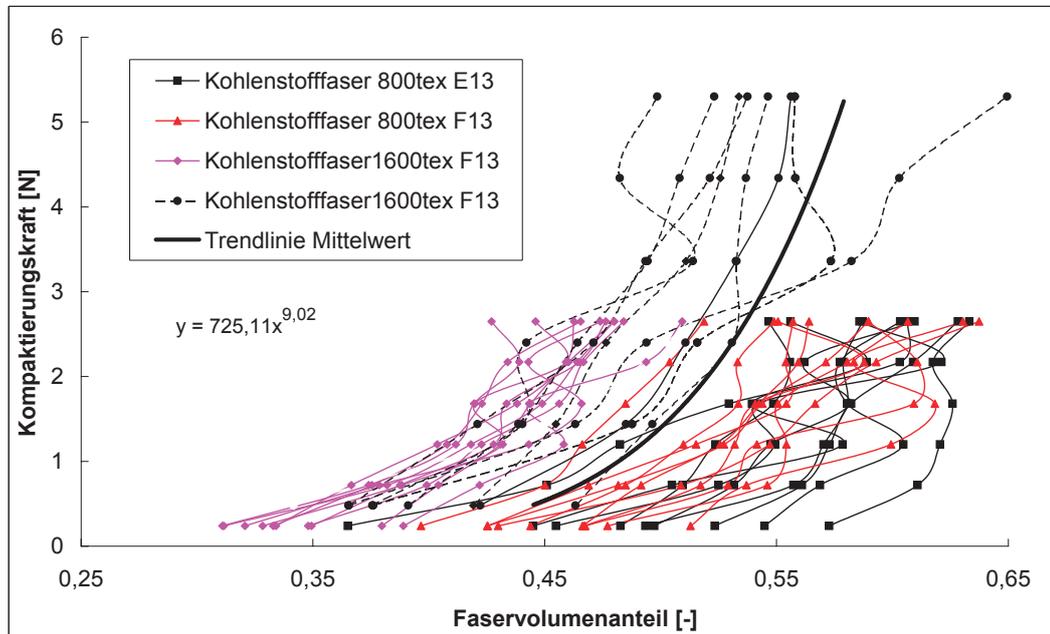


Abbildung 77: Alle Einzelmessungen an Tenax[®] Kohlenstofffaser mit Potenzfunktion

Probe	Faktor A_σ [MPa]	Faktor A_{FK} [N]	Exponent n
Tenax [®] 1600 tex F13	2746,8	627,29	7,22
Tenax [®] 1600 tex F13 dop. Bel.	1147,7	261,64	6,67
Tenax [®] 800 tex E13	7300,3	835,16	11,24
Tenax [®] 800 tex F13	4100,1	468,42	9,41
Sigrafil [®] 3300 tex	99,99	46,98	4,30
Allg. Kohlenstofffasern	3208,6	725,11	9,02
Literaturwerte Kelly [18]	7300		22
Literaturwerte Robitaille [17]			3 - 19
Literaturwerte Saunders [21]	136 - 433		9 - 11
Literaturwerte Pearce [13]	$1,8 - 8,8 \cdot 10^{-3}$		4,8 - 11
Literaturwerte Kim [22, 23]			7 - 15,5

Tabelle 33: Gegenüberstellung der aus den Messungen ermittelte Parameter A und n für Kohlenstofffasern

8 Diskussion der Messergebnisse

Die Unterschiede der ermittelten Parameter A und n zu den in der Literatur angegebenen Parameter resultieren zum Einen aus einem unterschiedlichen Messverfahren. Die in der Literatur angegebenen Werte wurden mittels der in Abbildung 5 dargestellten Apparatur ermittelt. Dabei wurde die zu untersuchende Probe zwischen zwei bewegliche Platten eingelegt und auf einen definierten Druck durch die Bewegung der Platten verdichtet. Anschließend wurde der Abstand konstant gehalten und der Druck gemessen. Dies stellt eine Spannungsrelaxation dar, die Belastung erfolgte normal zur Probe. Im vorliegenden Fall wurde das zu untersuchende Faserbündel mit einer statischen Last beaufschlagt, die Belastung wirkte in Richtung des Faserbündels. Durch die Umlagerungsvorgänge im Faserbündel kommt es zu einer Zunahme der Länge und einer Abnahme des Querschnittes. In diesem Fall liegt Kriechen vor, da die Belastung konstant bleibt und der Querschnitt abnimmt. Während beim Messverfahren aus der Literatur die Probe aus der Form nicht entweichen und sich auch nicht bewegen kann (die Probe ist von allen Seiten eingeschlossen), sind bei der vorliegenden Methode Umlagerungen und zufolge der Längenzunahme auch geringe Bewegungen in axialer Richtung möglich. Mit zunehmender Filamentanzahl wird die Umlagerung stärker behindert, wodurch ein anderes Kompaktierungsverhalten entsteht; die Kompaktierungskurve wird steiler. Da die Umlagerung der einzelnen Filamente unter Reibung stattfindet, spielt auch die Schlichte eine Rolle. Je nachdem, ob die Reibkräfte durch die Schlichte herabgesetzt oder erhöht werden, kann die Umlagerung leichter oder schwerer erfolgen, wodurch die Kompaktierungskurve flacher oder steiler wird (siehe Kapitel 3.2 Kompaktierungsmodell).

Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass in der Literatur hauptsächlich Gewebe und Gelege, im vorliegenden Fall aber nur Rovings, untersucht wurden. Aufgrund der Struktur ist davon auszugehen, dass Gewebe und Gelege ein anderes Kompaktierungsverhalten aufweisen, wie Faserbündel. Die dynamischen Versuche haben gezeigt, dass das Verhalten der bewegten Faserbündel ähnlich dem Verhalten der statischen Bündel ist. Einen Einfluss spielen hier Reibungskräfte, die an der Oberfläche des Faserbündels zu Umlagerungen führen und im Extremfall zum Fressen des Faserbündels an Umlenkrollen oder gar zum Abriss des Faserbündels führen können. Die Untersuchung der Form der Faserbündel hat ergeben, dass diese am besten mit einem Trapez, einer Ellipse oder einem Kreissegment beschrieben werden können. Mit zunehmender Breite werden die Faserbündel immer flacher, so dass die Unterschiede zwischen einer beschreibenden Ellipse, einem beschreibenden Trapez und

8 Diskussion der Messergebnisse

einem beschreibenden Kreissegment nur mehr in den Randbereichen vorhanden sind und im Vergleich zur restlichen Querschnittsfläche immer weniger ins Gewicht fallen. Ein Nachteil bei der Untersuchungsform mittels Lichtschnittsensor ist, dass die Faserbündel an der Unterseite an der Umlenkgeometrie aufliegen müssen, und daher die reale Form des freien Bündels nicht erfasst werden kann. Ein weiterer Effekt, bedingt durch das System, ergibt sich aus dem Rauschen der Referenz (Umlenkgeometrie). Die Umlenkgeometrie, auf der das zu untersuchende Faserbündel liegt, von dem Lichtschnittsensor als wellige Basislinie erfasst. Es ist nur schwierig, festzustellen, wo sich die Umlenkgeometrie tatsächlich befindet, wodurch je nach Breite des Faserbündels mehr oder weniger Querschnittsfläche verloren geht (je breiter das Faserbündel desto größer die Unsicherheit). Auch Schatteneffekte können das Messergebnis beeinflussen: bildet das Faserbündel an der Oberfläche einen "Vorsprung", so kann dieser mittels Lichtschnitttechnik nicht erkannt werden. Diese Effekte erklären, warum die einzelnen Messkurven des gleichen Ausgangsmaterials Schwankungen unterliegen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das in der Literatur beschriebene Kompaktierungsverhalten von kontinuierlichen Faserbündeln durch die Versuche bestätigt werden konnte, die Parameter der Modelle jedoch aufgrund der Unterschiede in den Messmethoden nicht vergleichbar sind. Mittels Potenzgesetz kann das Kompaktierungsverhalten von kontinuierlichen Faserbündeln gut beschrieben werden.

9 Literaturverzeichnis

- [1] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2. Auflage*. Berlin: Springer, 2005.
- [2] H. Darcey, “Les fontaines publiques e la ville e dijon, dalmont, paris,” 1856.
- [3] B. R. Gebart, “Permeability of unidirectional reinforcements for RTM,” *Journal of Composite Materials*, vol. 26, no. 8, pp. 1100–1133, 1992.
- [4] A. Endruweit, F. Gommer, and A. C. Long, “Stochastic analysis of fibre volume fraction and permeability in fibre bundles with random filament arrangement,” *Composites*, no. A49, pp. 109–118, 2013.
- [5] A. Endruweit and A. C. Long, “Influence of stochastic variations in the fibre spacing on the permeability of bi-directional textile fabrics,” *Composites*, no. A37, pp. 679–694, 2006.
- [6] S. Y. Binshan, A. L. Svenson, and L. C. Bank, “Mass and volume fraction properties of pultruded glass fibre-reinforced composites,” *Composites*, vol. 26, no. 10, pp. 725–731, 1995.
- [7] F. Abdallah, M. H. Megat, M. S. Sapuan, and B. B. Sahari, “Determination of volume faction values of filament wound glass and carbon fiber reinforced composites,” *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 3, no. 4, pp. 7–11, 2008.
- [8] G. L. Batch and S. Cumiskey, “Compaction of fiber reinforcements,” *Polymer Composites*, vol. 23, no. 3, pp. 307–318, 2002.
- [9] K. J. Ahn and Seferis J. C., “Simultaneous measurements of permeability and capillary preassure of thermosetting matrices in woven fabric reinforcements,” *Polymer Composites*, vol. 12, no. 3, pp. 146–152, 1991.

9 Literaturverzeichnis

- [10] R. A. Saunders, C. Lekakou, and M. G. Bader, "Compression in the processing of polymer composites 1. a mechanical and microstructural study for different glass fabrics and resins," *Composites Science and Technology*, no. 59, pp. 983–993, 1999.
- [11] Q. Govignon, S. Bickerton, and P. A. Kelly, "Simulation of the reinforcement compaction and resin flow during the complete infusion process," *Composites*, no. A41, pp. 45–57, 2010.
- [12] J. Quinn and J. Randall, "proc. 4th int. conf. fibre-reinforce composites': Institution of mechanical engineers, liverpool," no. C400/046, pp. 105–112, 1990.
- [13] N. Pearce and J. Summerscales, "The compressibility of a reinforcement fabric," *Composites Manufacturing*, vol. 6, no. 1, pp. 15–21, 1995.
- [14] F. Robitaille and R. Gauvin, "Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. III: Reorganization of the fiber network," *Polymer Composites*, vol. 20, no. 1, pp. 48–61, 1999.
- [15] H. F. Mark, *Beiträge zur Kenntnis der Wolle und ihrer Bearbeitung: Experimentelle und methodische Untersuchungen*, ser. Einzeldarstellungen aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Faserstoffchemie. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1925, vol. Heft 1.
- [16] Van Wyk, C. M., "Note on the compressibility of wool," *The Journal of the Textile Institute*, vol. 34, pp. 285–292, 1946.
- [17] F. Robitaille and R. Gauvin, "Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. I: Review of experimental results," *Polymer Composites*, vol. 19, no. 2, pp. 198–216, 1998.
- [18] P. A. Kelly, R. Umer, and S. Bickerton, "Viscoelastic response of dry and wet fibrous materials during infusion process," *Composites*, no. A37, pp. 868–873, 2006.
- [19] S. B. Stankovic, "Compression hysteresis of fibrous systems," *Polymer Engineering and Science*, no. 48, pp. 676–682, 2008.
- [20] Y. Luo and I. Verpoest, "Compressibility and relaxation of a new sandwich textile preform for liquid composite molding," *Polymer Composites*, vol. 20, no. 2, 1999.

9 Literaturverzeichnis

- [21] R. A. Saunders, C. Lekakou, and M. G. Bader, “Compression and microstructure of fibre plain woven cloths in the processing of polymer composites,” *Composites Part A*, no. 29A, pp. 443–454, 1998.
- [22] Y. R. Kim and McCarthy, S. P., Fanucci, J. P., *Polymer Composites*, no. 13, 1991.
- [23] S. Toll, “Packing mechanics of fiber reinforcements,” *Polymer Engineering and Science*, vol. 38, no. 8, pp. 1337–1350, 1998.
- [24] Joubaud L., Achim V., and F. Trochu, “Numerical simulation of resin infusion and reinforcement consolidation under flexible cover,” *Polymer Composites*, vol. 26, no. 4, pp. 417–427, 2004.
- [25] Gutowski, T., G., T. Morigaki, and Z. Cai, “Consolidation of laminate composites,” *Journal of Composite Materials*, vol. 21, no. 2, pp. 172–188, 1987.
- [26] Andersson, H.M., Lundström, T.S., Gebart, B.R., “Numerical model for vacuum infusion manufacturing of polymer composites,” *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, vol. 13, no. 2-3, pp. 383–394, 2003.
- [27] B. Chen, A. H.-D. Cheng, and T.-W. Chou, “A nonlinear compaction model for fibrous preforms,” *Composites*, no. A32, pp. 701–707, 2001.
- [28] M. Chibani, “Dotral thesis, ecole polytechnique de montreal, canada,” 1994.
- [29] T. H. Hou, “Resin flow model for composite prepreg lamination process,” in *ANTEC 86 - Conference Proceedings - Society of Plastics Engineers 44th Annual Technical Conference & Exhibit.; Boston, MA, USA*, pp. 1300–1305.
- [30] Y. Lemenn, “Master’s thesis, ecole polytechnique de montreal, canada,” 1994.
- [31] S. Bickerton, M. J. Buntain, and A. A. Somashekar, “The viscoelastic compression behavior of liquid composite molding preforms,” *Composites*, no. A34, pp. 431–444, 2003.
- [32] A. A. Somashekar, S. Bickerton, and D. Bhattacharyya, “Modelling the viscoelastic stress relaxation of glass fibre reinforcements under constant compaction strain during composites manufacturing,” *Composites*, no. A43, pp. 1044–1052, 2012.
- [33] J. E. Sumerak, *Modern Plastics*, March 1985.

9 Literaturverzeichnis

- [34] L. Trevino, L. J. Lee, K. Rupe, and M. J. Liou, “45th ann. conf., compos inst., soc. plast. ind., 9-,” 1990.
- [35] P. A. Kelly, “A viscoelastic model for the compaction of fibrous materials,” *The Journal of the Textile Institute*, vol. 102, no. 8, pp. 689–699, 2011.
- [36] J. Breard, Y. Henzel, Trochu F., and R. Gauvin, “Analysis of dynamic flows through porous media. part II: Deformation of a double-scale fibrous reinforcement,” *Polymer Composites*, vol. 24, no. 3, pp. 409–421, 2003.
- [37] C. C. Wong, A. C. Long, M. Sherburn, F. Robitaille, P. Harrison, and Rudd, C., D., “Comparisons of novel and efficient approaches for permeability prediction based on the fabric architecture,” *Composites Part A*, vol. 37, no. 6, pp. 847–857, 2006.

10 Tabellenverzeichnis

1	Einteilung der Fasern [1]	3
2	Zusammenhang zwischen der Packungsart und den Parametern c_1 und c_2 zur Ermittlung der Permeabilitäten K_1 und K_2 [4].	7
3	Werte der geometrischen Abmessungen	31
4	Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft	32
5	Beschreibung zu splitter.m	34
6	Beschreibung zu auswertung.m	36
7	Daten der untersuchten Kohlenstofffaserbündel, Quelle: Datenblatt Toho Tenax [®]	40
8	Daten der untersuchten Kohlenstofffaserbündel, Quelle: Datenblatt Sigrafil [®]	40
9	Daten der untersuchten Glasfasern, Quelle: Datenblatt OCV [®] Reinforcements	41
10	Querschnittsflächen der untersuchten Faserbündel	41
11	Kombinationen der Parameter Shutter und Gain	43
12	Messwerte von Kohlenstofffaser Tenax [®] 800 tex Schlichte E13	50
13	Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft	50
14	Messwerte von Kohlenstofffaser Tenax [®] 800 tex Schlichte F13	53
15	Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft	53
16	Messwerte von Kohlenstofffaser Tenax [®] 1600 tex Schlichte F13	55
17	Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft	55
18	Messwerte von Kohlenstofffaser Tenax [®] 1600 tex, doppelte Belastung	58
19	Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft	58
20	Messwerte von Kohlenstofffaser Sigrafilx [®] 3300tex	60
21	Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft	60

10 Tabellenverzeichnis

22	10 Messreihen an Glasfaseroving OCV™Reinforcements 2400 tex . . .	66
23	Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft	66
24	5 Messreihen von eingefärbter Glasfaser OCV™Reinforcements 2400 tex	68
25	Kompaktierungskraft in Abhängigkeit der Gewichtskraft	70
26	6 Proben mit Aufleimer und 2 Vergleichsproben von Tenax® Kohlen- stofffaser 1600 tex	71
27	Technische Daten der verwendeten Wasserpumpe	73
28	Volumenstrom der verwendeten Pumpe bei verschiedenen elektrischen Spannungen	73
29	Messwerte der zyklischen Messreihe an Tenax® Kohlenstofffaser 1600 tex	79
30	Dynamische Messung an Tenax® Kohlenstofffaser 800 tex	82
31	Gemittelte Querschnittswerte von 3 Messreihen a,b c bei verschiede- nen axialen Belastungen an Tenax® Kohlenstofffaser 1600 tex	85
32	Ergebnisse der dynamischen Versuche an Tenax® Kohlenstofffaser 1600 tex	85
33	Gegenüberstellung der aus den Messungen ermittelte Parameter A und n für Kohlenstofffasern	94

11 Abbildungsverzeichnis

1	Glasfaserroving (links) und Kohlenstofffaserroving (rechts)	3
2	Kompaktierungsverhalten eines idealen Faserbündels	5
3	Quadratische und hexagonales Packungsmodell für Faserbündel.	8
4	Modell von Chen et al. mit zwei linearen Randbereichen und einem nichtlinearen Bereich in der Mitte [27].	13
5	Prüfapparatur von Robitaille / Gauvin zur Bestimmung des Kompaktierungsverhalten von Geweben [17].	14
6	Mögliche Messkurven (unten) und Änderung des Abstandes h der Platte (oben) [31].	15
7	Kompaktierungsmodell von Batch, Cumiskey und Macosko [8]	17
8	Feder-Dämpfer Modell von P.A. Kelly zur Charakterisierung des viskoelastischen Verhaltens [35]	20
9	Spannungs-Dehnungskurve mit verschiedenen Dehnraten und Masterkurve [35].	23
10	Schematische Darstellung der Lichtschnitttechnik	25
11	Schematischer Aufbau des Prüfstandes	26
12	Trapezförmiges Messfenster der Kamera	27
13	Um 180° gedrehte Aufnahme eines Faserbündels mittels Lichtschnitttechnik	29
14	Um 180° gedrehter beschnittener Bildausschnitt mit Faserbündel	29
15	2D-Profil eines Kohlenstofffaserrovings	30
16	Situation am Prüfstand mit den geometrischen Abmessungen	31
17	Kräfte an der Umlenkgeometrie	32
18	Veränderung der Geometrie des Faserbündels bei Belastung	32
19	Behinderung der Entwellung der Faserbündel durch Reibung	33
20	Extrahiertes Faserprofil	37

11 Abbildungsverzeichnis

21	Faserquerschnitt bei 100 g Belastung (rot) und 1100 g (blau) eines 1600 tex Kohlenstofffaserrovings	39
22	Störpunkte im Messprofil durch schlecht gewählte Messparameter . .	43
23	Kraterbildung am Ende des Faserbündels durch schlecht gewählte Messparameter	43
24	Fehlende Messpunkte durch schlecht gewählte Messparameter	43
25	Glasfaser 2400 tex: Shutter = 700 μ s und verschiedene Werte für Gain	45
26	Glasfaser 2400 tex: Gain = 90 und verschiedene Werte für Shutter . .	45
27	Messergebniss der 2-Euro-Centmünze	46
28	5 Messreihen an Kohlenstofffaser Tenax [®] 800 tex mit 100 g Belastung	48
29	5 Messreihen an Kohlenstofffaser Tenax [®] 800 tex mit 300 g Belastung	48
30	10 Messreihen Kohlenstofffaser Tenax [®] 800 tex mit Schlichte E13 . .	51
31	Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax [®] 800 tex mit Schlichte E13	51
32	Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax [®] 800 tex mit Schlichte E13	52
33	10 Messreihen Kohlenstofffaser Tenax [®] 800 tex mit Schlichte F13 . .	53
34	Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax [®] 800 tex mit Schlichte F13	54
35	Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax [®] 800 tex mit Schlichte F13	54
36	10 Messreihen Kohlenstofffaser Tenax [®] 1600 tex mit Schlichte F13 . .	56
37	Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax [®] 1600 tex mit Schlichte F13	56
38	Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax [®] 1600 tex mit Schlichte F13	57
39	10 Messreihen Kohlenstofffaser Tenax [®] 1600 tex, doppelte Belastung	58
40	Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax [®] 1600 tex, doppelte Belastung . .	59
41	Trendlinie Kohlenstofffaser Tenax [®] 1600 tex, doppelte Belastung . .	59
42	5 Messreihen von Kohlenstofffaser Sigrafil [®] 3300 tex	61
43	Trendlinie Kohlenstofffaser Sigrafil [®] 3300 tex	61
44	Trendlinie Kohlenstofffaser Sigrafil [®] 3300 tex	62
45	Faserverteilungsverhältnis FDBR	63
46	Alle untersuchten Kohlenstofffaserrovings im Vergleich	63
47	Alle untersuchten Kohlenstofffaserrovings im Vergleich	64
48	Faserverteilungsverhältnis der verschiedenen untersuchten Rovings . .	64
49	Faserverteilungsverhältnis der verschiedenen untersuchten Rovings . .	65
50	10 Messreihen von Glasfaser OCV [™] Reinforcements 2400 tex	67
51	Trendlinie Glasfaser OCV [™] Reinforcements 2400 tex	67
52	5 Messreihen eingefärbte Glasfaser OCV [™] Reinforcements 2400 tex . .	68

11 Abbildungsverzeichnis

53	Trendlinien eingefärbter und transparenter Glasfasern	69
54	Trendlinien eingefärbter und transparenter Glasfasern	69
55	8 Statische Versuche mit und ohne Aufleimer an Tenax [®] Kohlenstoff- faser 1600 tex	71
56	Trendlinie statischer Versuche mit Aufleimer an Tenax [®] Kohlenstofffaser 1600 tex	72
57	Trendlinie statischer Versuche mit Aufleimer an Tenax [®] Kohlenstofffaser 1600 tex	72
58	Volumenstrom der verwendeten Pumpe bei verschiedenen elektrischen- Spannungen	74
59	Normierte Darstellung der Messergebnisse verschiedene Belastungs- raten an Tenax [®] Kohlenstofffaser 1600 tex	75
60	Zusammenhang Spannung über Faservolumenanteil bei verschiedenen Belastungsraten an Tenax [®] Kohlenstofffaser 1600 tex	76
61	Zusammenhang Kompaktierungskraft über Faservolumenanteil bei verschiedenen Belastungsraten an Tenax [®] Kohlenstofffaser 1600 tex .	76
62	zyklische Versuche mittels Wasserpumpe an Tenax [®] Kohlenstofffaser 1600 tex	78
63	zyklische Versuche an Tenax [®] Kohlenstofffaser 1600 tex	78
64	zyklische Versuche an Tenax [®] Kohlenstofffaser 1600 tex	79
65	Aufbau	81
66	dynamische Versuche an Tenax [®] Kohlenstofffaser 800 tex	82
67	dynamische Versuche Tenax [®] Kohlenstofffaser 1600 tex, 1. Messreihe	83
68	dynamische Versuche Tenax [®] Kohlenstofffaser 1600 tex, 2. Messreihe	84
69	dynamische Versuche Tenax [®] Kohlenstofffaser 1600 tex, 2. Messreihe	84
70	Beschreibung der Geometrie von Faserbündeln mittels Trapez	87
71	Beschreibung der Geometrie von Faserbündeln mittels Ellipse und Rechteck	88
72	Beschreibung der Geometrie von Faserbündeln mittels Kreissegment .	88
73	Statistische Auswertung der Untersuchung der Geometrie von Fa- serbündeln	89
74	Darstellung aller Messergebnisse der statischen Versuche an Kohlen- stofffasern	91

11 *Abbildungsverzeichnis*

75	Anzahl der Filamente über Exponent n	92
76	Alle Einzelmessungen an Tenax [®] Kohlenstofffaser mit Potenzfunktion	93
77	Alle Einzelmessungen an Tenax [®] Kohlenstofffaser mit Potenzfunktion	94

12 Anhang

Die nachfolgenden Seiten enthalten den Quellcode für:

1. splitter.m
2. auswertung.m
3. trapez.m
4. ellipse.m
5. kreisbogen.m

12 Anhang

25.05.15 12:16 C:\Dokumente und Einstellun...\splitter.m 1 of 1

```
%
%% (c) STEINER Hermann
% Stand: März 2015
% Dieses m.file zerteilt ein Messfile in Einzelfiles
%
close all;
clear;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Definition der Verzeichnisse
verzeichnis = 'input/';      % Verzeichnis für Messwerte
output = 'output/';        % Verzeichnis für Resultate Fläche
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
files = dir(verzeichnis);    % Alle Dateien im Verzeichnis lesen
names = {files.name};      % Namen der Dateien im Verzeichnis abspeichern
names = names(3:end);      % zwei leere Einträge löschen
anzahlfiles=length(names); % Anzahl der Dateien feststellen
%
for filenumber=1:anzahlfiles % Anfang 1. for Schleife
%%Verzeichnispfad zusammensetzen:
filename = strcat(verzeichnis, names{filenumber});
M=dlmread(filename);      % Einlesen der Punkte aus Datei *.txt
%
number=0;                 % Hilfsvariablen deklarieren
zaehler=1;
zeilen=size(M);
%
for i=1:zeilen(1);        % Anfang 2. for Schleife
%
number                   % Ausgabe des Fortschrittes
if M(i,2)==number        % Alle Zeilen der Messdatei, die zur
    K(zaehler,1)=M(i,1); % Laufvariable gehören in Matrix schreiben
    K(zaehler,2)=M(i,2);
    K(zaehler,3)=M(i,3);
    K(zaehler,4)=M(i,4);
    zaehler=zaehler+1;
end
if M(i,2)>number          % Überprüfen ob Ende der Messdaten mit dieser
    number=number+1;     % Laufvariable erreicht, Laufvariable erhöhen
    i=i-1;
%
% Speicherverzeichnis zusammensetzen
speicherverzeichnis=strcat(output, names{filenumber}, int2str(number-1),'.txt');
speicherverzeichnis      % Speicherverzeichnis ausgeben
dlmwrite(speicherverzeichnis,K) % Speichern
zaehler=1;               % Wert zurücksetzen
K=[];                    % Matrix zurücksetzen
end
%
end                       % Ende 2. for Schleife
end                       % Ende 1. for Schleife
%end of script
```

12 Anhang

25.05.15 12:14 C:\Dokumente und Einstell...\auswertung.m 1 of 5

```
%
%% (c) STEINER Hermann
% Dieses m.file errechnet die Flaeche unter einer Punktkurve
%
close all;
clear;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Definition der Verzeichnisse
verzeichnis = 'messwerte/';          % Verzeichnis für Messwerte
output = 'ergebnisse/ergebnis/';    % Verzeichnis für Resultate Fläche
output2 = 'ergebnisse_matrix/ergebnisMatrix/'; % Verzeichnis für Resultate Matrix
figuren = 'figuren/';              % Verzeichnis für Figuren
figuren2 = 'figuren_ausgewertet/';  % Verzeichnis für ausgewertete Figuren
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
n=10;    % Anzahl der Werte auf beiden Seiten zur Bestimmung der Steigung
m=10;    % Anzahl der Werte auf beiden Seiten zur Bestimmung der Absenkung
grenze_oben=42; % Wert über dem der Messwert als Störung behandelt wird
grenze_unten=39; % Wert unter dem der Messwert als Störung behandelt wird
s=6;     % Anzahl der untersuchten Punkte für Start der Faser
t=6;     % Anzahl der untersuchten Punkte für Ende der Faser
r=10;    % Werte für Schwellenwert
threshold=0.06; % Start-Wert zum Finden des Anfangs des Faserbündels
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tic          % Zeitmessung starten
%%
%
files = dir(verzeichnis); % Alle Dateien im Verzeichnis lesen
names = {files.name};    % Namen der Dateien im Verzeichnis abspeichern
names = names(3:end);    % zwei leere Einträge löschen
anzahlfiles=length(names); % Anzahl der Dateien feststellen
%
for filenumber=1:anzahlfiles % Anfang 1. for Schleife
%
textausgabe = strcat(int2str(filenumber), ' von ', int2str(anzahlfiles))
%
filename = strcat(verzeichnis, names{filenumber}); %Verzeichnispfad zusammensetzen
M=dlmread(filename); % Einlesen der Punkte aus Datei *.txt
M(:,2) = []; % zweite Spalte mit Nullen löschen
M(:,3) = []; % vierte Spalte mit Nullen löschen
S= sortrows(M, 1); % Sortieren der Matrix nach x-Spalte
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
S(find(S(:,2)>=grenze_oben),:)=[]; % Extremwerte wegfiltern
S(find(S(:,2)<=grenze_unten),:)=[];
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
K = size (S); % Anzahl der Zeilen herausfinden
zeilen = K(1); % K(1) = Anzahl Zeilen
H=S; % Hilfsmatrix
d=0;
```

12 Anhang

25.05.15 12:14 C:\Dokumente und Einstell...\auswertung.m 2 of 5

```
for i=1:m
d=d+H(i,2)+H(zeilen-i,2); % Aufsummieren
end
d=d/(2*m); % Mittelwertbildung
%
%
deltax=0;
deltay=0;
for i=1:n
deltax=deltax+(H(i,1)-H(zeilen-i,1)); % Aufsummieren
deltay=deltay+(H(i,2)-H(zeilen-i,2)); % Aufsummieren
end
deltaxmittel=deltax/n; % Mittelwertbildung
deltaymittel=deltay/n; % Mittelwertbildung
%
k=deltaymittel/deltaxmittel;
%
%
for i=1:zeilen % Anfang 2. for-Schleife
y=k*H(i,1)+d; % Geradengleichung zur Verschiebung und Drehung
H(i,2)=H(i,2)-y;
end % Ende 2. for-Schleife
%
d=0;
for i=1:m % Erneutes Kalibrieren in y-Richtung
d=d+H(i,2)+H(zeilen-i,2); % Aufsummieren
end
d=d/(2*m); % Mittelwertbildung
%
for i=1:zeilen % Anfang 2. for-Schleife
H(i,2)=H(i,2)-d;
end % Ende 2. for-Schleife
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Auswertung
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
grenze1=0; % Hilfsvariable, falls keine Anfang gefunden wird
grenze2=0; % Hilfsvariable, falls kein Ende gefunden wird
schwelle=0;
for i=1:r
schwelle=schwelle+H(i,2);
end
schwelle=schwelle/r;
schwelle=schwelle+threshold;
%
found1=0;
startrow=1;
for e=1:zeilen
if H(e,2)> schwelle && found1<1
grenze1=H(e,1);
found1=1;
startrow=e;
end
end
```

12 Anhang

25.05.15 12:14 C:\Dokumente und Einstell...\auswertung.m 3 of 5

```
end
end
%
found1=0;
for i=0:s
if (startrow-i-1)>0
    if H(startrow-i,2)>H(startrow-i-1,2)&&found1<1
        grenze1=H(startrow-i-1,1);
        end
        if H(startrow-i,2)<H(startrow-i-1,2)
            found1=1;
        end
end
end
%
found2=0;
endrow=1;
for f=zeilen:-1:1
    if H(f,2)> schwelle && found2<1
        grenze2=H(f,1);
        found2=1;
        endrow=f;
    end
end
%
found2=0;
maxel=size(H);
for i=0:t
    if (endrow+i)<maxel(1)
        if H(endrow+i,2)>H(endrow+i+1,2)&&found2<1
            grenze2=H(endrow+i+1,1);
            end

            if H(endrow+i,2)<H(endrow+i+1,2);
                found2=1;
            end
        end
end
end
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
L=H; % Hilfsvariable
L(L(:,1)<grenze1,:)=[]; % Löschen von nicht benötigten Elementen aus Matrix
L(L(:,1)>grenze2,:)=[]; % Löschen von nicht benötigten Elementen aus Matrix
%
K2 = size (L); % Anzahl der Zeilen herausfinden
zeilenL = K2(1); % K(1) = Anzahl Zeilen
%
for b=1:zeilenL
    if L(b,2)<0
        L(b,2)=0;
    end
end
end
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

12 Anhang

25.05.15 12:14 C:\Dokumente und Einstell...\auswertung.m 4 of 5

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
hold on; % Punkte von Messdatei ausgeben in Diagramm
plot(H(:,1),H(:,2),'-b. ');
axis('equal')
hold off;
grid on
%
area = 0; % Startwert für Flächenberechnung
R = size(L); % Anzahl der Zeilen herausfinden
zeilen2 = R(1); % K(1) = Anzahl Zeilen
%
hold on; % Punkte von Messdaten ausgeben in Diagramm
plot(L(:,1),L(:,2),'-r. ');
xlabel('Abmessungen in mm');
ylabel('Abmessungen in mm');
axis('equal')
%
hold off;
title(names{filenummer});
grid on
%
%
xzero=L(1,1); % Verschiebung zu x=0
hoehe=0;
for p=1:zeilen2
    L(p,1)=L(p,1)-xzero;
%
end
for q = 1:(zeilen2-1) % Anfang for - Schleife
%
deltax = L(q+1,1)-L(q,1); % Breite des Streifens zwischen zwei Elem.
ypos = (L(q+1,2)+L(q,2))/2; % Mittlerer y-Wert des Streifens
%
area = area + (deltax * ypos); % Fläche des Streifens
hoehe=hoehe+L(q,2);
%
end % Ende for - Schleife
%
breite=L(zeilen2,1);
hoehe=hoehe/zeilen2;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% %Verzeichnispfade zusammensetzen und abspeichern
figurverzeichnis=strcat(figuren, names{filenummer});
endung='.jpg';
figurverzeichnis=strcat(figurverzeichnis, endung);
print(figure(1), '-djpeg', figurverzeichnis);
endung='.fig';
figurverzeichnis=strcat(figurverzeichnis, endung);
%savefig(figurverzeichnis);
%
format long
speicherverzeichnis=strcat(output, names{filenummer});
dlmwrite(speicherverzeichnis,area,'precision', 20);
```

12 Anhang

25.05.15 12:14 C:\Dokumente und Einstell...\auswertung.m 5 of 5

```
speicherverzeichnis=strcat(output2, names{filenummer});
dlmwrite(speicherverzeichnis,L,'precision', 20);
clf
% Punkte von beschnittenen Messdaten ausgeben in Diagramm
hold on;
plot(L(:,1),L(:,2),'-r. ');
xlabel('Abmessungen in mm');
ylabel('Abmessungen in mm');
axis('equal')
hold off
title(names{filenummer});
grid on
% Verzeichnispfade zusammensetzen und abspeichern
figurverzeichnis=strcat(figuren2, names{filenummer});
endung='.jpg';
figurverzeichnis=strcat(figurverzeichnis, endung);
print(figure(1), '-djpeg', figurverzeichnis);
endung='.fig';
figurverzeichnis=strcat(figurverzeichnis, endung);
%savefig(figurverzeichnis);
clf
%
stringname=names{filenummer};%
anzahl=numel(stringname);
stringname(anzahl)=[];
stringname(anzahl-1)=[];
stringname(anzahl-2)=[];
stringname(anzahl-3)=[];
%
ERG(filenummer+1,1)={names{filenummer}};
ERG(filenummer+1,2)={area};
ERG(filenummer+1,3)={stringname};
ERG(filenummer+1,4)={breite};
ERG(filenummer+1,5)={hoehe};
%
area
toc
end % Ende 1. for-Schleife
%
ERG(1,1)={'Dateiname'};
ERG(1,2)={'Berechnete Flaeche'};
ERG(1,3)={'Filenummer'};
ERG(1,4)={'Breite'};
ERG(1,5)={'durchschnittliche Höhe'};
xlswrite('ergebnisse.xls', ERG); % Abspeichern der Flächenwertematrix
%
%end of script
%
```

12 Anhang

02.06.15 22:06 C:\Dokumente und Einstellung... \trapez.m 1 of 8

```
%
%
% Dieses m.file ermittelt die Geometrie der ermittelten Ergebnisse
%
close all;
clear;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Definition der Verzeichnisse
verzeichnis = 'input/';      % Verzeichnis für Messwerte
figuren = 'output/';        % Verzeichnis für Figuren
n=10;                        % Anzahl der Punkte zur Ermittlung der Steigung
r=20;                        % Anzahl der Maximalwerte zur Ermittlung der Höhe
grenze=0.4                   % Grenzwert fuer Steigung
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tic                          % Zeitmessung starten
%
%
files = dir(verzeichnis);    % Alle Dateien im Verzeichnis lesen
names = {files.name};       % Namen der Dateien im Verzeichnis abspeichern
%
names = names(3:end);       % zwei leere Einträge löschen
%
anzahlfiles=length(names);  % Anzahl der Dateien feststellen
%
for filennummer=1:anzahlfiles % Anfang 1. for Schleife
%
textausgabe = strcat(int2str(filennummer), '_von_', int2str(anzahlfiles))
%
filename = strcat(verzeichnis, names{filennummer}); %Verzeichnispfad zusammensetzen
%
M=dlmread(filename);       % Einlesen der Punkte aus Datei *.txt
%
S= sortrows(M, 1);         % Sortieren der Matrix nach x-Spalte
S(find(S(:,2)<=0.0001),:)=[];
%
%
K = size (S);              % Anzahl der Zeilen herausfinden
zeilen = K(1);             % K(1) = Anzahl Zeilen
%
xzero=S(1,1);              % Verschiebung zu x=0
for p=1:zeilen
    S(p,1)=S(p,1)-xzero;
end
%
% Fläche berechnen unter Kurve
area = 0;
for q = 1:(zeilen-1)       % Anfang for - Schleife
%
deltax = S(q+1,1)-S(q,1);  % Breite des Streifens zwischen zwei Elem.
ypos = (S(q+1,2)+S(q,2))/2; % Mittlerer y-Wert des Streifens
%
area = area + (deltax * ypos); % Fläche des Streifens
%
end                          % Ende for - Schleife
```

12 Anhang

02.06.15 22:06 C:\Dokumente und Einstellung... \trapez.m 2 of 8

```
%% Form des Faserbündels durch Trapeze beschreiben
%% Trapez 1 durch Maximalwert -> Steigung über n Punkte
maxkoords=max(S);
h1=maxkoords(2); % Höhe des Trapezes
a=maxkoords(1); % Breite des Trapezes unten
% Steigung links und rechts über die ersten n Punkte ermitteln
j=0;
for i=1:n
    k(i)=(S(i,2)-S(i+1,2))/(S(i,1)-S(i+1,1));
    k(i+n)=(S(zeilen-j,2)-S(zeilen-j-1,2))/(S(zeilen-j,1)-S(zeilen-j-1,1));
    j=j+1;
end
kstart=0;
kende=0;
for i=1:n
    kstart=kstart+k(i);
    kende=kende+k(i+n);
end
kstart1=kstart/n;
kendel=kende/n;
if kstart1<=grenze
    kstart1 = grenze;
end
if kendel>=-grenze
    kendel=-grenze;
end
% Trapezmatrix erstellen
T1(1,1)=0;
T1(1,2)=0;
T1(2,1)=h1/kstart1;
T1(2,2)=h1;
T1(3,1)=(h1+kendel*a)/kendel;
T1(3,2)=h1;
T1(4,1)=a;
T1(4,2)=0;
hold on
plot(T1(:,1),T1(:,2),'-k. ');
hold off
% Trapez 2 durch r Maximalwerte --> Steigung über n Punkte
% r Maximalwerte finden
```

12 Anhang

02.06.15 22:06 C:\Dokumente und Einstellung... \trapez.m 3 of 8

```
H=S;
summe=0;
if r>zeilen
    r=zeilen-1;
end
for i=1:r
    maxwert=max(H);
    maxhoehe=maxwert(2);
    H(find(H(:,2)>=(maxhoehe),1),:)=[];
    summe=summe+maxhoehe;
end
h2=(summe/r);
%
T2(1,1)=0;
T2(1,2)=0;
T2(2,1)=h2/kstart1;
T2(2,2)=h2;
T2(3,1)=(h2+kende1*a)/kende1;
T2(3,2)=h2;
T2(4,1)=a;
T2(4,2)=0;
%
hold on
plot(T2(:,1),T2(:,2),'-c. ');
hold off
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Trapez 3 durch Maximalwert -> Steigung über n/2 Punkte
%
%
% Steigung links und rechts über die ersten n Punkte ermitteln
m=round(n/2);
j=0;
for i=1:m
    k(i)=(S(i,2)-S(i+1,2))/(S(i,1)-S(i+1,1));
    k(i+m)=(S(zeilen-j,2)-S(zeilen-j-1,2))/(S(zeilen-j,1)-S(zeilen-j-1,1));
    j=j+1;
end
%
kstart=0;
kende=0;
for i=1:m
    kstart=kstart+k(i);
    kende=kende+k(i+m);
end
kstart2=kstart/m;
kende2=kende/m;
if kstart2<=grenze
    kstart2 = grenze;
end
if kende2>=-grenze
    kende2=-grenze;
end
%
%
```

12 Anhang

02.06.15 22:06 C:\Dokumente und Einstellung... \trapez.m 4 of 8

```
% Trapezmatrix erstellen
T3(1,1)=0;
T3(1,2)=0;
T3(2,1)=h1/kstart2;
T3(2,2)=h1;
T3(3,1)=(h1+kende2*a)/kende2;
T3(3,2)=h1;
T3(4,1)=a;
T3(4,2)=0;
%
hold on
plot(T3(:,1),T3(:,2),'-m. ');
hold off
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Trapez 4 durch r Maximalwerte --> Steigung über n/2 Punkte
%
%
T4(1,1)=0;
T4(1,2)=0;
T4(2,1)=h2/kstart2;
T4(2,2)=h2;
T4(3,1)=(h2+kende2*a)/kende2;
T4(3,2)=h2;
T4(4,1)=a;
T4(4,2)=0;
%
hold on
plot(T4(:,1),T4(:,2),'-b. ');
hold off
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Trapez 5 und 6 durch Flächengleichheit
%
% A = ((a+c)/2) *h
c1=((2*area)/h1) -a;
c2=((2*area)/h2) -a;
%
T5(1,1)=0;
T5(1,2)=0;
T5(2,1)=a/2-c1/2;
T5(2,2)=h1;
T5(3,1)=a/2+c1/2;
T5(3,2)=h1;
T5(4,1)=a;
T5(4,2)=0;
%
T6(1,1)=0;
T6(1,2)=0;
T6(2,1)=a/2-c2/2;
T6(2,2)=h2;
T6(3,1)=a/2+c2/2;
T6(3,2)=h2;
T6(4,1)=a;
```

12 Anhang

02.06.15 22:06 C:\Dokumente und Einstellung... \trapez.m 5 of 8

```
T6(4,2)=0;
%
hold on
plot(T5(:,1),T5(:,2),'-g. ');
plot(T6(:,1),T6(:,2),'-g. ');
hold off
%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
hold on; % Punkte von beschnittenen Messdaten ausgeben in Diagramm
plot(S(:,1),S(:,2),'-r. ');
xlabel('Abmessungen in mm');
ylabel('Abmessungen in mm');
axis('equal')
hold off
title(names{filenummer});
grid on

%
figurverzeichnis=strcat(figuren, names{filenummer}); %Verzeichnispfad zusammensetzen
endung='.jpg';
figurverzeichnis=strcat(figurverzeichnis, endung); %Verzeichnispfad zusammensetzen
print(figure(1), '-djpeg', figurverzeichnis); %Abspeichern der Figur als Bild
endung='.fig';
%
%
clf % Figur löschen
%
%
%% Abweichungen Berechnen
abweich=zeros([1,6]);
abweichprozent=zeros([1,6]);
y=zeros([1,6]);
%
k6start=((T6(2,2)-T6(1,2)))/((T6(2,1)-T6(1,1)));
k5start=((T5(2,2)-T5(1,2)))/((T5(2,1)-T5(1,1)));
k6ende=((T6(4,2)-T6(3,2)))/((T6(4,1)-T6(3,1)));
k5ende=((T5(4,2)-T5(3,2)))/((T5(4,1)-T5(3,1)));
d1ende=T1(4,2)-kende1*T1(4,1);
d2ende=T2(4,2)-kende1*T2(4,1);
d3ende=T3(4,2)-kende2*T3(4,1);
d4ende=T4(4,2)-kende2*T4(4,1);
d5ende=T5(4,2)-k5ende*T5(4,1);
d6ende=T6(4,2)-k6ende*T6(4,1);
%
for i=1:zeilen
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% T1
if(S(i,1)<T1(2,1))
y(1)=kstart1*S(i,1);
abweich(1)=abweich(1)+abs(S(i,2)-y(1));
end
if(S(i,1)<T1(3,1) & S(i,1)>=T1(2,1))
y(1)=h1;
```

12 Anhang

02.06.15 22:06 C:\Dokumente und Einstellung... \trapez.m 6 of 8

```
abweich(1)=abweich(1)+abs(S(i,2)-y(1));
end
if(S(i,1)>=T1(3,1))
y(1)= kende1*S(i,1)+d1ende;
abweich(1)=abweich(1)+abs(S(i,2)-y(1));
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% T2
if(S(i,1)<T2(2,1))
y(2)=kstart1*S(i,1);
abweich(2)=abweich(2)+abs(S(i,2)-y(2));
end
if(S(i,1)<T2(3,1) & S(i,1)>=T2(2,1))
y(2)=h2;
abweich(2)=abweich(2)+abs(S(i,2)-y(2));
end
if(S(i,1)>=T2(3,1))
y(2)= kende1*S(i,1)+d2ende;
abweich(2)=abweich(2)+abs(S(i,2)-y(2));
end
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% T3
if(S(i,1)<T3(2,1))
y(3)=kstart2*S(i,1);
abweich(3)=abweich(3)+abs(S(i,2)-y(3));
end
if(S(i,1)<T3(3,1) & S(i,1)>=T3(2,1))
y(3)=h1;
abweich(3)=abweich(3)+abs(S(i,2)-y(3));
end
if(S(i,1)>=T3(3,1))
y(3)= kende2*S(i,1)+d3ende;
abweich(3)=abweich(3)+abs(S(i,2)-y(3));
end
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% T4
if(S(i,1)<T4(2,1))
y(4)=kstart2*S(i,1);
abweich(4)=abweich(4)+abs(S(i,2)-y(4));
end
if(S(i,1)<T4(3,1) & S(i,1)>=T4(2,1))
y(4)=h2;
abweich(4)=abweich(4)+abs(S(i,2)-y(4));
end
if(S(i,1)>=T4(3,1))
y(4)= kende2*S(i,1)+d4ende;
abweich(4)=abweich(4)+abs(S(i,2)-y(4));
end
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% T5
if(S(i,1)<T5(2,1))
y(5)=k5start*S(i,1);
abweich(5)=abweich(5)+abs(S(i,2)-y(5));
end
if(S(i,1)<T5(3,1) & S(i,1)>=T5(2,1))
y(5)=h1;
```

12 Anhang

02.06.15 22:06 C:\Dokumente und Einstellung... \trapez.m 7 of 8

```
abweich(5)=abweich(5)+abs(S(i,2)-y(5));
end
if(S(i,1)>=T5(3,1))
y(5)= k5ende*S(i,1)+d5ende;
abweich(5)=abweich(5)+abs(S(i,2)-y(5));
end
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% T6
if(S(i,1)<T6(2,1))
y(6)=k6start*S(i,1);
abweich(6)=abweich(6)+abs(S(i,2)-y(6));
end
if(S(i,1)<T6(3,1) & S(i,1)>=T6(2,1))
y(6)=h2;
abweich(6)=abweich(6)+abs(S(i,2)-y(6));
end
if(S(i,1)>=T6(3,1))
y(6)= k6ende*S(i,1)+d6ende;
abweich(6)=abweich(6)+abs(S(i,2)-y(6));
end

abweichprozent(1)=abweichprozent(1)+(abs(S(i,2)-y(1)))/S(i,2);
abweichprozent(2)=abweichprozent(2)+(abs(S(i,2)-y(2)))/S(i,2);
abweichprozent(3)=abweichprozent(3)+(abs(S(i,2)-y(3)))/S(i,2);
abweichprozent(4)=abweichprozent(4)+(abs(S(i,2)-y(4)))/S(i,2);
abweichprozent(5)=abweichprozent(5)+(abs(S(i,2)-y(5)))/S(i,2);
abweichprozent(6)=abweichprozent(6)+(abs(S(i,2)-y(6)))/S(i,2);

end
%
for i=1:6
    abweich(i)=abweich(i)/zeilen;
    abweichprozent(i)=abweichprozent(i)/zeilen;
end
%
%% Speichern
%
ERG(filenummer+1,1)={names{filenummer}};
ERG(filenummer+1,2)={area};
ERG(filenummer+1,3)={a};
ERG(filenummer+1,4)={h1};
ERG(filenummer+1,5)={h2};
ERG(filenummer+1,6)={kstart1};
ERG(filenummer+1,7)={kende1};
ERG(filenummer+1,8)={kstart2};
ERG(filenummer+1,9)={kende2};
ERG(filenummer+1,10)={c1};
ERG(filenummer+1,11)={c2};
ERG(filenummer+1,12)={abweich(1)};
ERG(filenummer+1,13)={abweich(2)};
ERG(filenummer+1,14)={abweich(3)};
ERG(filenummer+1,15)={abweich(4)};
ERG(filenummer+1,16)={abweich(5)};
```

12 Anhang

02.06.15 22:06 C:\Dokumente und Einstellung... \trapez.m 8 of 8

```
ERG(filenummer+1,17)={abweich(6)};
ERG(filenummer+1,18)={abweichprozent(1)};
ERG(filenummer+1,19)={abweichprozent(2)};
ERG(filenummer+1,20)={abweichprozent(3)};
ERG(filenummer+1,21)={abweichprozent(4)};
ERG(filenummer+1,22)={abweichprozent(5)};
ERG(filenummer+1,23)={abweichprozent(6)};
%
toc
%
end % Ende 1. for-Schleife
%
ERG(1,1)={'Dateiname'};
ERG(1,2)={'Flaeche'};
ERG(1,3)={'a'};
ERG(1,4)={'h1'};
ERG(1,5)={'h2'};
ERG(1,6)={'kstart1'};
ERG(1,7)={'kende1'};
ERG(1,8)={'kstart2'};
ERG(1,9)={'kende2'};
ERG(1,10)={'c1'};
ERG(1,11)={'c2'};
ERG(1,12)={'abweich 1'};
ERG(1,13)={'abweich 2'};
ERG(1,14)={'abweich 3'};
ERG(1,15)={'abweich 4'};
ERG(1,16)={'abweich 5'};
ERG(1,17)={'abweich 6'};
ERG(1,18)={'abweichprozent 1'};
ERG(1,19)={'abweichprozent 2'};
ERG(1,20)={'abweichprozent 3'};
ERG(1,21)={'abweichprozent 4'};
ERG(1,22)={'abweichprozent 5'};
ERG(1,23)={'abweichprozent 6'};
%
%
%
xlswrite('ergebnisse_trapez.xls', ERG); % Abspeichern der Flächenwertematrix
%
%end of script
%
```

12 Anhang

02.06.15 22:17 C:\Dokume...\geometrie ellipse rechteck.m 1 of 5

```
%
%
% Dieses m.file ermittelt die Geometrie der ermittelten Ergebnisse
%
close all;
clear;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Definition der Verzeichnisse
verzeichnis = 'input/';      % Verzeichnis für Messwerte
figuren = 'output/';        % Verzeichnis für Figuren
r=20;                        % Anzahl der maximalen Punkte für Ermittlung der Höhe
der Ellipse
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tic                            % Zeitmessung starten
%
%
files = dir(verzeichnis);      % Alle Dateien im Verzeichnis lesen
names = {files.name};        % Namen der Dateien im Verzeichnis abspeichern
%
names = names(3:end);         % zwei leere Einträge löschen
%
anzahlfiles=length(names);    % Anzahl der Dateien feststellen
%
for filenummer=1:anzahlfiles  % Anfang 1. for Schleife
%
textausgabe = strcat(int2str(filenummer), '_von_', int2str(anzahlfiles))
%
filename = strcat(verzeichnis, names{filenummer}); %Verzeichnispfad zusammensetzen
%
M=dlmread(filename);         % Einlesen der Punkte aus Datei *.txt
%
S= sortrows(M, 1);           % Sortieren der Matrix nach x-Spalte
S(find(S(:,2)<=0.0001),:)=[];
%
K = size (S);                % Anzahl der Zeilen herausfinden
zeilen = K(1);               % K(1) = Anzahl Zeilen
%
xzero=S(1,1);                % Verschiebung zu x=0
for p=1:zeilen
    S(p,1)=S(p,1)-xzero;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Form des Faserbündels durch Ellipse beschreiben
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Ellipse 1 durch Maximalwert
%
maxkoords=max(S);
%
a=maxkoords(1)*0.5;          % a Achse der Ellipse --> x Richtung
b=maxkoords(2);             % b Achse der Ellipse --> y Richtung
n=zeilen;                   % Anzahl der Punkte der Ellipse
```

12 Anhang

02.06.15 22:17 C:\Dokume...\geometrie ellipse rechteck.m 2 of 5

```
%
breite=S(zeilen,1);          % Breite des Faserbündels
%
for x = -a:1/n:a            % for - Schleife
y=((((a.^2)*(b.^2))-((x.^2)*(b.^2)))/(a.^2)).^0.5; %Funktionswerte berechnen
u=x+breite/2;              % Verschieben der Ellipse
hold on                    % Punkt in Diagramm einzeichnen
plot(u,y,'c.','LineWidth',3)
hold off
grid on
end                          % Ende for - Schleife Ellipse
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Ellipse 2 durch r Maximalwerte
%
% r Maximalwerte finden
%
H=S;
summe=0;
if r>zeilen
    r=zeilen-1;
end
for i=1:r
maxwert=max(H);
maxhoehe=maxwert(2);
H(find(H(:,2)>=(maxhoehe),1),:)=[];
summe=summe+maxhoehe;
end
c=(summe/r);
%
for x = -a:1/n:a            % for - Schleife
y=((((a.^2)*(c.^2))-((x.^2)*(c.^2)))/(a.^2)).^0.5; %Funktionswerte berechnen
u=x+breite/2;              % Verschieben der Ellipse
hold on                    % Punkt in Diagramm einzeichnen
plot(u,y,'k.','LineWidth',3)
hold off
grid on
end
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Ellipse 3 durch Flächengleichheit
%
% Fläche berechnen unter Kurve
area = 0;
for q = 1:(zeilen-1)      % Anfang for - Schleife
%
    deltax = S(q+1,1)-S(q,1); % Breite des Streifens zwischen zwei Elem.
    ypos = (S(q+1,2)+S(q,2))/2; % Mittlerer y-Wert des Streifens
%
    area = area + (deltax * ypos); % Fläche des Streifens
%
end                          % Ende for - Schleife
%
f=(area/(a*3.1415)*2);      % Höhe der Ellipse bei Flächengleichheit
```

12 Anhang

02.06.15 22:17 C:\Dokume...\geometrie ellipse rechteck.m 3 of 5

```
%
for x = -a:1/n:a           % for - Schleife
y=((((a.^2)*(f.^2))-((x.^2)*(f.^2)))/(a.^2)).^0.5; %Funktionswerte berechnen
u=x+breite/2;              % Verschieben der Ellipse
hold on                    % Punkt in Diagramm einzeichnen
plot(u,y,'g.','LineWidth',3)
hold off
grid on
end                          % Ende for - Schleife Ellipse
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% 1. Rechteck durch Flächengleichheit
%
e=area/breite;              % Höhe des Rechtecks mit gleicher Fläche
%
R(1,1)=0;                   % Rechteck erzeugen
R(1,2)=0;
R(2,1)=0;
R(2,2)=e;
R(3,1)=breite;
R(3,2)=e;
R(4,1)=breite;
R(4,2)=0;
hold on;                    % Rechteck zeichnen
plot(R(:,1),R(:,2),'-b.','LineWidth',3);
hold off;
%
% 2. Rechteck durch Flächengleichheit
%
ort=round(zeilen/2);
h=area/S(ort,2);           % Höhe des Rechtecks mit gleicher Fläche
%
R(1,1)=breite/2-h/2;       % Rechteck erzeugen
R(1,2)=0;
R(2,1)=breite/2-h/2;
R(2,2)=S(ort,2);
R(3,1)=breite/2+h/2;
R(3,2)=S(ort,2);
R(4,1)=breite/2+h/2;
R(4,2)=0;
hold on;                    % Rechteck zeichnen
plot(R(:,1),R(:,2),'-b.','LineWidth',3);
hold off;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
hold on;                    % Punkte von beschnittenen Messdaten ausgeben in Diagramm
set(gca,'FontSize',14)
plot(S(:,1),S(:,2),'-r.','LineWidth',3);
xlabel('Abmessungen in mm');
ylabel('Abmessungen in mm');
axis('equal')
hold off
```

12 Anhang

02.06.15 22:17 C:\Dokume...\geometrie ellipse rechteck.m 4 of 5

```
grid on

%
figurverzeichnis=strcat(figuren, names{filenummer}); %Verzeichnispfad zusammensetzen
endung='.jpg';
figurverzeichnis=strcat(figurverzeichnis, endung); %Verzeichnispfad zusammensetzen
print(figure(1), '-djpeg', figurverzeichnis); %Abspeichern der Figur als Bild
endung='.fig';
figurverzeichnis=strcat(figurverzeichnis, endung); %Verzeichnispfad zusammensetzen
savefig(figurverzeichnis); %Abspeichern der Figur als Figur
%
%% Abweichungen Berechnen
%
abweich=zeros([1,4]);
abweichprozent=zeros([1,4]);
y=zeros([1,4]);
%
imax=0;
for x=-a:1/n:a
    imax=imax+1;
end
i=0;
format long
for x=-a:1/n:a
    i=i+1;
    y(1)=((((a.^2)*(b.^2))-((x.^2)*(b.^2)))/(a.^2)).^0.5;
    y(2)=((((a.^2)*(c.^2))-((x.^2)*(c.^2)))/(a.^2)).^0.5;
    y(3)=((((a.^2)*(f.^2))-((x.^2)*(f.^2)))/(a.^2)).^0.5;
    y(4)=e;
%
%
zustand=i/imax;
zaehler=round(zustand*zeilen);
if zaehler<1
    zaehler=1;
end
%
for k=1:4
    abweich(k)= abweich(k)+abs(y(k)-S(zaehler,2));
    abweichprozent(k)=abweichprozent(k)+ (abs(y(k)-S(zaehler,2))/(S(zaehler,2)));
end
%
%% Kontrollplot - visualisiert zur Auswertung des Abstandes herangezogene Daten
hold on;
plot(S(zaehler,1),y(1),'-r. ');
plot(S(zaehler,1),y(2),'-c. ');
plot(S(zaehler,1),y(3),'-k. ');
plot(S(zaehler,1),y(4),'-g. ');
axis('equal')
hold off
%
end
%
for k=1:4
    abweich(k)= abweich(k)/i; % durchschn. Abweichung in mm
```

12 Anhang

02.06.15 22:17 C:\Dokume...\geometrie ellipse rechteck.m 5 of 5

```
abweichprozent(k)=abweichprozent(k)/i;           % durchschn. prozentuelle
Abweichung
end
%
%
ERG(filenummer+1,1)={names{filenummer}};
ERG(filenummer+1,2)={area};
ERG(filenummer+1,3)={a};
ERG(filenummer+1,4)={b};
ERG(filenummer+1,5)={abweich(1)};
ERG(filenummer+1,6)={abweichprozent(1)};
ERG(filenummer+1,7)={a};
ERG(filenummer+1,8)={c};
ERG(filenummer+1,9)={abweich(2)};
ERG(filenummer+1,10)={abweichprozent(2)};
ERG(filenummer+1,11)={a};
ERG(filenummer+1,12)={f};
ERG(filenummer+1,13)={abweich(3)};
ERG(filenummer+1,14)={abweichprozent(3)};
ERG(filenummer+1,15)={breite};
ERG(filenummer+1,16)={e};
ERG(filenummer+1,17)={abweich(4)};
ERG(filenummer+1,18)={abweichprozent(4)};
ERG(filenummer+1,19)={S(ort,2)};
ERG(filenummer+1,20)={h};
toc
%
end                                     % Ende 1. for-Schleife
%
ERG(1,1)={'Dateiname'};
ERG(1,2)={'Flaeche'};
ERG(1,3)={'Ellipse 1 a'};
ERG(1,4)={'Ellipse 1 b'};
ERG(1,5)={'Durchschn. Abw. Ellipse Maximalwert mm'};
ERG(1,6)={'Durchschn. Abw. Ellipse Maximalwert Prozent'};
ERG(1,7)={'Ellipse 2 c'};
ERG(1,8)={'Ellipse 2 b'};
ERG(1,9)={'Durchschn. Abw. Ellipse r Maximalwerte mm'};
ERG(1,10)={'Durchschn. Abw. Ellipse r Maximalwerte Prozent'};
ERG(1,11)={'Ellipse 3 f'};
ERG(1,12)={'Ellipse 3 b'};
ERG(1,13)={'Durchschn. Abw. zu Ellipse Flaechengleichheit mm'};
ERG(1,14)={'Durchschn. Abw. zu Ellipse Flaechengleichheit Prozent'};
ERG(1,15)={'Rechteck Breite'};
ERG(1,16)={'Rechteck Hoehe'};
ERG(1,17)={'Durchschn. Abw. zu flaechengleichem Rechteck gleiche Breite mm'};
ERG(1,18)={'Durchschn. Abw. zu flaechengleichem Rechteck gleiche Breite Prozent'};
ERG(1,19)={'Rechteck Breite'};
ERG(1,20)={'Rechteck Hoehe'};

xlswrite('ergebnisse.xls', ERG); % Abspeichern der Flächenwertematrix
%
%end of script
```

12 Anhang

02.06.15 22:24 C:\Dokumente und Einstell...\kreisbogen.m 1 of 4

```
%
%
% Dieses m.file ermittelt die Geometrie der ermittelten Ergebnisse
%
beep
close all;
clear;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Definition der Verzeichnisse
verzeichnis = 'input/';      % Verzeichnis für Messwerte
figuren = 'output/';        % Verzeichnis für Figuren
r=10;                        % Anzahl MAXimalwerte für 3. Kreissegment
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
tic                            % Zeitmessung starten
%
%
files = dir(verzeichnis);      % Alle Dateien im Verzeichnis lesen
names = {files.name};         % Namen der Dateien im Verzeichnis abspeichern
%
names = names(3:end);         % zwei leere Einträge löschen
%
anzahlfiles=length(names);    % Anzahl der Dateien feststellen
%
for filenummer=1:anzahlfiles  % Anfang 1. for Schleife
%
textausgabe=strcat(int2str(filenummer), '_von_', int2str(anzahlfiles))
%
filename = strcat(verzeichnis, names{filenummer}); %Verzeichnispfad zusammensetzen
%
M=dlmread(filename);         % Einlesen der Punkte aus Datei *.txt
%
S= sortrows(M, 1);           % Sortieren der Matrix nach x-Spalte
S(find(S(:,2)<=0.0001),:)=[];
%
K = size (S);                 % Anzahl der Zeilen herausfinden
zeilen = K(1);                % K(1) = Anzahl Zeilen
%
xzero=S(1,1);                 % Verschiebung zu x=0
for p=1:zeilen
    S(p,1)=S(p,1)-xzero;
end
area = 0;
for q = 1:(zeilen-1)          % Anfang for - Schleife
%
    deltax = S(q+1,1)-S(q,1); % Breite des Streifens zwischen zwei Elem.
    yposarea = (S(q+1,2)+S(q,2))/2; % Mittlerer y-Wert des Streifens
%
    area = area + (deltax * yposarea); % Fläche des Streifens
%
end                            % Ende for - Schleife
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Form des Faserbündels durch Ellipse beschreiben
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

12 Anhang

02.06.15 22:24 C:\Dokumente und Einstell...\kreisbogen.m 2 of 4

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Kreisbogen 1 durch Wert bei Halber Breite
%
for i=1:zeilen          % Zentrieren in x-Richtung
S(i,1)=S(i,1)-S(zeilen,1)/2;
end
%
%
%
halb=round(zeilen/2);
h1=S(halb,2);
breite=S(zeilen,1);    % Breite des Faserbündels
%
w1=(breite*breite-4*h1*h1)/(8*h1);
%
%
r1=h1+w1;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Kreisbogen 2 durch Maximalwert
%
%
h=max(S);
h2=h(2);
%
w2=(breite*breite-4*h2*h2)/(8*h2);
%
%
r2=h2+w2;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Kreisbogen 3 durch r Maximalwert
%
%
H=S;
summe=0;
if r>zeilen
    r=zeilen-1;
end
for i=1:r
maxwert=max(H);
maxhoehe=maxwert(2);
H(find(H(:,2)>=(maxhoehe),1),:)=[];
summe=summe+maxhoehe;
end
h3=(summe/r);
breite=S(zeilen,1);    % Breite des Faserbündels
%
w3=(breite*breite-4*h3*h3)/(8*h3);
%
%
r3=h3+w3;
%%
%% Abweichungen berechnen
```

12 Anhang

02.06.15 22:24 C:\Dokumente und Einstell...\kreisbogen.m 3 of 4

```
%  
% Winkel des Punktes bestimmen  
%  
abweich1=0;  
abweich2=0;  
abweich3=0;  
abweichrel1=0;  
abweichrel2=0;  
abweichrel3=0;  
%  
counter1=0;  
counter2=0;  
counter3=0;  
for i=1:zeilen  
%  
ypos1=((r1*r1)-((S(i,1)/2)^2))^0.5-w1;  
ypos2=((r2*r2)-((S(i,1)/2)^2))^0.5-w2;  
ypos3=((r3*r3)-((S(i,1)/2)^2))^0.5-w3;  
hold on;  
if ypos1>0.00001  
plot(S(i,1),ypos1,'-k.','LineWidth',3);  
abweich1=abweich1+abs(ypos1-S(i,2));  
abweichrel1=abweichrel1+abs(ypos1-S(i,2))/S(i,2);  
counter1=counter1+1;  
end  
if ypos2>0.00001  
plot(S(i,1),ypos2,'-b.','LineWidth',3);  
abweich2=abweich2+abs(ypos2-S(i,2));  
abweichrel2=abweichrel2+abs(ypos2-S(i,2))/S(i,2);  
counter2=counter2+1;  
end  
if ypos3>0.00001  
plot(S(i,1),ypos3,'-c.','LineWidth',3);  
abweich3=abweich3+abs(ypos3-S(i,2));  
abweichrel3=abweichrel3+abs(ypos3-S(i,2))/S(i,2);  
counter3=counter3+1;  
end  
hold off;  
grid on;  
axis equal;  
%  
end  
abweich1=abweich1/counter1;  
abweich2=abweich2/counter2;  
abweich3=abweich3/counter3;  
%  
abweichrel1=abweichrel1/counter1;  
abweichrel2=abweichrel2/counter2;  
abweichrel3=abweichrel3/counter3;  
%  
hold on; % Punkte von beschnittenen Messdaten ausgeben in Diagramm  
set(gca,'FontSize',14)  
plot(S(:,1),S(:,2),'-r.','LineWidth',3);  
xlabel('Abmessungen in mm');  
ylabel('Abmessungen in mm');
```

12 Anhang

02.06.15 22:24 C:\Dokumente und Einstell...\kreisbogen.m 4 of 4

```
axis('equal')
hold off
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
figurverzeichnis=strcat(figuren, names{filenumber}); %Verzeichnispfad zusammensetzen
endung='.jpg';
figurverzeichnis=strcat(figurverzeichnis, endung); %Verzeichnispfad zusammensetzen
print(figure(1), '-djpeg', figurverzeichnis); %Abspeichern der Figur als Bild
endung='.fig';
figurverzeichnis=strcat(figurverzeichnis, endung); %Verzeichnispfad zusammensetzen
%savefig(figurverzeichnis); %Abspeichern der Figur als Figur
%
ERG(filenumber+1,1)={names{filenumber}};
ERG(filenumber+1,2)={area};
ERG(filenumber+1,3)={breite};
ERG(filenumber+1,4)={h1};
ERG(filenumber+1,5)={abweich1};
ERG(filenumber+1,6)={abweichrel1};
ERG(filenumber+1,7)={breite};
ERG(filenumber+1,8)={h2};
ERG(filenumber+1,9)={abweich2};
ERG(filenumber+1,10)={abweichrel2};
ERG(filenumber+1,11)={breite};
ERG(filenumber+1,12)={h3};
ERG(filenumber+1,13)={abweich3};
ERG(filenumber+1,14)={abweichrel3};
%
toc
%
end % Ende 1. for-Schleife
%
beep
%
ERG(1,1)={'Dateiname'};
ERG(1,2)={'Flaeche'};
ERG(1,3)={'Breite'};
ERG(1,4)={'Hoehe'};
ERG(1,5)={'Durchschn. Abw. Zigarre Maximalwert Halbe Breite'};
ERG(1,6)={'Durchschn. Abw. Zigarre Maximalwert Halbe Breite Prozent'};
ERG(1,7)={'Breite'};
ERG(1,8)={'Hoehe'};
ERG(1,9)={'Durchschn. Abw. Zigarre Maximalwert absolut'};
ERG(1,10)={'Durchschn. Abw. Zigarre Maximalwert absolut Prozent'};
ERG(1,11)={'Breite'};
ERG(1,12)={'Hoehe'};
ERG(1,13)={'Durchschn. Abw. Zigarre r Maximalwerte'};
ERG(1,14)={'Durchschn. Abw. Zigarre r Maximalwerte Prozent'};
%
xlswrite('ergebnisse_kreisbogen.xls', ERG); % Abspeichern der Flächenwertematrix
%
%end of script
```