

Einfluss der Vorkompaktierung auf die Permeabilität von Flachfasertextilien

Bachelorthesis

Materialwissenschaften und Werkstofftechnik

Valentin Heinmüller

Matrikelnummer: 501745

Betreuer:

Katrin Kenzlers, M. Sc.

Gutachter:

Dr. Leif Steuernagel

Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann



Wintersemester 2022/2023

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

TU Clausthal

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und dass alle Stellen dieser Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht wurden und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsstelle vorgelegt wurde.

Des Weiteren erkläre ich, dass ich mit der öffentlichen Bereitstellung meiner Abschlussarbeit in der Institutsbibliothek einverstanden bin.

Ich stimme hiermit außerdem einer softwaregestützten Plagiatsprüfung zu.

Clausthal-Zellerfeld, den 03.07.2023

Ort, Datum

V. Heinmüller

Unterschrift

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	IV
Verzeichnis der Formelzeichen	V
Abkürzungsverzeichnis	V
Zusammenfassung	VI
Abstract	VII
1. Einleitung.....	1
2. Theoretische Grundlagen	2
2.1 Faserverstärkte Kunststoffe	2
2.1.1 Naturfasern	4
2.1.1 Fertigungsverfahren von faserverstärkten Kunststoffen.....	8
2.1.2 Kompaktierung.....	10
2.2 Permeabilität.....	11
2.3 Stand der Technik - Permeabilitätsmessung.....	14
3. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	17
3.1 Versuchsaufbau.....	17
3.2 Struktureller Aufbau	19
3.3 Versuchsdurchführung.....	21
3.3.1 Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens	21
3.3.2 Probenherstellung und Vorkonditionierung.....	22
3.3.3 Permeabilitätsmessung	22
3.4 Materialien	25
4. Ergebnisse und Diskussion.....	26
4.1 Einfluss der zyklischen Vorkompaktierung auf die Permeabilität.....	26
4.1.1 Einfluss der zyklischen Vorkompaktierung auf Flachs-Biaxial-Gelege	26
4.1.2 Einfluss der zyklischen (Vor-)Kompaktierung auf Flachs-Gewebe (Leinwandbindung).....	29
4.2 Vergleich von Flachs-Gelege und Gewebe	31
4.3 Ergebnisse des zweiten Versuchsteils	34
4.3.1 Ergebnisse des Vorversuches zum Kompaktierungsverhalten	34
4.3.2 Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe	35
5. Fazit und Aussicht	38
6. Literaturverzeichnis.....	40
7. Anhang	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung der Naturfasern nach DIN 60001	4
Abbildung 2: Flachs-Pflanze [Auri00]	5
Abbildung 3: Querschnitt eines Flachs-Stängels [Auri00]	5
Abbildung 4: Verlauf der Mikrofibrillen in einer Flachs-Elementarfaser [Auri00]	6
Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Cellulose-Kette (intramolekulare OH-Brücken in blau), online verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Cellulose#/media/Datei:1,4-glycosidic_Cellulose_V1.svg	6
Abbildung 6: Schematische Darstellung der verschiedenen Gewebearten [Kenz21]	9
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Fließfrontausbildung einer 1D-Messung [Dick15]	14
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Fließfrontausbildung einer 2D-Messung [Dick15]	15
Abbildung 9: Permeabilitätsmessstand am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik	17
Abbildung 10: Beispielhaftes Modell des Deckels [Dick15]	18
Abbildung 11: Fließfronterkennung aus dem Benutzer-Interface des Matlab-Programms.....	19
Abbildung 12: Aufbau einer Permeabilitätsmessung mit Abstandshalter und Wachs (Gelege)	23
Abbildung 13: Auswertung einer Gewebe-Probe (Screenshot aus dem Computerprogramm), Auftragung der Permeabilität in m^2 gegen die Zeit in s	24
Abbildung 14: Permeabilität in Abhängigkeit der Zykluszahl (Gelege)	27
Abbildung 15: Permeabilitätsergebnisse in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes (Gelege)	27
Abbildung 16: Prozentualer Vergleich der vorkompaktierten Proben mit der unkompaktierten Referenz (Gelege)	29
Abbildung 17: Permeabilität in Abhängigkeit der Zykluszahl (Gewebe)	29
Abbildung 18: Permeabilität in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes (Gewebe)	30
Abbildung 19: Prozentualer Vergleich der vorkompaktierten Proben mit der unkompaktierten Referenz (Gewebe)	31
Abbildung 20: Vergleich der Permeabilität von Flachs-Gelege und Flachs-Gewebe	31
Abbildung 21: Fließfront nach abgeschlossener Messung einer Gewebe-Probe (3x-kompaktiert)	33
Abbildung 22: Fließfront nach abgeschlossener Messung einer Gelege-Probe (3x-kompaktiert)	33
Abbildung 23: Probenhöhe der Gewebe-Proben in Abhängigkeit des Kompaktierungsdruckes	34
Abbildung 24: Permeabilität in Abhängigkeit des Kompaktierungsdruckes	35
Abbildung 25: Permeabilität in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes	36
Abbildung 26: Permeabilität der 1x- und 3x-kompaktierten Proben	37
Abbildung 27: Permeabilität der Gelege-Proben in Abhängigkeit der Zykluszahl, alle Messergebnisse	42
Abbildung 28: Permeabilität der Gewebe-Proben in Anhängigkeit der Zykluszahl, alle Messergebnisse	42
Abbildung 29: Probenhöhe in Abhängigkeit des Kompaktierungsdruckes und der Zykluszahl (Gelege)	43

Verzeichnis der Formelzeichen

Q	Volumenstrom
κ	Durchlässigkeitsbeiwert
i	Hydraulisches Potential
A	Fläche (des Mediums)
L	(Fließ-)Länge
m	Hydraulischer Gradient
ρ	Dichte
V	Volumen
p	Druck
g	Erdbeschleunigung
K	Permeabilität
∇	Nabla-Operator
η	Dynamische Viskosität
v	Fließgeschwindigkeit
Φ	Porosität
R_{rel}	Relaxationsquotient
$F_{t,vor}$	Kraft zu Beginn der Kompaktierung
$F_{t,nach}$	Kraft am Ende der Kompaktierung
$R_{rück}$	Rückstellverhalten
$d_{t,vor}$	Textilhöhe vor Kompaktierung
$d_{t,nach}$	Textilhöhe nach Kompaktierung

Abkürzungsverzeichnis

FVG	Faservolumengehalt
Ka	Permeabilität in Hauptrichtung A
Kb	Permeabilität in Nebenrichtung B
LCM	Liquid Composite Moulding
LW	Leinwand-
UD	unidirektional
VARI	Vacuum assisted resin infusion

Zusammenfassung

Die Flachsfaser stellt aufgrund ihrer energieärmeren Verarbeitung im Vergleich zu synthetischen Fasern sowie ihrer guten mechanischen Eigenschaften bei vergleichsweise geringer Dichte eine Alternative zur Glasfaser dar. Diese hohen mechanischen Kennwerte können durch eine Vorkompaktierung des Halbzeuges weiter erhöht werden, indem Hohlräume, die aufgrund der Textilbeschaffenheit und der Fasereigenschaften entstehen, verkleinert werden und so der Faservolumengehalt des Verbundes erhöht wird.

In dieser Arbeit wird der Einfluss der Vorkompaktierung von Flachsfasertextilien auf deren Permeabilität untersucht. Dazu werden Proben aus jeweils drei Lagen von Flachsfaser-Gelege und Flachsfaser-Gewebe mit vergleichbaren Flächengewichten untersucht, indem die Proben zuerst mit Hilfe einer Presse vorkompaktiert und anschließend in einem Permeabilitätsmessstand geprüft werden. Im ersten Versuchsteil wird der Faservolumengehalt konstant gehalten, um den Einfluss des Kompaktierungs- und Relaxationsverhaltens der Textilien zu isolieren. Im zweiten Teil dieser Arbeit werden Proben unterschiedlich stark kompaktiert und die Ergebnisse als Verlauf der Permeabilität gegen den Faservolumengehalt aufgetragen.

Das Flachsfaser-Gelege zeigt nach der Vorkompaktierung eine Tendenz hin zu einer niedrigeren Permeabilität, die fünffach-kompaktierten Proben zeigen die niedrigste Permeabilität.

Bei den Flachsfaser-Gewebeproben zeigen alle Proben, unabhängig von der Anzahl an Kompaktierungen, eine deutliche Verringerung der Permeabilität trotz konstantem Faservolumengehalt.

Im direkten Vergleich der beiden Textilarten weist das Gewebe eine deutlich geringere Permeabilität auf als das Gelege. Zudem unterscheiden sich die Fließfrontformen voneinander: Das Gelege bildet eine nahezu kreisförmige Fließfront aus, während die Fließfront des Gewebes ellipsenförmig ist.

Im zweiten Versuchsteil, bei dem die Proben mit zunehmenden Drücken kompaktiert werden, nimmt die Permeabilität mit steigendem Faservolumengehalt exponentiell ab. Die Proben, die einfach- und dreifach-kompaktiert wurden, zeigen keinen signifikanten Unterschied in der Permeabilität. Die Messdauern und damit auch die Infusionsdauern in der späteren Anwendung nehmen stark mit zunehmendem Faservolumengehalt zu.

Abstract

Flax fibre is an alternative to glass fibre due to its low-energy production and its good mechanical properties with comparatively low density. These high mechanical properties can be further increased by pre-compacting the semi-finished product by reducing cavities and thus increasing the fibre volume content of the composite.

In this paper, the influence of pre-compacting flax fibre textiles on their permeability is investigated. For this purpose, samples of three layers each of flax scrim and flax fabric with comparable areal weights are examined by first pre-compacting the samples with the help of a press and then testing them in a permeability measuring setup. In the first part of the test, the fibre volume content is kept constant in order to isolate the influence of the compaction and relaxation behaviour of the textiles. In the second part of this work, samples with different fibre volume contents are then tested in order to establish a dependency of permeability over the fibre volume content.

The flax fibre fabric shows a tendency towards lower permeability after pre-compaction, the 5x-compacted samples show the lowest permeability. For the flax fibre scrim samples, all samples, regardless of the number of compactions, show a significant reduction in permeability despite constant fibre volume content.

In a direct comparison of the two textile types, the woven fabric shows a significantly lower permeability than the scrim; moreover, the flow front shapes differ from each other. The scrim forms an almost circular flow front, while the flow front of the fabric is elliptical.

In the second part of the test, where the samples are tested with different fibre volume contents, the permeability decreases exponentially with increasing fibre volume content. The samples that were 1x and 3x compacted show no significant difference in permeability. However, the measurement durations and thus also the infusion durations in the subsequent application increase strongly with increasing fibre volume content.

1. Einleitung

Naturfasern haben in den letzten Jahrzehnten in vielen Anwendungsbereichen an Bedeutung gewonnen. Sie bieten aufgrund ihrer energieärmeren Verarbeitung eine ökologischere Alternative zu synthetischen Fasern und können durch Fortschritte in der Forschung aufgrund guter mechanischer Kennwerte und Eigenschaften mit Glasfasern konkurrieren. Besonders ihre vergleichsweise geringe Dichte macht die Naturfasern zu einer interessanten Komponente für Leichtbauwerkstoffe, wie sie beispielsweise schon in der Automobilindustrie eingesetzt werden. Die Flachsfaser stellt mit ihrer guten Verfügbarkeit und sehr guten Eigenschaften eine der häufigsten verwendeten Naturfasern da und bietet eine große Auswahl an Weiterverarbeitungsmöglichkeiten.

Damit Naturfasern wie die Flachsfaser im Verbundwerkstoff gute mechanische Eigenschaften erreichen können, muss das Fasermaterial zur Erzielung eines ausreichenden Faservolumengehaltes komprimiert werden. In gängigen LCM-Verfahren wie dem RTM-Verfahren erfolgt diese Kompaktierung der Fasern durch das Zusammenpressen der Werkzeughälften, bevor die Infusion mit dem Harz-System gestartet werden kann. Die Taktzeiten werden dabei maßgeblich von der Dauer der Infusion beeinflusst, da das Bauteil erst gänzlich und ohne Lufteinschlüsse von dem Harzsystem durchdrungen werden muss, bevor es ausgehärtet werden kann.

Die Ermittlung der Permeabilität von Flachsfaser-Textilien ermöglicht somit die Vorhersage von Infusionszeiten und ermöglicht zudem die Simulation von Infusionsvorgängen mit Hilfe geeigneter Programme, um den Infusionsaufbau zu optimieren.

Nachdem im Rahmen einer bereits abgeschlossenen Arbeit am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik gezeigt werden konnte, dass durch die Vorkompaktierung von Flachsfasertextilien die mechanischen Eigenschaften des Verbundes noch verbessert werden können, ist es nun Ziel dieser Arbeit, den Einfluss der Vorkompaktierung von Flachsfasertextilien auf die Permeabilität dieser textilen Halbzeuge zu untersuchen. Die Flachsfaser zeigt elastisches und plastisches Verformungsverhalten, also reversible und nicht-reversible Verformung. Besonders das elastische Verformungsverhalten ist dabei interessant, da sich unter Druckbelastung ein sogenanntes Relaxationsverhalten zeigt, bei dem Spannungen im Textil durch strukturelle Veränderungen abgebaut und somit die Struktur und möglicherweise auch die Permeabilität des Systems beeinflusst werden. Anders als bei Glasfasern besteht bei Flachsfasern zudem nicht die Problematik des Brechens, wodurch höhere Kompaktierungsdrücke möglich werden.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Faserverstärkte Kunststoffe

Faserverstärkte Kunststoffe gehören zur Werkstoffgruppe der Verbundwerkstoffe. Unter diesen wird die Kombination von zwei oder mehr Materialien verstanden, um im Verbund die Vorteile eines jeden Materials nutzen zu können [RöHB16]. Ein einfaches und anschauliches Beispiel für Verbundwerkstoffe stellen Sandwichbauteile dar. Sie bestehen aus einem steifen Material als Deckschicht, das den Hauptteil der Belastungen aufnimmt und den Kern vor Beschädigungen schützt. Der Kern besteht aus Materialien geringer Dichte und Steifigkeit wie Schäumen oder Polymeren [RöHB16] und dient dazu, die Deckschichten auf konstantem Abstand zu halten. Durch die Verwendung eines leichten Kernmaterials bietet das Sandwichbauteil vielfältige Anwendungen, besonders im Leichtbau, und wird daher z.B. in der Luftfahrt eingesetzt, um Gewicht einzusparen, ohne dabei auf gute mechanische Eigenschaften verzichten zu müssen.

Die faserverstärkten Kunststoffe setzen sich grundsätzlich aus einem Verstärkungswerkstoff, der Faser, und einer polymeren Matrix zusammen.

Die Matrix erfüllt im Faserverbundwerkstoff eine Vielzahl von Aufgaben, unter anderem ist sie für den Schutz und die räumliche Fixierung der Fasern verantwortlich. Außerdem stützt sie die Fasern bei Druckbelastung und sorgt neben der Lastverteilung zwischen den Fasern auch für die Krafteinleitung in die Fasern [May20].

Aufgrund der Vielzahl an Aufgaben hat die Matrix daher auch einen enormen Einfluss auf viele verschiedene Eigenschaften des Gesamtverbundes. Dazu zählen neben Dichte, Brandverhalten, Kriech- und Relaxationsverhalten, Wärmeleitfähigkeit sowie Chemikalienbeständigkeit auch Steifigkeits- und Festigkeitswerte [Schü07].

Als Matrixsysteme kommen hauptsächlich thermoplastische oder duroplastische Matrixsysteme zum Einsatz.

Beide Matrixsysteme lassen sich in Untergruppen, entsprechend ihrer Syntheseart bzw. der chemischen Reaktion, die zur Aushärtung führt, unterteilen. Zu den wichtigsten Duomerarten gehören beispielsweise die ungesättigten Polyesterharze (Polymerisation), die Epoxidharze (Polyaddition), die Melaminharze (Polykondensation) und die Phenolharze (Polykondensation).

Bei der Herstellung von Faserverbundsystemen mit aushärtenden Matrixsystemen spielt das Prozessfenster, in dem das Matrixsystem noch verarbeitet werden kann, eine wichtige Rolle. Die Zähflüssigkeit eines Systems wird mit Hilfe der Viskosität beschrieben. Sie wird häufig zur Beschreibung des Prozessfensters verwendet und gibt Aufschluss über den zeitlichen Ablauf der Vernetzungsreaktion.

Während also der Faktor Zeit bei der Permeabilitätsmessung aufgrund der konstant bleibenden Viskosität des Messfluides zunächst keine Rolle spielt, muss er im Fertigungsprozess berücksichtigt werden, wenn es darum geht, die Angussstellen und den Infusionsdruck zu wählen. Die Infusion des Bauteils muss abgeschlossen sein, bevor das Harzsystem zu dickflüssig ist, um eine vollständige Infusion sicherzustellen und Lufteinschlüsse zu vermeiden.

Die Fasern übernehmen im Verbundwerkstoff die Aufgabe der Verstärkung und Kraftaufnahme, da sie Zugkräften besonders gut stand halten können und dem Bauteil trotz

ihrer geringen Dichte eine hohe Festigkeit und Steifigkeit verleihen [Avki10]. Daher werden Faserverbundbauteile in der Regel zur optimalen Ausnutzung der Fasern anisotrop aufgebaut, d.h. die Fasern verlaufen in Hauptkraftrichtung. Unter Anisotropie wird die Richtungsabhängigkeit einer Eigenschaft verstanden, im Fall des Faserverbundbauteils also besonders die Ausrichtung der Fasern in Abhängigkeit der Kraftrichtung, da die Faser ihr mechanisches Potential nur dann voll nutzen kann, wenn sie in Kraftrichtung verläuft. Neben den mechanischen Eigenschaften werden aber auch andere Faktoren durch die Orientierung der Fasern beeinflusst, wie z.B. die Permeabilität in verschiedenen Richtungen. Die mechanischen Eigenschaften des Bauteils werden auch maßgeblich durch das Zusammenspiel von Fasern und Matrix beeinflusst, insbesondere der Haftung zwischen Fasern und Matrix. Daher kann eine Nachbehandlung der Fasern, beispielsweise durch das Auftragen eines Haftmittels, sinnvoll sein. Dieser Prozess wird auch als Avivage bezeichnet und verbessert die Faser-Matrix-Haftung [FIZR95].

Als Verstärkungsfasern in Faserverbundwerkstoffen können eine Vielzahl an Fasern verwendet werden. Zu den am häufigsten verwendeten gehören aber neben Aramidfasern, keramischen und thermoplastischen Fasern vor allem Kohlenstofffasern, Glasfasern und Naturfasern. Aufgrund der Relevanz für diese Arbeit wird nun auf die Naturfasern im Detail eingegangen werden.

2.1.1 Naturfasern

Naturfasern werden in tierische, mineralische und pflanzliche Fasern eingeteilt (Abbildung 1). Die Struktur der tierischen Naturfasern beruht auf Proteinen, zu den zwei Untergruppen gehören die tierischen Wollen und Haare sowie die Seiden. Zu den mineralischen Naturfasern gehört beispielsweise Asbest, welches aber aufgrund seiner nachgewiesenen Gesundheitsrisiken für den Menschen heute so gut wie nicht mehr verwendet wird. Die pflanzlichen Naturfasern sind aus Cellulose aufgebaut. Aufgrund der Relevanz für diese Arbeit wird im Folgenden genauer auf die pflanzlichen Naturfasern eingegangen.

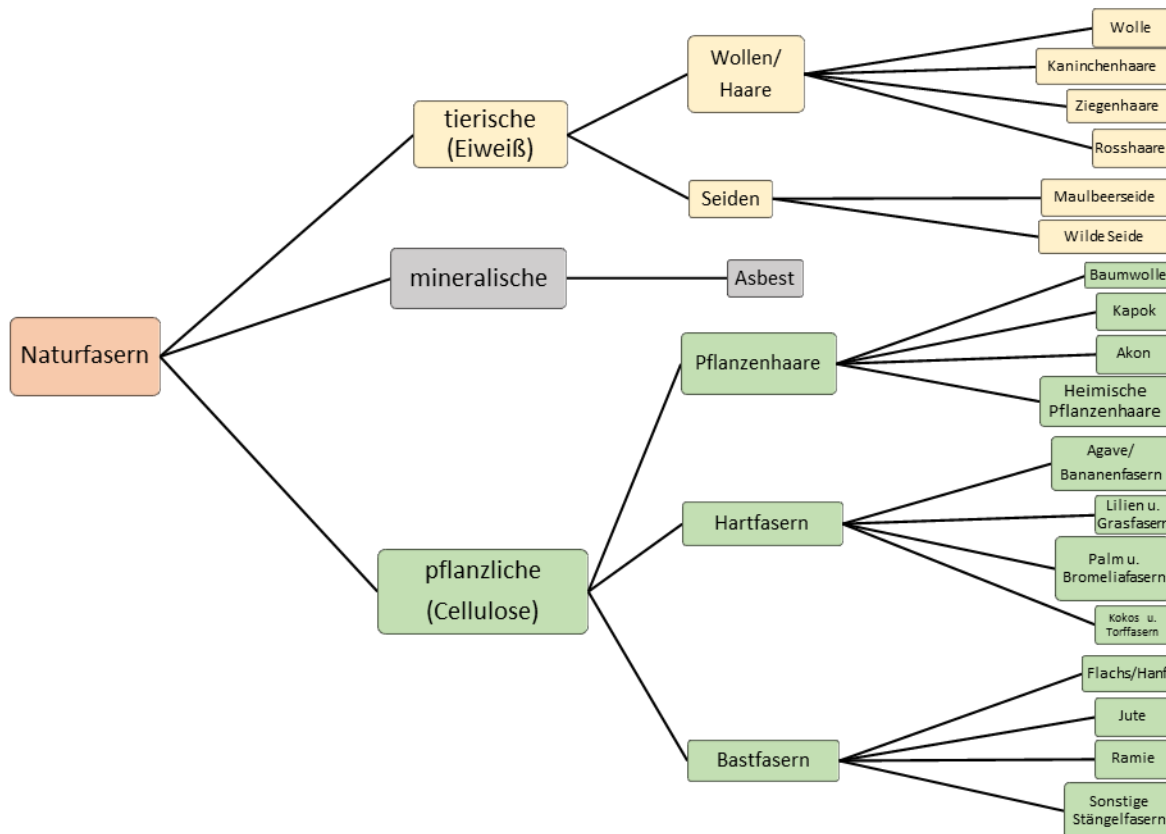


Abbildung 1: Einteilung der Naturfasern nach DIN 60001

Pflanzliche Fasern lassen sich in Pflanzenhaare bzw. Samenfasern, Hartfasern und Bastfasern unterscheiden. Sie stammen von verschiedenen Teilen der Pflanze und decken so ein breites Spektrum an Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten ab.

Samenfasern wie z.B. Baumwolle, Kapok oder Akon werden aus den Samen-Fortsätzen der Pflanze, auch Samenhaaren genannt, gewonnen. Da der Samen vom Wind transportiert werden muss, zeichnen sich diese Faserarten durch eine geringe Dichte aus.

Hartfasern bzw. Blattfasern wie z.B. Bananenfasern, Palmfasern oder Sisalfasern werden hingegen aus den Blättern, Blattscheiden oder Früchten einkeimblättriger Pflanzen gewonnen [Avki10] und dienen zur Verstärkung des jeweiligen Pflanzenteils.

Die dritte Gruppe bilden die Bastfasern wie Flachs- oder Hanffasern, Jute oder Ramiefasern. Sie werden aus den Pflanzenstängeln zweikeimblättriger Pflanzen gewonnen und bestehen aus langen, dickwandigen Zellen. Die Bastfasern verstärken den Pflanzenstängel und sorgen gleichzeitig dafür, dass er flexibel genug bleibt. Sie sind daher vielseitig anwendbar und

können in Vlies- oder Dämmstoffen, zur Herstellung von Kleidung oder als technisches Textil verwendet werden.

Die Anbauggebiete für Flachs liegen neben Russland vor allem in der EU, weshalb sie innerhalb Deutschlands und der EU im Bereich der Bastfasern häufig zur Verwendung kommen. Ein Teil der Produktion wird außerdem vor allem nach Asien exportiert [DiDD08].

Der Bedarf an Hanffasern kann innerhalb der EU zu Teilen aus eigenem Anbau gedeckt werden. Neben Hanffasern, die beispielsweise aus China importiert werden, werden andere Bastfasern wie Jute, Kenaf oder Ramie hauptsächlich aus Asien nach Europa gebracht [Avki10].

Aufgrund der Relevanz für diese Arbeit wird genauer auf den strukturellen Aufbau der Flachs-Stängel sowie der eigentlichen Fasern eingegangen.

Die Flachs-Pflanze besteht aus Wurzel, Stängel und linealischen Blättern mit Blütenständen an der Spitze. Dieser Aufbau ist in Abbildung 2 zu sehen. Die Pflanze erreicht Höhen zwischen 60 und 100 cm, wobei die Länge des Stängels zwischen Wurzel- und Blattwerk die maximale Länge der Fasern vorgibt.

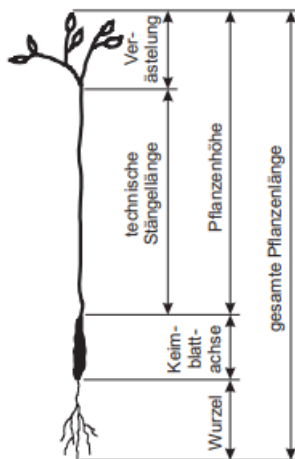
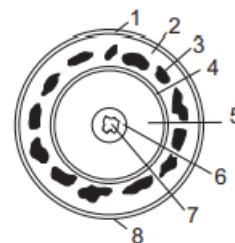


Abbildung 2: Flachs-Pflanze [Auri00]



- 1 Epidermis
- 2 Rindenschicht
- 3 Faserbündel
- 4 Wachstumszone
- 5 Holzzellen
- 6 Mark
- 7 Lumen
- 8 Wachsschicht

Abbildung 3: Querschnitt eines Flachs-Stängels [Auri00]

Abbildung 3 zeigt den Pflanzenstängel einer Flachs-Pflanze. In der Mitte des Querschnitts befindet sich das Lumen, ein Hohlraum, der sich durch den gesamten Stängel zieht.

Entscheidend für die Gewinnung der technischen Fasern sind die Faserbündel, die sich in der Rindenschicht des Stängels befinden. Sie bestehen wiederum aus mehreren Elementarfasern, die miteinander verbunden sind. Eine solche Elementarfaser ist in Abbildung 4 gezeigt. Wie auch der Pflanzenstängel ist die Elementarfaser schichtweise aufgebaut und verfügt, analog zum Stängel, ebenfalls über ein Lumen in der Mitte. Durch diesen Hohlraum unterscheiden

sich die Naturfasern auf struktureller Ebene deutlich von den meisten synthetischen Fasern, deren Querschnitt keinen Hohlraum aufweist.

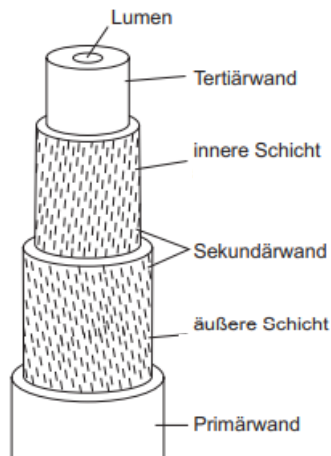


Abbildung 4: Verlauf der Mikrofibrillen in einer Flachs-Elementarfaser [Auri00]

Die weiteren Bestandteile der Flachs-Elementarfaser setzen sich aus Tertiärwand, Sekundärwand und Primärwand zusammen. Hier ist besonders die Sekundärwand von Bedeutung, da sie volumenmäßig den größten Anteil an der Elementarfaser ausmacht und somit der entscheidende Faktor für die mechanischen Eigenschaften ist [Auri00].

Um den Aufbau der Sekundärwand noch etwas besser zu verstehen, ist es hilfreich, die Bestandteile der Naturfasern im Detail zu betrachten.

Den Hauptbestandteil der pflanzlichen Zellwand bildet mit 50 % die Cellulose und ist damit der Grundbaustein für alle pflanzlichen Naturfasern.

Bei der Cellulose handelt es sich um ein Polysaccharid, einen Mehrfachzucker, der aus β -D-Glucose-Monomeren besteht, die β -1,4-glycosidisch miteinander verbunden sind. Diese Verknüpfung führt zur linearen Struktur des Moleküls, das aus mehreren hundert bis zehntausend Monomeren besteht. In Abbildung 5 ist der Aufbau des Cellulose-Moleküls schematisch gezeigt. Neben der linearen Anordnung ist die Cellulose besonders durch die Bildung von Wasserstoff-Brückenbindungen (OH-Brücken) geprägt. Intramolekulare Wasserstoffbrückenbindungen, in Abbildung 5 blau dargestellt, werden zwischen der OH-Gruppe eines Monomers und dem Ringsauerstoff des jeweils benachbarten Monomers gebildet, während auch intermolekular Wasserstoffbrückenbindungen gebildet werden. Diese entstehen zwischen der Hydroxymethylgruppe eines Moleküls und der OH-Gruppe eines anderen Moleküls.

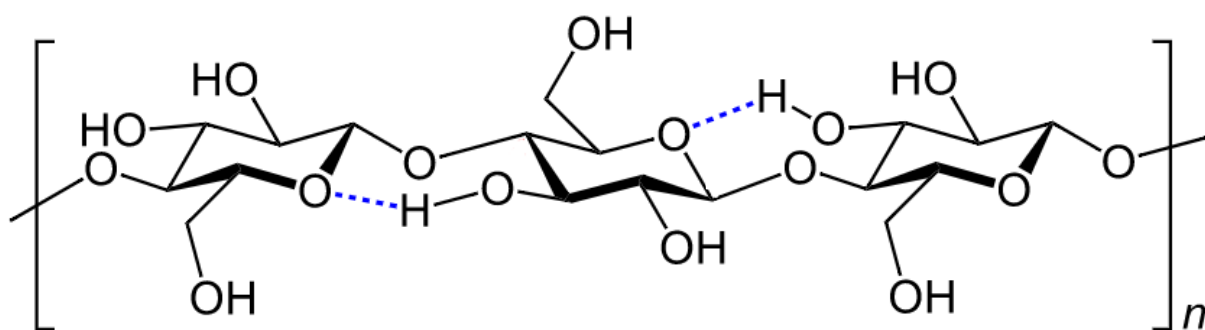


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Cellulose-Kette (intramolekulare OH-Brücken in blau), nach

In der Elementarfibrille, der kleinsten geordneten Einheit innerhalb des Pflanzenstängels, liegen mehrere Cellulose-Moleküle parallel nebeneinander vor. Analog bilden mehrere Elementarfibrillen zusammen eine Mikrofibrille [Kück14].

Die Mikrofibrillen verlaufen leicht angewinkelt in der Sekundärwand der Elementarfaser (Abbildung 4) und sind bei Bastfasern zumeist in Faserrichtung ausgerichtet, was neben einem hohen Cellulosegehalt für bessere Eigenschaften sorgt [PiEL16].

Zur Gewinnung der Elementarfasern werden diese vom Rest der Flachs-Pflanze getrennt. Dazu werden die Pflanzen zunächst samt der Wurzel aus dem Boden gerissen (Raufen), auf dem Feld zum Trocken liegen gelassen (Nachtrocknen) und von den Samenkapseln getrennt (Riffeln) [FIZR95]. Die Fasern können mit Hilfe einer Vielzahl an Verfahren gewonnen werden. Dazu zählen zum einen klassische Verfahren wie der biologische Aufschluss (Tauröste, Wasserröste), der chemische Aufschluss (Hitze, Säuren oder Laugen) oder der mechanische Aufschluss. Aufgrund steigender Ansprüche an eine gute und vor allem möglichst konstante Qualität der Fasern werden allerdings zunehmend neuere Verfahren verwendet, oft auch in Kombination mit klassischen Verfahren, um an die Fasern zu gelangen. Zu diesen Verfahren zählen z.B. der physikalische Aufschluss (Hochfrequenz-Behandlung, Dampfdruckaufschluss) oder neuere biologische Aufschlüsse (mikrobieller Aufschluss, enzymatischer Aufschluss) [Avki10].

Die Röste ist eines der wichtigsten Aufschlussverfahren und beruht auf dem Abbau des Pektins, das Fasern und Stängelbestandteile zusammenhält, mit Hilfe von Pilzen und Bakterien [FIZR95]. Sie kann ganz natürlich, z.B. in Form der Tauröste, ablaufen. Dazu verbleiben die Pflanzen nach der Ernte noch auf dem Feld, bis die biologischen Prozesse von allein einsetzen. Dieser Vorgang ist allerdings stark wetterabhängig und kann nur schwer kontrolliert werden, sein Vorteil liegt aber in den geringen Kosten. Durch neuere Röstverfahren kann der Aufschlussprozess besser kontrolliert werden und eignet sich außerdem gut, um in Kombination mit anderen, beispielsweise mechanischen Aufschlussverfahren, verwendet zu werden [Avki10].

Im nächsten Verfahrensschritt, dem Brechen, werden die Pflanzenstängel aufgebrochen, um die Holzschicht zu zerkleinern [FIZR95]. Je nach späterer Anwendung gibt es verschiedene Möglichkeiten der Weiterverarbeitung. Aufgrund der Relevanz für diese Arbeit wird hier auf die Weiterverarbeitung zu technischen Produkten eingegangen.

Zur Trennung von Langfasern bzw. den technischen Fasern von den Kurzfasern erfolgt der nächste Verfahrensschritt, das Schwingen [FIZR95]. Dabei können außerdem andere Restbestandteile des Pflanzenstängels von den Langfasern getrennt werden. Zur Veredelung der Fasern können abschließend Prozesse wie die mechanische Cottonisierung oder das Tensidverfahren angewendet werden, diese Verfahren sind jedoch teuer und zeitintensiv [FIZR95].

Naturfasern unterscheiden sich als Naturprodukt allerdings in einigen Aspekten deutlich von rein synthetisch hergestellten Fasern. Während bei Kohle- oder Glasfasern der Produktionsablauf streng geregelt und kontrolliert werden kann, verursachen bei Naturfasern neben dem Ernte- und Weiterverarbeitungsprozess auch die Wachstumsbedingungen Qualitätsschwankungen. Besonders die Wetterbedingungen können die späteren Eigenschaften stark beeinflussen und dafür sorgen, dass Fasern, die in zwei verschiedenen Jahren geerntet wurden, nicht die gleiche Qualität aufweisen.

Neben Schwankungen in der Qualität können ihre Feuchtigkeitsaufnahme von bis zu 50 % und ihre relativ gute Brennbarkeit eine Herausforderung bei der Verarbeitung darstellen. Bei

der Lagerung muss zudem berücksichtigt werden, dass Naturfasern von Mikroorganismen zersetzt werden können. Die mechanischen Eigenschaften der Naturfasern fallen zwar mit etwa einem Viertel der absoluten Festigkeit von Glasfasern zunächst scheinbar niedrig aus [Avki10], Glasfasern wiegen im direkten Vergleich allerdings auch bis zu 80 % mehr als Naturfasern, weshalb diese sich gut als Verstärkungswerkstoff im Leichtbau eignen.

2.1.1 Fertigungsverfahren von faserverstärkten Kunststoffen

Da im nachfolgenden Kapitel auf die Permeabilität selbst sowie ihre Herleitung eingegangen wird, werden zunächst die wichtigsten Fertigungsverfahren der faserverstärkten Kunststoffe beleuchtet. Sie zeigen, warum die Permeabilität eine so wichtige Rolle spielt und entscheidend darüber sein kann, ob die Fertigung gelingt.

Die duromeren Systeme werden in der Fertigung mit Hilfe von Prepregtechnologie oder der Infusionstechnologie verarbeitet. Die Prepregtechnologie beruht auf Faserhalbzeugen, die mit dem Harzsystem vorimprägniert werden. Durch die Lagerung der Prepregs bei niedrigen Temperaturen wird die vorzeitige Aushärtung des Harzes verhindert. Nachdem die Prepreg-Lagen in die gewünschte Anordnung gebracht worden sind, kann das Bauteil ausgehärtet werden.

Die Infusionstechnologie beruht hingegen auf der Verwendung von trockenem Textil, das mit dem Harzsystem infundiert wird. Aufgrund der Relevanz für diese Arbeit wird im Weiteren besonders auf das Resin-Transfer-Moulding-Verfahren (RTM) eingegangen, an dessen Beispiel die Wichtigkeit der Permeabilität für Infusionsverfahren deutlich wird.

Vor dem eigentlichen RTM-Verfahren kann die Preform-Herstellung erfolgen. Je nach Bauteilkomplexität oder Infusionsdruck kann es hilfreich sein, das Textil bzw. die Textillagen vor der eigentlichen Fertigung des Bauteils vorzuformen, damit das Halbzeug während des Prozesses seine gewünschte Form beibehält. Dieser Schritt wird als Preforming bezeichnet und kann je nach Anforderung, Material, Größe und Komplexität selbst bereits sehr komplex sein, weshalb eine Vielzahl an Verfahren zur Preform-Herstellung existieren [FIZR99]. Gegebenenfalls kommen zur Formfixierung des Preforms sogenannte Binder zum Einsatz. Diese wirken entweder als physische Verbindung zwischen den Fasern und Textillagen als Fixierung oder können als eine Art Kleber lagenweise aufgetragen werden. Dabei setzt sich der Binder auf dem Textil ab und verbindet so die Textillagen untereinander. Hierbei ist darauf zu achten, dass sich auch Binder auf die Permeabilität des Textils auswirken können [Dick15] und es daher wichtig ist, die Vorbehandlung des Textils bei der Permeabilitätsbestimmung zu berücksichtigen.

Nach Abschluss der Preform-Herstellung kann mit dem eigentlichen RTM-Verfahren begonnen werden. Die Form besteht aus einem Werkzeugoberteil und einem Werkzeugunterteil, die im geschlossenen Zustand die Infusion ermöglichen. Um ein Anhaften des Bauteils aufgrund des Harzes zu verhindern, muss die Werkzeugoberfläche entsprechend vorbehandelt werden, z.B. mit einem Trennmittel. Das Preform wird im nächsten Schritt in die Werkzeugkavität eingelegt und das Werkzeug verschlossen. Das duromere Harzsystem, bestehend aus Harz und Härter, wird vermischt und unter geringem Druck (< 6 bar) injiziert, um die Verformung des Preforms und eine Veränderung der Faserorientierung zu verhindern [FIZR99]. Ziel der Infusion ist es, das Bauteil vollständig und ohne Lufteinschlüsse zu infundieren, da Lufteinschlüsse sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirken und trockene Faserstellen eine Delamination des Bauteils begünstigen.

Hat das Bauteil einen ausreichenden Aushärtungsgrad erreicht, so kann es aus der Form entnommen werden. Eine vollständige Aushärtung wird durch die Nachhärtung (Tempern) in einem Ofen erzielt, so werden Aushärtungsgrade von über 98 % ermöglicht [FIZR99].

Im Rahmen der Fertigungsverfahren wird nun auch kurz auf die unterschiedlichen Textilarten eingegangen, die bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen zum Einsatz kommen. Zu den Fasersystemen zählen Gelege, Gewebe, Gestricke, Geflechte und Matten. Sie ermöglichen es, die Fasern als Verstärkungswerkstoff einfacher zu handhaben und erleichtern Prozesse wie das RTM-Verfahren. In der Praxis muss darauf geachtet werden, dass die Fasern im Bauteil möglichst entlang der Hauptbelastung verlaufen, um die bestmöglichen Eigenschaften zu erzielen. Auch deshalb ist die Wahl des richtigen textilen Halbzeuges wichtig für das Bauteil. Da im Rahmen dieser Arbeit mit einem Gelege und einem Gewebe gearbeitet wird, wird im Weiteren genauer auf diese zwei Fasersysteme eingegangen.

Das Gelege besteht aus Faserrovings, die schichtweise in der vorgesehenen Orientierung abgelegt und anschließend vernäht werden [FIZR99]. Gelege können ein- oder mehrlagig sein, wodurch sie auch individuell für spezielle Anforderungen angefertigt werden können. Die Fasern können daher im Falle eines UD-Geleges (unidirektional) nur entlang einer Achse oder im Falle eines multiaxial-Geleges entlang mehrerer Achsen verlaufen. Durch diesen schichtweisen Aufbau, bei dem die Fasern ohne Krümmungen verlaufen, können mit Gelegen hohe Faservolumengehalte erzielt werden. Der geradlinige Aufbau sorgt jedoch dafür, dass sich Gelege nicht beliebig gut entlang komplexer Geometrien ablegen lassen und sich daher für die Herstellung von flächigen Bauteilen eignen.

Bei der Herstellung von Geweben werden Faserrovings bzw. Fasergarne miteinander verwoben und auf diese Weise miteinander verbunden. Beim Gewebe wird zwischen Schuss- und Kettfaden unterschieden. Diese Begriffe stammen aus der Webtechnik, der Kettfaden verläuft im Webstuhl in Längsrichtung, während der Schussfaden quer dazu verläuft. Während des Webvorganges wird ein Teil der Kettfäden angehoben und der andere Teil leicht abgesenkt, wodurch kleine Zwischenräume entstehen, durch die dann der Schussfaden verläuft [Avki10]. Daraus resultiert ein relativ geradliniger Verlauf der Schussfäden, die Kettfäden hingegen folgen schematisch eher einem wellenförmigen Verlauf.

Die verschiedenen Gewebetypen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Bindungsart. Zu den wichtigsten Gewebearten gehören das Leinwand-, das Köper- und das Atlasgewebe, welche in Abbildung 6 dargestellt sind.

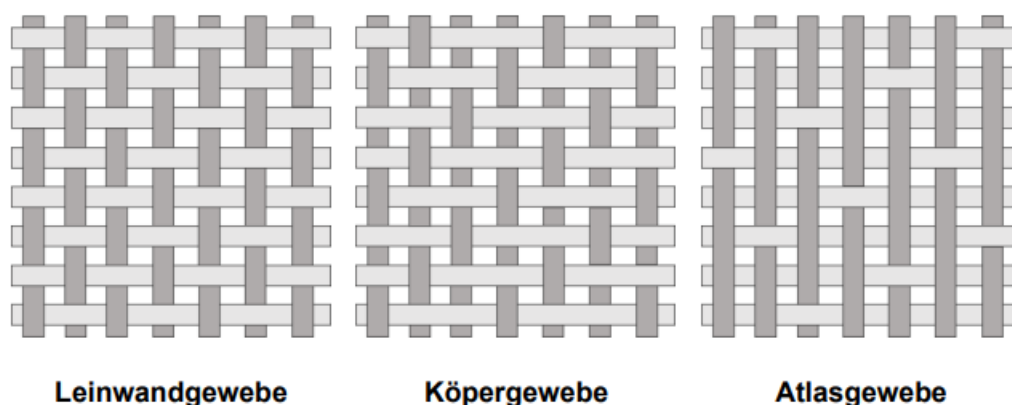


Abbildung 6: Schematische Darstellung der verschiedenen Gewebearten [Kenz21]

Das Leinwandgewebe eignet sich besonders gut, wenn die Einhaltung der Faserorientierung von besonderer Bedeutung ist, da sich der Faserwinkel nur schwer verändern lässt. Dies ist bei flächigen Bauteilen besonders vorteilhaft, schließt aber gleichzeitig die Verwendung eines

Leinwandgewebes für komplexe Geometrien aus, da die Leinwandbindung bei stark gekrümmten Bauteilen zur Faltenbildung neigt [FIZR99]. In diesen Fällen eignen sich Gewebe mit Körper- oder Atlasbindung besser, da sie sich komplexen Strukturen besser anpassen können.

Im Vergleich zum Gelege kommt es beim Gewebe zur Krümmung der Fasern an den Kreuzungspunkten, wodurch diese nicht mehr exakt gerade verlaufen und somit eine Verringerung in der Effektivität der Fasern in Hinsicht auf mechanischen Eigenschaften im Bauteil mit sich bringen.

2.1.2 Kompaktierung

Der Vorgang des Kompaktierens ist Grundlage vieler Fertigungsverfahren von Faserverbundwerkstoffen, insbesondere der Liquid Composite Moulding Verfahren (kurz LCM-Verfahren), und ermöglicht die variable Einstellung des Faservolumengehaltes im Bauteil. Die Vorkompaktierung beeinflusst so indirekt über den Faservolumengehalt auch die Permeabilität des textilen Halbzeuges.

Beim Kompaktieren von textilen Halbzeugen wird zwischen zwei Effekten unterschieden, der Relaxation und dem Rückstellverhalten. Die Relaxation kann beobachtet werden, wenn Druck auf das Textil ausgeübt wird. Mit der Zeit wird dieser Druck teilweise durch strukturelle Änderungen im Textil abgebaut. Der Effekt der Relaxation wird durch den Relaxationsquotienten, wie in Formel (1) beschrieben, dargestellt.

$$\frac{F_{t,vor} - F_{t,nach}}{F_{t,vor}} * 100 = R_{rel} \quad F_{t,vor}: \text{Kraft zu Beginn der Kompaktierung (1)}$$

$F_{t,nach}$: Kraft am Ende der Kompaktierung

R_{rel} : Relaxationsquotient

Neben der Relaxation lässt sich bei der Kompaktierung von textilen Halbzeugen ein zweiter Effekt beobachten, das Rückstellverhalten. Die Verformung durch die Kompaktierung hat einen plastischen, irreversiblen, und einen elastischen, reversiblen, Anteil. Das Textil breitet sich also nach Druckabnahme wieder um einen gewissen Anteil aus. Das Rückstellverhalten $R_{rück}$ lässt sich, wie durch Formel (2) gezeigt, als Verhältnis aus Ausgangshöhe des Textils und Textilhöhe nach einem Kompaktierungszyklus beschreiben.

$$\frac{d_{t,vor} - d_{t,nach}}{d_{t,vor}} * 100 = R_{rück} \quad R_{rück}: \text{Rückstellverhalten (2)}$$

$d_{t,vor}$: Textilhöhe vor Kompaktierung

$d_{t,nach}$: Textilhöhe nach Kompaktierung

Zur Bestimmung des Kompaktierungsverhaltens existiert zum aktuellen Zeitpunkt noch keine Norm. Eine gängige Methode besteht in der Prüfung von runden oder quadratischen Proben, die in einer Universalprüfmaschine kompaktiert werden. Die in dieser Arbeit verwendete Methode zur Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens der Flachs-Textilien ist angelehnt an andere Arbeiten, die in diesem Bereich am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik der TU Clausthal durchgeführt worden sind [WJXK13];[Aran16];[Kenz21]. Das genaue Vorgehen wird in Kapitel 3.3.1 beschrieben.

Wie ein textiles Halbzeug auf die Kompaktierung reagiert, hängt von der Art der Faser, der Textilart, der Anzahl an Textillagen sowie Kompaktierungsdruck-, -temperatur und -geschwindigkeit ab. Aufgrund ihrer Eigenschaft, Feuchtigkeit aufzunehmen, spielt es bei Naturfasern zudem eine Rolle, ob die Kompaktierung trocken oder feucht durchgeführt wird, da sich die mechanischen Eigenschaften der Fasern in Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehaltes verändern [BIGa95].

2.2 Permeabilität

Wie bereits im Kapitel 2.1.1 beschrieben, ist die Permeabilität eine der wichtigen Kenngrößen, wenn es um die Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen geht. Im Allgemeinen beschreibt sie die Durchlässigkeit eines Mediums für Gase oder Flüssigkeiten. Je höher der Permeabilitätswert ist, desto besser kann das Medium vom Gas oder der Flüssigkeit durchdrungen werden. Die Permeabilität ist daher besonders bei Infusionsvorgängen von textilen Halbzeugen im Bereich der Faserverbundwerkstoffe von Bedeutung, da sie angibt, wie gut ein Matrixsystem das textile Halbzeug durchdringen kann.

Der Wasserbauingenieur Henry Philibert Gaspard Darcy fand bei seinen Arbeiten in Dijon als erster einen empirischen Zusammenhang der laminaren Strömung innerhalb eines porösen Mediums [Darc56]. Gleichung (3) beschreibt die von Darcy im Jahr 1856 gefundenen Zusammenhang, der eine spezielle Lösung der Navier-Stokes-Gleichung darstellt und heute als Darcy-Gleichung bekannt ist.

$$Q = \kappa * A * \frac{i}{L} \quad \text{mit:} \quad \begin{array}{ll} Q: & \text{Volumenstrom} \\ A: & \text{Fläche des Mediums} \\ i: & \text{hydraulisches Potential} \\ \kappa: & \text{Durchlässigkeitsbeiwert} \end{array} \quad (3)$$

Eine andere Schreibweise der Darcy-Gleichung, in der die Permeabilität direkt vorkommt, zeigt Gleichung (4):

$$v = \frac{K}{\eta} * \frac{\delta p}{\delta l} \quad \text{mit:} \quad \begin{array}{ll} K: & \text{Permeabilität} \\ v: & \text{über das Volumen gemittelte Geschwindigkeit} \\ \eta: & \text{Viskosität der Messflüssigkeit} \\ p: & \text{Druck} \\ l: & \text{Fließlänge} \end{array} \quad (4)$$

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Flüssigkeit im Medium bewegt, und somit auch die Permeabilität, werden von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Die Verstärkungsfaser beeinflusst nach [Shaf96] durch die Art und Konstruktion des Textils, Art des Garns, Schlichte und Haftvermittler, Lagenaufbau und durch die Oberflächenspannung die Permeabilität. Eigenschaften wie die Porosität oder der Kontaktwinkel lassen sich nach [FIZR99] dem Zusammenspiel aus Matrix und den Fasern zuschreiben.

Weiterhin kann der Injektionsdruck die Permeabilität beeinflussen, wenn dieser gering ausfällt. Dies ist mit Kapillareffekten im Garn, die sich mit dem angelegten Druckgradienten überlagern, zu erklären [Rieb11]. Dieser Effekt kann während der eigentlichen Permeabilitätsmessung auftreten, wenn ein geringer Injektionsdruck gewählt wird. Nach [Weit96] spielt der Kapillareffekt aber bei hohen Drücken, wie sie beispielsweise im RTM-Verfahren eingesetzt

werden, keine Rolle. Jedoch kann es bei zu hohen Drücken zu einem gegenteiligen Effekt kommen, bei dem die Fließfront zwischen den Rovings schnell voranschreitet und innerhalb der Rovings zurückbleibt.

Im Weiteren wird in Anlehnung an Gleichung (3) in Ansätzen die Gleichung zur Berechnung der Permeabilität hergeleitet, wie sie auch am Permeabilitätsmessstand des Instituts für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik verwendet wird.

Dazu wird Gleichung (3) zu Gleichung (5) vereinfacht:

$$Q = \kappa * A * u \quad \text{mit:} \quad u: \quad \text{hydraulischer Gradient} \quad (5)$$

Zur Berechnung des hydraulischen Gradienten nach Gleichung (6) wird der Fluiddruck und die potenzielle Energie der Flüssigkeitssäule zwischen Einlass und Auslass benötigt:

$$u_i = \frac{p_i}{\rho * g} \quad \text{mit:} \quad \begin{array}{ll} p_i: & \text{Fluiddruck} \\ \rho: & \text{Fluiddichte} \\ g: & \text{Erdbeschleunigung} \end{array} \quad (6)$$

Der Permeabilitätsmessstand besteht aus einem waagerechten Aufbau und Fluideinlass und -auslass befinden sich auf derselben Höhe, weshalb bei der Lösung der Gleichung kein Winkel berücksichtigt werden muss. Zur weiteren Herleitung des Volumenstroms wird noch die Definition des Durchlässigkeitsbeiwertes κ benötigt:

$$\kappa = K * \frac{\rho * g}{\eta} \quad \text{mit:} \quad \begin{array}{ll} K: & \text{Permeabilität} \\ \eta: & \text{dynamische Viskosität} \end{array} \quad (7)$$

Nun können die Gleichungen (6) und (7) in Gleichung (3) eingesetzt werden und es ergibt sich Gleichung (8):

$$Q = \frac{A * K}{\eta} \left(\frac{p_1 - p_2}{L} \right) \quad (8)$$

Für drei Dimensionen lässt sich Gleichung (8) wie folgt erweitern:

$$Q = -\frac{A * \vec{\kappa} * K}{\eta} (\nabla p + \rho \vec{g}) \quad \text{mit:} \quad \nabla: \quad \text{Nabla-Operator} \quad (9)$$

Um eine Gleichung in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit zu erhalten, wird nun die Durchflussrate mit ihrer Definition ersetzt und es ergibt sich Gleichung (10):

$$Q = \vec{v} A \vec{n} \quad \text{mit:} \quad \begin{array}{ll} \vec{v}: & \text{Fließgeschwindigkeit} \\ A: & \text{Querschnittsfläche} \end{array} \quad (10)$$

Damit folgt Gleichung (11):

$$\vec{v} = -\frac{K}{\eta} (\nabla p + \rho \vec{g}) \quad (11)$$

Da die Bestimmung der Permeabilität am Prüfstand anhand des Fließfrontfortschritts stattfindet, muss Gleichung (11) weiter umgeformt werden. Gleichung (12) gibt die Permeabilität in Abhängigkeit der Fließfront zu einem bestimmten Zeitpunkt an. Die schrittweise Herleitung dieser und aller weiteren folgenden Gleichungen dieses Unterkapitels kann in der Dissertation „Einfluss von Binder auf die Herstellung von Faserkunststoffverbunden“ von Matthias Dickert [Dick15] (Kapitel: Herleitung der Permeabilität) im Detail nachvollzogen werden.

$$K = -\frac{\Phi\eta}{2(p_{Ff}-p_{ein})t} \left(x_{Ff}(t) \right)^2 \quad \text{mit:} \quad \begin{array}{ll} \Phi: & \text{Porosität} \\ p_{Ff}: & \text{Druck an Fließfront} \\ x_{Ff}: & \text{Fließfrontposition} \\ p_{ein}: & \text{Druck am Einlass} \end{array} \quad (12)$$

Gleichung (10) ermöglicht die Bestimmung der Permeabilität im eindimensionalen Fall. Da die Messungen aber am 2D-Prüfstand durchgeführt werden, muss die Permeabilität anhand der Fließfrontausbreitung für den zweidimensionalen Fall bestimmt werden. Nach [Klun08] gilt für ein isotropes Medium bei einer Injektion des Öls mit konstantem Druck, einem Punktangussradius r_{ein} und dem Radius der Fließfront r_{Ff} :

$$K = \frac{\Phi\eta}{4t(p_{Ff}-p_{ein})} \left(r_{Ff}^2 \left(2\ln\left(\frac{r_{Ff}}{r_{ein}}\right) - 1 \right) + r_{ein}^2 \right) \quad (13)$$

Da die in dieser Arbeit geprüften Textilien allerdings nicht als isotrope Medien angenommen werden können und orthotrope Eigenschaften aufweisen, muss Gleichung (13) weiter angepasst werden.

Eine Erweiterung der Formel für anisotrope Materialien wird z.B. nach [Klun08] beschrieben. Die Permeabilitätswerte werden dabei in Abhängigkeit der Hauptrichtungen der Fließellipse und der Fließlängen a_f und b_f angegeben:

$$K_a = \frac{\Phi\eta}{4t(p_{Ff}-p_{ein})} \left(\left(a_f \sqrt{\frac{b_f}{a_f}} \right)^2 \left(2\ln\left(\frac{a_f \sqrt{\frac{b_f}{a_f}}}{r_{ein}}\right) - 1 \right) + r_{ein}^2 \right) \frac{a_f}{b_f} \quad (14)$$

$$K_b = \frac{\Phi\eta}{4t(p_{Ff}-p_{ein})} \left(\left(b_f \sqrt{\frac{a_f}{b_f}} \right)^2 \left(2\ln\left(\frac{b_f \sqrt{\frac{a_f}{b_f}}}{r_{ein}}\right) - 1 \right) + r_{ein}^2 \right) \frac{b_f}{a_f} \quad (15)$$

Um Proben, die bei unterschiedlichen Kavitäten geprüft werden, miteinander vergleichen zu können, eignet sich der Faservolumengehalt gut als Referenzwert. Eine Abschätzung des Faservolumengehaltes ist mit Hilfe von Formel (16) möglich:

$$FVG = \frac{m_{\text{Textilprobe}}}{A_{\text{Textilprobe}} \cdot \text{Kavität} \cdot \rho_{\text{Flachsfaser}}} \quad (16)$$

Der Faservolumengehalt kann mit Formel (16) allerdings nur abgeschätzt werden, da für die Dichte der Flachsfasern ein Literaturwert von etwa 1400 kg/m³ verwendet wird und für eine genauere Berechnung die exakte Dichte der Fasern bestimmt werden müsste. Formel (16) kann außerdem nach der Kavität umgestellt werden, wenn eine Permeabilitätsmessung bei einem bestimmten Faservolumengehalt durchgeführt wird und die entsprechende Kavität eingestellt werden muss.

2.3 Stand der Technik - Permeabilitätsmessung

Zur besseren Einordnung des verwendeten Permeabilitätsmessstandes wird in diesem Kapitel ein Überblick über die verschiedenen Methoden der Permeabilitätsmessung gegeben. Da für die Messung der Permeabilität von technischen Textilien bisher kein international anerkannter Standard existiert, gibt es eine Vielzahl an Messanlagen und Unterschieden in der Bestimmung der Permeabilität.

Die Permeabilität eines textilen Halbzeugs kann hauptsächlich auf drei verschiedene Arten erfolgen, mit der 1D-Messung, der 2D-Messung oder einer Messung in z-Richtung. Diese verschiedenen Arten der Messung sind aufgrund der Anisotropie der Textilien notwendig, da die Ausrichtung der Fasern die Ausbreitung der Fließfront beeinflusst und dafür sorgt, dass sich die Permeabilität in Abhängigkeit der Faserorientierung ändert.

Die 1D-Messung ist schematisch in Abbildung 7 dargestellt. Ziel der 1D-Messung ist eine gleichmäßige, lineare Ausbildung der Fließfront. Das zu prüfende Textil wird dazu rechteckig zugeschnitten und so auf den Messaufbau gelegt, dass sich die beiden kurzen Seiten jeweils am Messfluidzufluss und -abfluss befinden. Um eine gleichmäßige Ausbreitung zu garantieren, muss der Aufbau an allen Seiten verschlossen werden. So kann verhindert werden, dass die Flüssigkeit an den Seiten der Probe voraneilt und es zum sogenannten Race-Tracking kommt, bei der sich die Fließfront nicht mehr gleichmäßig ausbreitet und die Ergebnisse verfälscht werden.

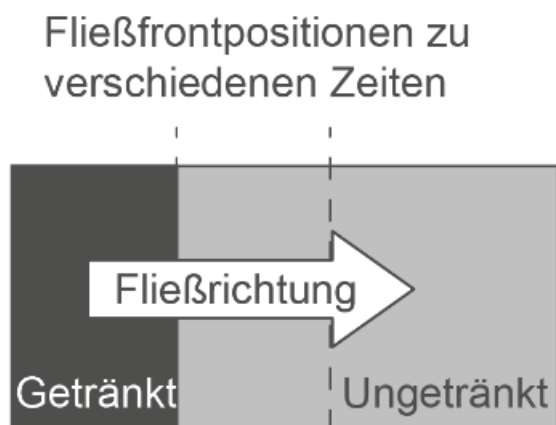


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Fließfrontausbildung einer 1D-Messung [Dick15]

Die Auswertung einer solchen 1D-Messung kann außerdem auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Hier wird zwischen der stationären und interstationären Messung unterschieden. Die stationäre Messung zielt darauf ab, die Probe gänzlich mit Messfluid zu sättigen und anhand

des Massestroms zwischen Fluideinlass und -auslass die Permeabilität zu ermitteln. Dieser Vorgang kann allerdings je nach Probe sehr lange dauern, da zur Erreichung eines konstanten Massestroms erst alle Hohlräume gefüllt werden müssen. Da eine vollständige Sättigung nur schwer zu überprüfen ist, wird zur Erreichung des Sättigungszustandes daher über einen längeren Zeitraum gespült [Dick15].

Der stationären Messung steht die interstationäre Messung gegenüber, bei der die Permeabilität anhand der Fließfront ermittelt wird. Zur exakten Erfassung der Fließfront können optische, dielektrische oder druckempfindliche Verfahren zum Einsatz kommen.

Interstationäre Verfahren sind allgemein weniger zeitintensiv und ermöglichen die Beobachtung der Fließfront während der Messung. Im Falle der 1D-Messung ist zudem die Ausrichtung der Probe relevant, da bei isotropen Materialien gegebenenfalls mehrere Messungen durchzuführen sind, um die Permeabilität in Haupt- und Nebenrichtung der Probe zu ermitteln.

Eine zweite Messung dieser Art zur Ermittlung der Permeabilität entlang der beiden Hauptachsen ist bei der Verwendung einer 2D-Messungen hingegen nicht nötig. Sie beruht auf der gleichmäßigen Ausbreitung des Messfluides ausgehend von einem mittigen Punktaguss. Je nach Textilbeschaffenheit bildet sich dabei eine kreis- oder ellipsenförmige Fließfront aus, die in der Regel zur Bestimmung der Permeabilität herangezogen wird. Im Gegensatz zur 1D-Messung ist die Abdichtung des Aufbaus nicht nötig, da die Messung beendet wird, sobald die Fließfront den Rand der Probe erreicht. Der schematische Aufbau einer solchen Messung ist in Abbildung 8 dargestellt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Permeabilität in die Haupt- und Nebenrichtung meist als Permeabilität K_a bzw. K_b beschrieben. K_a steht dabei für die Permeabilität in Hauptrichtung A und K_b für die Permeabilität entlang der Nebenachse B.

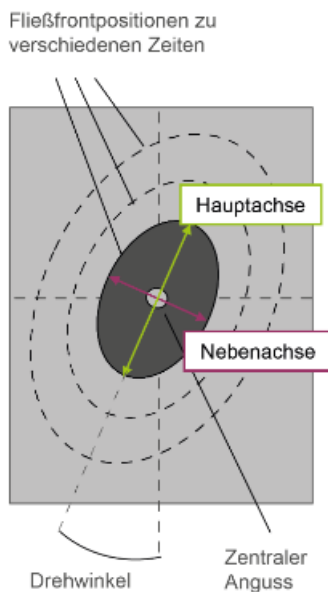


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Fließfrontausbildung einer 2D-Messung [Dick15]

Da der Aufbau weder abgedichtet werden, noch auf eine vollständige Sättigung der Probe gewartet werden muss, bietet die 2D-Messung eine zeitsparende Alternative gegenüber der 1D-Messung und ermöglicht gleichzeitig die Bestimmung der Permeabilität in beide Hauptrichtungen. Sie bietet außerdem mit einer einzigen Messung mehr Faktoren, um verschiedene textile Halbzeuge miteinander zu vergleichen, wie z.B. das Verhältnis der Permeabilität der beiden Hauptrichtungen.

Die dritte Methode zur Permeabilitätsmessung ist die Messung in z-Richtung, bei der die Permeabilität senkrecht zur Halbzeug-Ebene gemessen wird.

Eine solche Messung kann sinnvoll sein, wenn es um die Herstellung von besonders dicken Bauteilen geht. Da sich eine Auswertung anhand der Fließfront hier aber etwas schwieriger gestaltet, werden solche Messungen vorzugsweise stationär durchgeführt [Dick15].

Neben den verschiedenen Arten der Permeabilitätsmessung (1D-, 2D- und in z-Richtung) unterscheiden sich auch die Messmethoden in der Permeabilitätsmessung. Im Rahmen eines weltweiten Ringtests [ABBB11];[VRAA14] wurde zwar an einer Standardisierung der Permeabilitätsmessung gearbeitet, jedoch lässt sich anhand der teilnehmenden Einrichtungen und ihrer Verfahren eine Vielzahl von Messmethoden unterscheiden.

So kann die Fließfront während der Messung beispielsweise optisch oder mit Hilfe von elektrischen Sensoren erkannt werden, aber auch das Messen des Druckfeldes durch eine Anordnung von Drucksensoren ist möglich. Bei stationären Verfahren sind das Messen des Massestroms ebenso wie die Verwendung von Drucksensoren verlässliche Methoden zur Permeabilitätsmessung.

Die Wahl der Messflüssigkeit wird von verschiedenen Faktoren wie der Interaktion der Messflüssigkeit mit der Probe, Wiederverwendbarkeit, Reinigungsaufwand oder dem Preis beeinflusst. Die beste Vergleichbarkeit würde zwar immer eine Messung mit dem späteren Harzsystem liefern, allerdings bedeutet dies aufgrund der aufwendigen Reinigung einen erheblich größeren zeitlichen Aufwand pro Messung, weshalb spezielle Messfluide eingesetzt werden. Zu den am häufigsten verwendeten Messfluiden gehören Maissirup, Glukoselösungen, Silikonöl, Speiseöl und Motorenöl [ABBB11].

3. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

3.1 Versuchsaufbau

Für die Permeabilitätsmessungen wird der Messstand am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik der TU Clausthal verwendet. Im Rahmen einer Reihe von wissenschaftlichen Arbeiten am Institut wurde der Messstand immer weiter optimiert und verbessert, um die Permeabilitätsmessung zu vereinfachen und um ein Vielfaches zu beschleunigen. In früheren Iterationen des Messstandes mussten viele Tätigkeiten noch rein händisch getätigt werden, wodurch Messungen teils mehr als eine Stunde in Anspruch genommen haben. Auch die Auswertung der Messungen selbst war sehr zeitaufwändig. Der verwendete aktuelle Messstand ist in Abbildung 9 zu erkennen. Dieser beruht auf der sich verändernden Fließfront, die mit Hilfe einer Industriekamera beobachtet wird. Die Steuerung erfolgt über einen mit dem Messstand verbundenen PC, über den auch die Auswertung erfolgt.

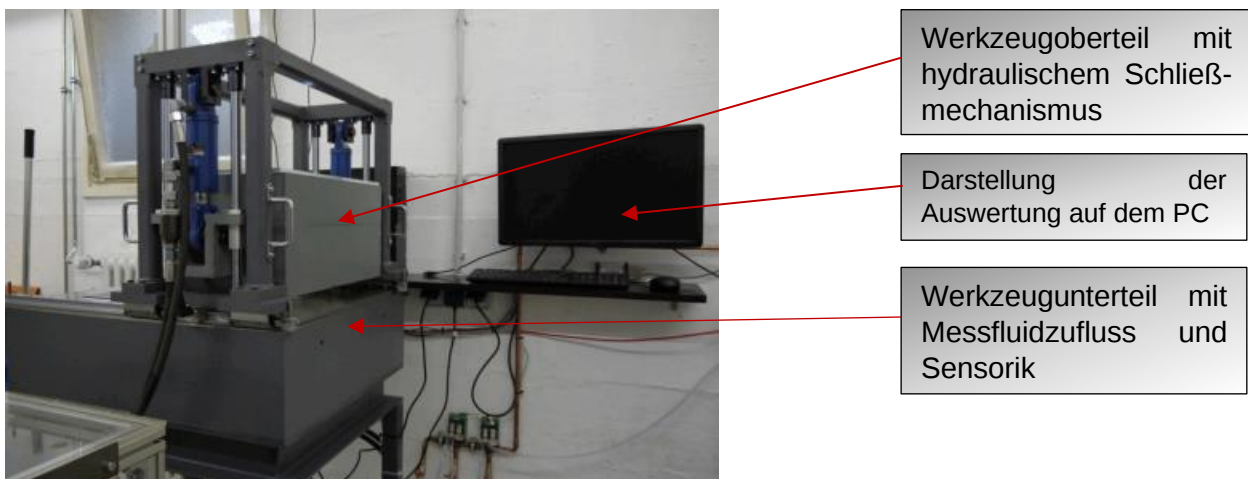


Abbildung 9: Permeabilitätsmessstand am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

Der Messstand besteht aus einem Werkzeugoberteil, das auf einem Schienensystem verschoben werden kann, und einem Werkzeugunterteil, auf dem der Aufbau ruht und durch den der Messfluidzufluss erfolgt. Der Messstand ist außerdem zweigeteilt; auf der linken Seite können 1D-Messungen durchgeführt werden, während die rechte Seite für 2D-Messungen konzipiert wurde.

Im Folgenden werden in Anlehnung an die Weiterentwicklung des Messstandes kurz die einzelnen Bestandteile und ihre Funktion beschrieben. Die Komponenten wurden im Rahmen der Dissertation von Matthias Dickert „Einfluss von Binder auf die Herstellung von Faserkunststoffverbunden“ [Dick15] konzipiert und realisiert und bietet einen noch detaillierteren Einblick in Planung und Umsetzung.

Der untere Teil des Messstandes besteht aus einer Bodenplatte aus Vollmaterial, die sich innerhalb der Gewichtsbeschränkungen für den Messstand befindet. Sie ermöglicht die geringste Durchbiegung bei Belastung und bietet zudem Platz für den bereits genannten zweiteiligen Aufbau. Die Bodenplatte hat Aussparungen für Sensoren, mit denen sich der Injektionsdruck des Messfluides überwachen und steuern lässt. Neben den Sensoren gibt es ebenfalls Aussparungen für die Zuflüsse des Messfluides in der Bodenplatte. Die Sensoren und Zuflüsse werden in einer Stahlarbeitsplatte montiert, die auf die Bodenplatte gelegt wird und gleichzeitig als Schutz der Bodenplatte dient.

Die Messfluidzuflüsse unterscheiden sich je nach Messweise. Der 2D-Messstand hat einen zentralen Zufluss, von dem aus sich die Flüssigkeit nach außen gleichmäßig verteilen kann, der 1D-Aufbau verfügt über einen Zu- und Abfluss, der ungesättigte als auch gesättigte Permeabilitätsmessungen ermöglicht, indem der Massestrom des Messfluides am Abfluss gemessen wird.

Der obere Teil des Messstandes setzt sich aus dem Deckel und dem Transport- und Schließmechanismus des Deckels zusammen. Der Deckel dient dabei zum Abdichten und Verschließen des Aufbaus und muss daher über eine möglichst hohe Steifigkeit verfügen. Gleichzeitig befindet er sich im Aufbau direkt zwischen der Probe und der Industriekamera, die die Fließfront beobachtet. Der Deckel darf das Sichtfeld der Kamera daher nur so wenig wie möglich einschränken. Ein Konstruktionsbeispiel ist in Abbildung 10 dargestellt. Neben der Dicke, Anzahl und des Winkels der Streben untereinander spielt auch die Wandhöhe eine Rolle für Steifigkeit und Sichtbarkeit des Aufbaus. Sie beträgt am Messstand 20 cm, sodass die Konstruktion einen guten Kompromiss zwischen Sichtbarkeit und Steifigkeit bietet.

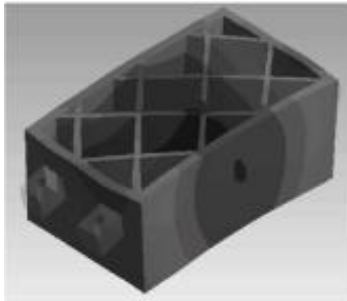


Abbildung 10: Beispielhaftes Modell des Deckels [Dick15]

Der Transport- und Schließmechanismus muss ebenfalls großen, vor allem statischen Lasten standhalten können. Der Schließmechanismus beruht auf einer Kombination von Führungsachsen und Hydraulikzylindern, deren maximaler Systemdruck bei 160 bar liegt [Dick15]. Das Transportsystem besteht aus Kugelumlaufführung und Schwalbenschwanzschiene [Dick15].

Der Aufbau des Messstandes ermöglicht es, dass Messungen von einer einzigen Person durchgeführt werden können. Zudem kann ein Messzyklus, bestehend aus Aufbau, Messung, Reinigung und Vorbereitung, relativ schnell abgearbeitet werden, wodurch die Durchführung mehrerer Messungen pro Stunde möglich wird. Es ist ebenfalls möglich, 1D- und 2D-Messungen nebeneinander auf dem Messstand durchzuführen. Zwar können die Messungen nicht direkt parallel erfolgen, während auf einer Seite gemessen wird kann der andere Aufbau aber bereits vorbereitet werden.

Die Auswertung erfolgt an einem PC, welcher mit der Industriekamera sowie den Sensoren verbunden ist. Die Industriekamera nimmt den Fortschritt der Fließfront mit bis zu drei Bildern pro Sekunde auf und überträgt sie an den PC. Auch die Sensordaten werden zusammengeführt und in Abhängigkeit der Zeit gespeichert.

Zur Errechnung der Permeabilität werden zwei Bilder während der Messung miteinander verglichen. Dabei kann das Intervall zwischen den zwei Bildern angepasst werden. Bei einer langsamen Fließfrontausbildung muss das Intervall größer gewählt werden. Die Fließfronterkennung des Programms ist beispielhaft in Abbildung 11 gezeigt.

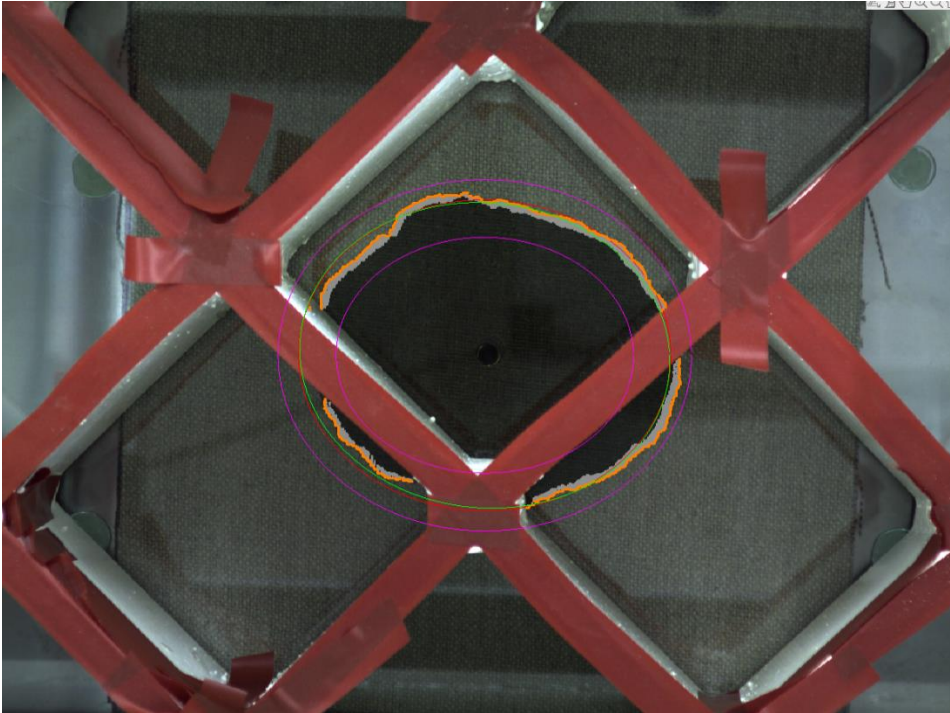


Abbildung 11: Fließfronterkennung aus dem Benutzer-Interface des Matlab-Programms

Das Programm vergleicht ein Foto mit einem (je nach gewähltem Intervall) vorherigen Foto und sucht im später aufgenommenen Foto nach Veränderungen. Durch das Voranschreiten der Fließfront im Textil werden alle Stellen, die bereits mit Messfluid durchtränkt sind, dunkler und vom Programm beim Abgleich als Veränderung erkannt. Alle Pixel, die eine Veränderung zum Vorgängerbild darstellen, werden orange markiert und zur Berechnung herangezogen. Das Programm kann so aus der Menge der sich verändernden Pixel pro Zeit die Fließfrontgeschwindigkeit errechnen. Neben diesen Daten müssen standardmäßig auch die relevanten Daten zum Messfluid, wie Viskosität und Temperatur, im Programm hinterlegt sein. Die in Abbildung 11 erkennbare hellgrüne Ellipse stellt die vom Programm errechnete ideale Fließfront in Ellipsenform dar. Die zwei lilafarbenen Ellipsen markieren den Bereich, in dem nach Veränderungen gesucht wird.

Aus den aufgenommenen Daten sowie aus den anhand der Fließfront gewonnenen Daten errechnet das Programm dann die Permeabilität in Abhängigkeit von der Zeit (vgl. Formel (14) und (15), Kapitel 2.2). Die Permeabilität wird immer für beide Hauptrichtungen angegeben, um bei anisotropen Textilien und ihrer ellipsenförmigen Fließfront mit einer Messung Daten für die beiden Hauptrichtungen zu erhalten.

3.2 Struktureller Aufbau

Die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit gliedern in sich zwei Teile. Im ersten Versuchsteil wird der Einfluss der zyklischen Vorkompaktierung auf Flachsgewebe und Flachsgelege möglichst isoliert von anderen Einflussfaktoren untersucht. Hier ist aufgrund der Unterschiede in der Textilstruktur eine niedrigere Permeabilität des Gewebes zu erwarten. Der Einfluss der Vorkompaktierung auf die Permeabilität bei gleichbleibendem Faservolumengehalt ist hingegen schwerer abzuschätzen. Der zweite Versuchsteil dient zur Untersuchung der Flachsfasertextilien bei sich verändernden Faservolumengehalten. Dazu wird zunächst ein Vorversuch durchgeführt, bei dem das Kompaktierungsverhalten sowie das

Relaxationsverhalten der beiden Textilarten untersucht wird. Im zweiten Teil werden die Proben dann auf verschiedene Höhen kompaktiert, um eine Reihe von Faservolumengehalten zu erreichen. Hier ist neben möglichen Effekten der Vorkompaktierung eine Verringerung der Permeabilität bei steigenden Faservolumengehalten zu erwarten. Bevor in den nachfolgenden drei Unterkapiteln genauer auf die einzelnen Schritte eingegangen wird, die pro Messung nötig sind, wird hier kurz ein Überblick über die einzelnen Versuchsparameter gegeben.

Versuchsteil 1:

Um den Einfluss der zyklischen Vorkompaktierung auf die Permeabilität möglichst gut zu isolieren, muss vor allem garantiert werden, dass der Einflussfaktor des Faservolumengehaltes während dieser Messungen keine Rolle spielt. Ziel ist es daher, dass unabhängig von der Anzahl der durchgeführten Kompaktierungen die Proben während der Permeabilitätsmessung dieselbe Höhe haben oder sich zumindest im Messstand auf dieselbe Höhe kompaktieren lassen.

Die Wahl dieser Höhe bzw. der Kavität wird allerdings durch den Messstand selbst eingeschränkt. Die Zylinder, die das Oberteil des Messstandes absenken, ermöglichen einen Maximaldruck auf die Probe von 7 bar, weshalb die Kavität so gewählt werden muss, dass der Messstand die Probe auch aus eigenen Kräften auf die gewählte Höhe bringen kann. Auf der Basis einiger Vorversuche zeigt sich, dass eine Kavität von 1,7 mm konstant erreicht werden kann. Auf diese Weise können nicht vorkompaktierte Proben, die lediglich direkt vor der Messung durch den Messstand kompaktiert werden, mit Proben verglichen werden, die zyklisch vorkompaktiert werden. Eine konstante Kavität während der Permeabilitätsmessung wird durch Abstandshalter garantiert.

Eine weitere Schwierigkeit stellt die Wahl des Kompaktierungsdruckes zur Vorkompaktierung an der Presse dar. Wird dieser zu hoch gewählt, so wird die Probe möglicherweise auf eine Dicke unterhalb der gewählten Kavität von 1,7 mm kompaktiert, und auch wiederholte Kompaktierungen sorgen für eine Verringerung der Probenhöhe. Beim Prüfen einer Probe mit einer Höhe, die geringer ausfällt als die durch die Abstandshalter eingestellte Kavität am Permeabilitätsmessstand, kann es dazu kommen, dass sich ein Hohlraum zwischen Probe und Abdeckung bildet. Die Messflüssigkeit würde sich dann primär in diesem Hohlraum ausbreiten und die Messung wäre nicht verwendbar.

Aufgrund dieser Problematik werden Abstandshalter auch während des Pressvorgangs verwendet, um eine Unterschreitung der gewählten Höhe auszuschließen. Die Wahl des Druckes wird so vereinfacht, da nur sichergestellt werden muss, dass der eingestellte Druck ausreicht, um die Probe auf die gewählte Dicke zu pressen. Die Wahl fällt auf einen Druck von 50 bar. Tabelle 1 zeigt die Versuchsmatrix des ersten Versuchsteils.

Tabelle 1: Versuchsteil 1; Versuchsmatrix (Kompaktieren und Permeabilitätsmessung mit Abstandshaltern)

Anzahl Kompaktierungen	$\pm 45^\circ$ -Flachsegele, Anzahl Messungen	Flachsgewebe mit Leinwandbindung, Anzahl Messungen
unkompaktiert	5	5
1x-kompaktiert	5	5
3x-kompaktiert	5	5
5x-kompaktiert	5	5

2. Versuchsteil

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird die Permeabilität in Abhängigkeit verschiedener Faservolumengehalte und Zykluszahlen gemessen. Um einschätzen zu können, welche Drücke benötigt werden, um eine bestimmte Probenhöhe zu erreichen, wird eine Testversuchsreihe an zwei Universalprüfmaschinen durchgeführt. In Kapitel 4.3.1 wird darauf genauer eingegangen. Die Permeabilitätsmessungen des zweiten Teils folgen der Versuchsmatrix in Tabelle 2.

Tabelle 2: Versuchsteil 2; Versuchsmatrix (Kompaktierung und Permeabilitätsmessung ohne Abstandshalter)

Verwendeter Kompaktierungsdruck	Flachsgewebe mit Leinwandbindung	
	1x-kompaktiert, Anzahl Messungen	3x-kompaktiert, Anzahl Messungen
25 bar	5	5
62,5 bar	5	5
100 bar	5	5
137,5 bar	5	5

Dabei wird der Kompaktierungsdruck an der Laborpresse, angelehnt an die Vorversuche, verändert, um das Textil auf immer geringere Probenhöhen zu bringen und so schrittweise höhere Faservolumengehalte zu erzielen. Parallel werden all diese Messungen jeweils mit einer Vorkompaktierung und mit drei Vorkompaktierungen durchgeführt. Auf diese Weise werden die Ergebnisse des ersten Teils überprüft und ein Verlauf der Permeabilität in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes erstellt.

3.3 Versuchsdurchführung

3.3.1 Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens

Im zweiten Teil dieser Arbeit werden die Proben mit unterschiedlich hohem Druck kompaktiert, um unterschiedliche Probendicken und somit auch unterschiedliche Faservolumengehalte zu erhalten. Dazu werden Tests an zwei Universalprüfmaschinen (BZ2-MM100TL.ZW01 / BZ1-MM14450.ZW05) der Firma ZwickRoell durchgeführt. Es werden Textillagen mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm zugeschnitten. Bei den Textilien handelt es sich um ein Flachs-Gelege und ein Flachs-Gewebe, auf die im Kapitel 4.4 noch genauer eingegangen wird. Jede Probe besteht aus drei Lagen und wird für 15 Minuten gepresst und anschließend für 15 Minuten entlastet. Dieser Zyklus wird dreimal wiederholt.

Die Kompaktierung wird mit einer 100 kN Kraftmessdose an der Universalprüfmaschine BZ2-MM100TL.ZW01 der Firma ZwickRoell durchgeführt. Dabei wird die Kraft, mit der kompaktiert wird, von Probe zu Probe ausgehend von 10 kN in 5 kN Schritten bis zum Wert von 25 kN erhöht. Umgerechnet entspricht dies Drücken von 40 bis 100 bar in Schritten von 20 bar. Im zweiten Schritt wird an der zweiten Universalprüfmaschine BZ1-MM14450.ZW05 der Firma ZwickRoell die Dicke der Probe gemessen, indem die Probe mit einem Druck von ca. 1 bar erneut kurz zusammengedrückt wird. Anhand des Werkzeugabstandes der Prüfmaschine kann so die Probendicke ermittelt werden. Im Anschluss daran wird die Probe für 15 Minuten druckfrei gelagert, ehe sie erneut kompaktiert wird. Die Ergebnisse dieses Vorversuches werden in Kapitel 4.3.1 gezeigt.

3.3.2 Probenherstellung und Vorkonditionierung

Die textilen Proben werden für die Messung auf 250 mm x 250 mm zugeschnitten. Um das Textil im Messstand prüfen zu können, muss ein kreisförmiges Loch in die Mitte der Proben gestanzt werden, damit sich das Öl während der Messung ausgehend vom Öleinlass gleichmäßig verteilen kann. Das Loch hat, genauso wie der Messfluidzufluss, einen Durchmesser von 10 mm und wird mittig gestanzt.

Eine Probe besteht aus drei Lagen des Textils. Jede Lage einer Probe wird vermessen und gewogen, um etwaige Abweichungen in den Ergebnissen durch abweichende Flächengewichte und den daraus resultierenden Faservolumengehalten begründen oder ausschließen zu können. Um Abweichungen aufgrund von Klimaschwankungen bei der Lagerung auszuschließen, werden alle Proben mindestens 12 h lang in einem klimatisierten Raum bei 25 °C und 45 % Luftfeuchtigkeit gelagert. So wird sichergestellt, dass alle Proben denselben Feuchtigkeitsgehalt haben.

Zur Vorkonditionierung gehört im weiteren Verlauf für die zu kompaktierenden Messungen auch eine Vorkompaktierung der textilen Probe mit Hilfe einer Laborpresse. Der verwendete Permeabilitätsmessstand verfügt nicht über die ausreichenden Möglichkeiten zur Kompaktierung des Textils auf hohe Faservolumengehalte, sodass der Pressvorgang an einer Laborpresse KV214 der Firma RUCKS durchgeführt wird. Die Presse verfügt über einen Automatikmodus, der es ermöglicht, Zykluszeit, Zyklusdruck und Zyklusanzahl einzustellen und so die zyklischen Kompaktierungen deutlich erleichtert. Die Druckangaben der Laborpresse beziehen sich jeweils auf den Druck, der auf die Hydraulikzylinder der Presse wirkt. Daher muss der Druck, der auf die Probe wirken soll, noch umgerechnet werden. Aus der Umrechnung der Druckwerte resultiert ein Umrechnungsfaktor von zwei.

Zur Kompaktierung wird die dreilagige Probe eingelegt und der Vorgang gestartet. Die Intervalle betragen sowohl für Druck- als auch Entlastungsphase 15 Minuten. Im ersten Versuchsteil werden analog zum Aufbau am Permeabilitätsmessstand Abstandshalter verwendet, um eine Unterschreitung der gewünschten Probenhöhe zu verhindern. Nach abgeschlossenem Pressvorgang wird die Probe auf eine Platte geschoben und zum Messstand gebracht. Dabei wird darauf geachtet, dass die Struktur der Probe nicht verändert wird.

3.3.3 Permeabilitätsmessung

Nach Abschluss der Vorkonditionierung des Textils kann die Probe auf dem Prüfstand abgelegt werden, dabei muss sich das vorgestanzte Loch exakt über dem Messfluidzufluss befinden, um eine möglichst gleichmäßige Fließfrontausbreitung im Textil zu gewährleisten. An den Ecken der Bodenplatte des Prüfstandes werden Abstandshalter platziert, durch die sichergestellt wird, dass eine bestimmte Kavität eingehalten wird. Zur Kontrolle der Kavität wird zudem Wachs verwendet. Das Wachs wird leicht erwärmt, um es besser verformen zu können. Kleine Wachskugeln werden dann auf Silikonöltropfen platziert und vor dem Schließen des Aufbaus mit Silikonöl benetzt, um ein Anhaften des Wachses nach dem Öffnen zu verhindern. Die Wachskugeln passen sich beim Schließen des Deckels an die Kavität an und werden nach Abschluss der Messung mit Hilfe eines Messschiebers vermessen, um die tatsächliche Kavität zu überprüfen. Auf diese Weise ist nach der Messung sofort erkennbar, wenn versehentlich falsche Abstandshalter verwendet wurden. Als nächstes wird der Aufbau

mit einer Glasplatte abgedeckt. Ein solcher abgedeckter finaler Aufbau ist in Abbildung 12 zu erkennen.

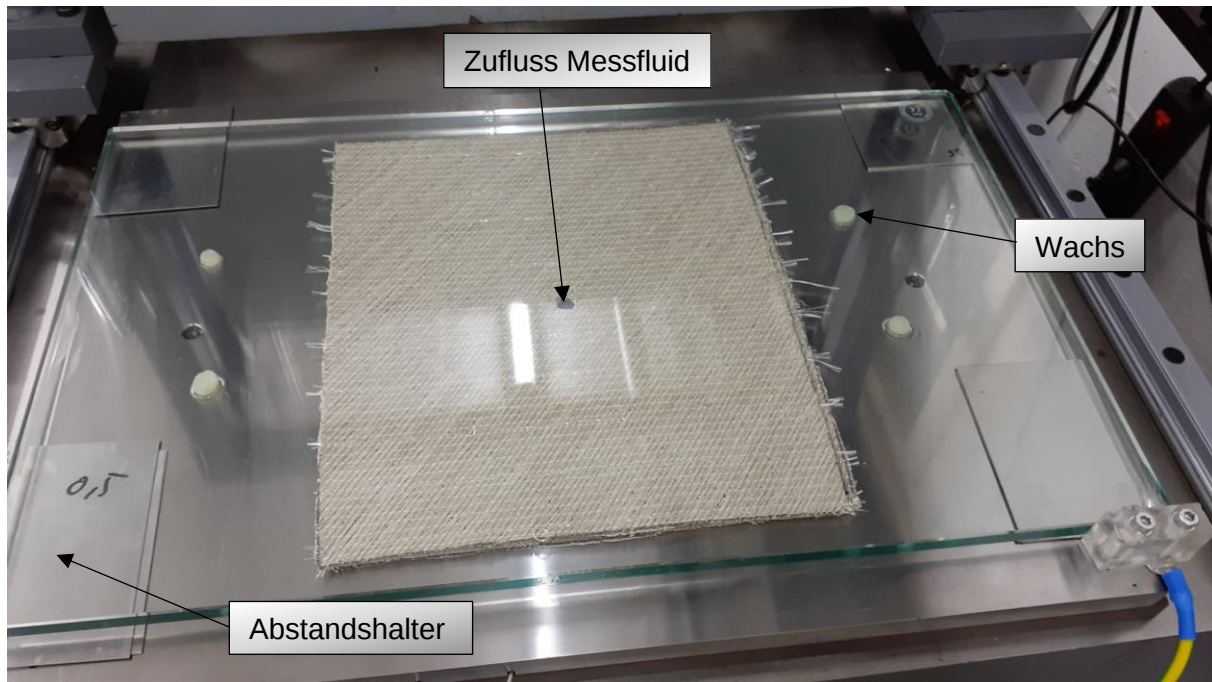


Abbildung 12: Aufbau einer Permeabilitätsmessung mit Abstandshalter und Wachs (Gelege)

Anschließend wird der Deckel auf dem Schienensystem über die Probe geschoben und kann mit einer Handpumpe abgesenkt werden. Bei Proben, die zuvor nicht vorkompaktiert worden sind, wird bis zum Start der Messung noch 15 Minuten gewartet, um den Effekt der Relaxation während der Messung als Einflussfaktor ausschließen zu können. Im Programm werden zur Berechnung noch die Abmessungen der Probe, ihr Gewicht sowie die Anzahl an Lagen und die Dichte des zu prüfenden Materials hinterlegt.

Zum Start der Messung wird der Ölzufuss am Druckbehälter geöffnet und die Messung wird im Computerprogramm gestartet. Die Messung wird gestoppt, wenn die Fließfront sich dem Rand des Textils nähert. Die Messdauer kann sich dabei je nach verwendetem Textil, Faservolumengehalt und eingestelltem Injektionsdruck stark unterscheiden. Die Auswertung der Ergebnisse wird per Knopfdruck im Programm gestartet und läuft autonom ab, so dass während dieses Vorgangs bereits der alte Testaufbau aufgeräumt und ein neuer vorbereitet werden kann. Auf diese Weise können deutlich mehr Messungen pro Stunde erfolgen. Die errechneten Werte der Permeabilität in den zwei Hauptfließrichtungen werden als Excel-Datei gespeichert. Zur Erzielung der besten Ergebnisse werden die Permeabilitätswerte zur Auswertung herangezogen, die anhand der letzten Bilder berechnet wurden. Ungleichmäßigkeiten im Textil wirken sich zu Beginn einer Messung sehr stark auf die Berechnung der Permeabilität aus, wohingegen gegen Ende der Messung die Fließfront deutlich weiter ausgebildet ist und lokale Ungleichmäßigkeiten keine großen Auswirkungen mehr haben. Dieser Zusammenhang lässt sich gut in Abbildung 13 erkennen. Während die Werte zu Beginn stark schwanken, pendeln sie sich nach einiger Zeit ein und behalten danach einen relativ konstanten Wert bei (blauer Verlauf, $K_{a,fit}$, Permeabilität in Hauptrichtung A). Der finale Permeabilitätswert wird daher als Mittelwert einer bestimmten Anzahl an Ergebnissen am Ende einer Messung berechnet.



Abbildung 13: Auswertung einer Gewebe-Probe (Screenshot aus dem Computerprogramm), Auftragung der Permeabilität in m^2 gegen die Zeit in s

Der in Abbildung 13 zu erkennende Verlauf kommt dem Idealfall einer Permeabilitätsmessung in Hinblick auf den konstanten Verlauf der Permeabilität sehr nahe. Bei Messungen mit sehr hohen Faservolumengehalten oder Textilien mit etwas ungleichmäßiger Struktur kann es deutlich länger dauern, bis die Permeabilität der Probe einen nahezu konstanten Wert erreicht.

3.4 Materialien

Da in dieser Arbeit die Permeabilitätsmessungen am 2D-Messstand durchgeführt werden, bieten sich Textilien an, die eine kreis- oder ellipsenförmige Fließfront ausbilden und eine ähnliche Permeabilität in beiden Hauptfließrichtungen haben. Daher fällt die Wahl der Textilien auf ein Flachs-Gelege und ein Flachs-Gewebe. Bei der Auswahl wird außerdem das Flächengewicht berücksichtigt, da für eine optimale Vergleichbarkeit der zwei Textilien bei gleicher Lagenzahl ein möglichst ähnliches Flächengewicht Grundvoraussetzung für gleiche Faservolumengehalte und somit vergleichbare Ergebnisse ist.

Bei dem Gelege handelt es sich um das ampliTex™ 350, bi-axial +/-45°-Flachs-Gelege der Firma Bcomp, das mit einem Flächengewicht von 350 g/m² angegeben wird.

Bei dem Gewebe handelt es sich um ein Flachs-Gewebe mit Leinwandbindung, das mit einem Flächengewicht von 363 g/m² angegeben wird.

Da es sich bei beiden Textilien um ein Naturprodukt handelt und davon auszugehen ist, dass es zu größeren Schwankungen im Flächengewicht kommt als bei synthetischen Fasern, werden alle Proben einzeln vermessen und gewogen. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die Flächengewichte laut Datenblatt sowie die berechneten Flächengewichte und ihre Abweichungen.

Tabelle 3: Vergleich der Flächengewichte (Datenblatt & gemessen)

	Flächengewicht nach Datenblatt	Flächengewicht aus gemessenen Maßen & Massen
Flachs-Gelege	350 g/m ²	352,89 ± 5,99 g/m ²
Flachs-Gewebe	363 g/m ²	347,41 ± 3,93 g/m ²

Als Messfluid am Permeabilitätsmessstand wird das nichtreaktive Silikonöl WACKER® AK 100 der Firma Wacker verwendet. Es ist farblos und klar, hat eine kinetische Viskosität von 100 mm²/s und eine Dichte von 0,96 g/cm³. Es zeichnet sich durch seine nichtreaktiven Eigenschaften aus, wodurch im Allgemeinen chemische Reaktionen zwischen der Probe und dem Messfluid ausgeschlossen werden können und so vergleichbare Ergebnisse, auch bei sehr unterschiedlichen Faserarten, erzielt werden können.

4. Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der beiden Hauptversuchsteile sowie die Ergebnisse des Vorversuchs zur Vorkompaktierung des Flachs-Geleges sowie des Flachs-Gewebes vorgestellt.

4.1 Einfluss der zyklischen Vorkompaktierung auf die Permeabilität

Die im folgenden aufgeführten Permeabilitätsmesswerte stellen, sofern nicht anders beschrieben, den Mittelwert aus mindestens fünf Messungen dar. Werden die Ergebnisse gegen den Faservolumengehalt bzw. die Porosität aufgetragen, so werden diese Werte aus dem Mittelwert der drei Textillagen berechnet und dienen, wie bereits im Kapitel 3.2 erwähnt, als Abschätzung, nicht jedoch als exakte Bestimmung des Faservolumengehaltes einer jeden Probe.

Ziel des ersten Versuchsteils ist es, den Einfluss der Vorkompaktierung auf die Permeabilität zu untersuchen. Zur Übersicht werden die Ergebnisse der beiden geprüften Textilien zunächst in separaten Kapiteln vorgestellt, ehe sie miteinander verglichen werden.

4.1.1 Einfluss der zyklischen Vorkompaktierung auf Flachs-Biaxial-Gelege

Einen ersten Überblick über die Ergebnisse gibt Abbildung 14. Die Mittelwerte aller Messungen mit der gleichen Anzahl an Kompaktierungen sind hier aufgetragen. Im Anhang werden in Abbildung 27 die Ergebnisse aller Einzelmessungen aufgeführt.

Im direkten Vergleich ist auffällig, dass die fünffach-kompaktierten Proben eine etwas geringere Permeabilität aufweisen als die unkompaktierte Referenz. Im Vergleich dazu zeigen die Proben, welche ein- oder dreifach kompaktiert wurden, einen geringeren Abfall der Permeabilität. Diese Verringerung befindet sich allerdings im Rahmen des Fehlers der unkompaktierten Referenz.

Diese Verringerung der Permeabilität scheint auf den ersten Blick etwas sonderbar, da der Faservolumengehalt während der gesamten Messreihe möglichst konstant gehalten wird. Auf mögliche Ursachen wird aber im weiteren Verlauf noch detaillierter eingegangen.

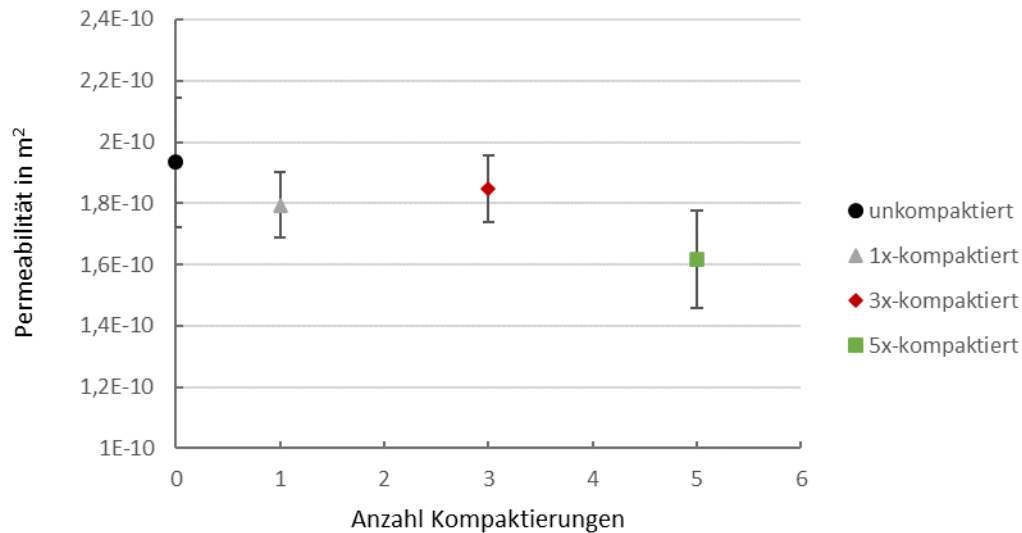


Abbildung 14: Permeabilität in Abhängigkeit der Zykluszahl (Gelege)

Trotz einheitlicher Parameter während der Messungen zur Einhaltung eines konstanten Faservolumengehaltes muss dieser bei der Auswertung der Ergebnisse weiterhin berücksichtigt werden. So beeinflussen geringfügig variierende Flächengewichte der einzelnen Lagen auch direkt den Faservolumengehalt der Proben, weshalb ein Zusammenhang zwischen den Schwankungen der Faservolumengehalte und den Messwerten ausgeschlossen werden muss. Dazu werden die Ergebnisse einzeln gegen den jeweiligen Faservolumengehalt in Abbildung 15 aufgetragen.

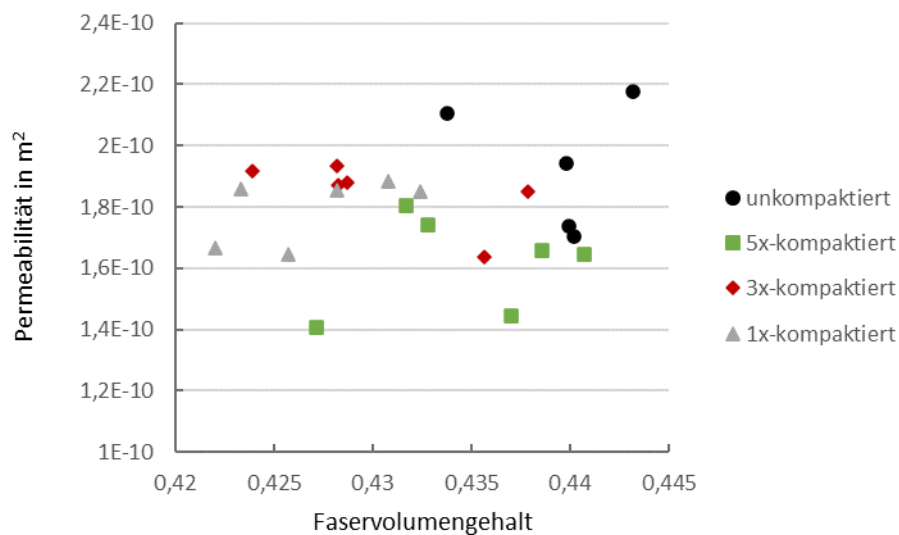


Abbildung 15: Permeabilitätsergebnisse in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes (Gelege)

Wie in Abbildung 15 zu sehen ist, zeigt sich hier kein Zusammenhang zwischen abfallender Permeabilität und höherem Faservolumengehalt. Die Proben zeigen, unabhängig ihrer Anzahl an Vorkompaktierungen, eine den Erwartungen entsprechende geringfügige Streuung im Faservolumengehalt.

Die Messreihe der unkompaktierten Proben zeigt vielmehr eine Verteilung im oberen Bereich des Faservolumengehaltes, weswegen zunächst von einer etwas geringeren Permeabilität auszugehen wäre. Abbildung 15 wie auch schon Abbildung 14 zeigen allerdings deutlich, dass das Gegenteil der Fall ist.

Dieser Zusammenhang zwischen zunehmender Anzahl an Vorkompaktierungen und einer abnehmenden Permeabilität kann mit der strukturellen Veränderung des Textils während der Kompaktierungszyklen erklärt werden.

Eine jede Probe, bestehend aus drei Lagen, beinhaltet Schwankungen nicht nur bezüglich ihres Flächengewichts bzw. ihrer Dichte, sondern auch Schwankungen in der lokalen Verteilung der Fasern und Hohlräume. Dies lässt sich z.B. mit Fehlern während der Textilherstellung oder Unregelmäßigkeiten der technischen Fasern erklären, die aus der Tatsache resultieren, dass es sich bei Flachsfasern um ein Naturprodukt handelt und daher Eigenschaften wie Durchmesser oder Dichte nie identisch sind. Bei einer unkompaktierten Probe wäre nun davon auszugehen, dass die Größe und Verteilung dieser Hohlräume in der Probe ebenfalls ungleichmäßig sind. Da besonders diese Hohlräume als Fließkanäle für die Permeabilität ausschlaggebend sind, kann eine höhere Permeabilität in unkompaktierten Proben damit erklärt werden, dass sie über größere, sich durch große Teile des Textils ziehende Fließkanäle verfügen, die es dem Messfluid ermöglichen, die Probe schneller zu durchdringen.

Im Vergleich dazu werden die vorkompaktierten Proben in der Druckphase des Zyklus belastet und stehen unter Spannung. Diese Spannungen werden langsam und zu Teilen abgebaut, bis das Textil entlastet wird. Jeder Zyklus sorgt so für eine geringe Umstrukturierung im Textil. Es liegt daher nahe, dass sich auch die Verteilung der Hohlräume und somit der Fließkanäle zugunsten einer gleichmäßigeren Verteilung verändert. Demnach sind die Fasern und Hohlräume mit zunehmender Zykluszahl gleichmäßiger angeordnet, was die Wahrscheinlichkeit für sehr große Fließkanäle abnehmen lässt und so die Ausbreitung der Fließfront verlangsamt.

Zum besseren Vergleich dient Abbildung 16. Aufgetragen ist der Permeabilitätswert der unkompaktierten Referenz als 100 %. Während die Ergebnisse der einfach- und dreifach-vorkompaktierten Proben eine Abweichung von 7,2 bzw. 4,4 % zeigen, beträgt die Abweichung der fünffach-vorkompaktierten Proben bereits 16,3 %. Außerdem muss hier noch einmal erwähnt werden, dass die einzelnen Lagen einer jeden Probe in derselben Ausrichtung und mit derselben Seite auf einander gelegt wurden, um den Lagenaufbau eines Faserverbundwerkstoffes möglichst gut darzustellen. Im Falle des Flachs-Biaxial-Geleges liegen die Fasern der ersten Lage im 90°-Winkel zur darauffolgenden Lage des zweiten Zuschnitts. Es ist also auch davon auszugehen, dass bei einer Probe, bei der die Lagen so angeordnet sind, dass die Fasern zweier Lagen gleich orientiert sind, der Effekt der abnehmenden Permeabilität bei zunehmender Zykluszahl noch weiter verstärkt wird, da innerhalb der Probe deutlich mehr Möglichkeiten zur Umstrukturierung bestehen.

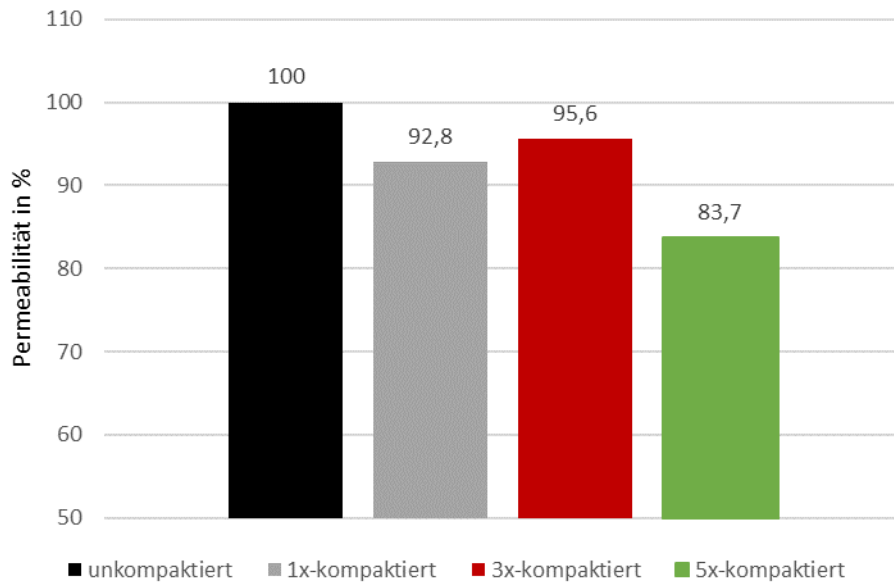


Abbildung 16: Prozentualer Vergleich der vorkompaktierten Proben mit der unkompaktierten Referenz (Gelege)

4.1.2 Einfluss der zyklischen (Vor-)Kompaktierung auf Flachs-Gewebe (Leinwandbindung)

Analog zu Kapitel 4.1.1 werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen der Flachs-Gewebe-Proben (LW-Gewebe) vorgestellt. Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen in Abhängigkeit der Zykluszahl. Wie auch schon beim Gelege zeigt sich hier eine Verringerung der Permeabilität der kompaktierten Proben. Auffällig ist hierbei, dass die Anzahl der Zyklen keinen signifikanten Einfluss mehr auf die Permeabilität zu haben scheint, da sich die Ergebnisse der einfach-, dreifach- und fünffach-Kompaktierung kaum unterscheiden. Eine Auflistung aller Einzel-Messwerte gegen die Zykluszahl ist im Anhang in Abbildung 28 beigefügt.

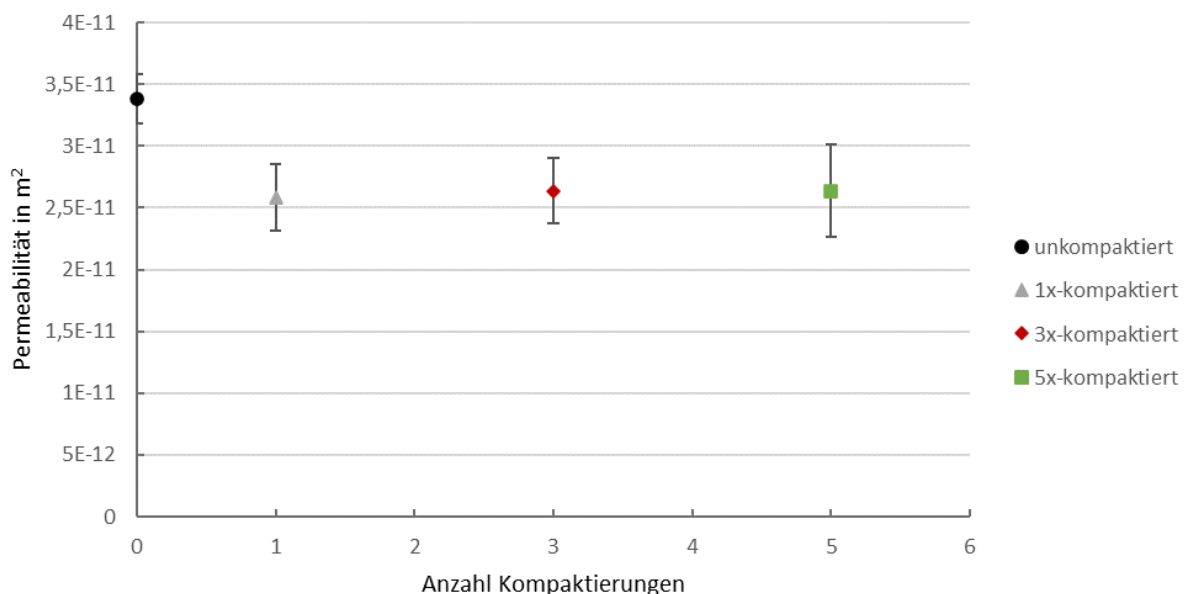


Abbildung 17: Permeabilität in Abhängigkeit der Zykluszahl (Gewebe)

Um auch für die Gewebe-Proben einen Zusammenhang zwischen Faservolumengehalt und der verringerten Permeabilität auszuschließen, werden alle Messergebnisse gegen den jeweiligen Faservolumengehalt der Probe aufgetragen. Wie auch schon in Kapitel 4.1.1, stehen die Messwerte hier nicht im direkten Zusammenhang mit dem dazugehörigen Faservolumengehalt. Zwar ist beispielsweise auffällig, dass die fünffach-kompaktierten Proben einen etwas höheren Faservolumengehalt aufweisen als ihre nicht-kompaktierten Referenzproben, allerdings handelt es sich hier um Veränderungen im Bereich eines Prozentpunktes. Werden nun auch die Verteilung der einfach- und dreifach-kompaktierten Proben betrachtet, so kann der Faservolumengehalt als Verursacher der abfallenden Permeabilität ausgeschlossen werden.

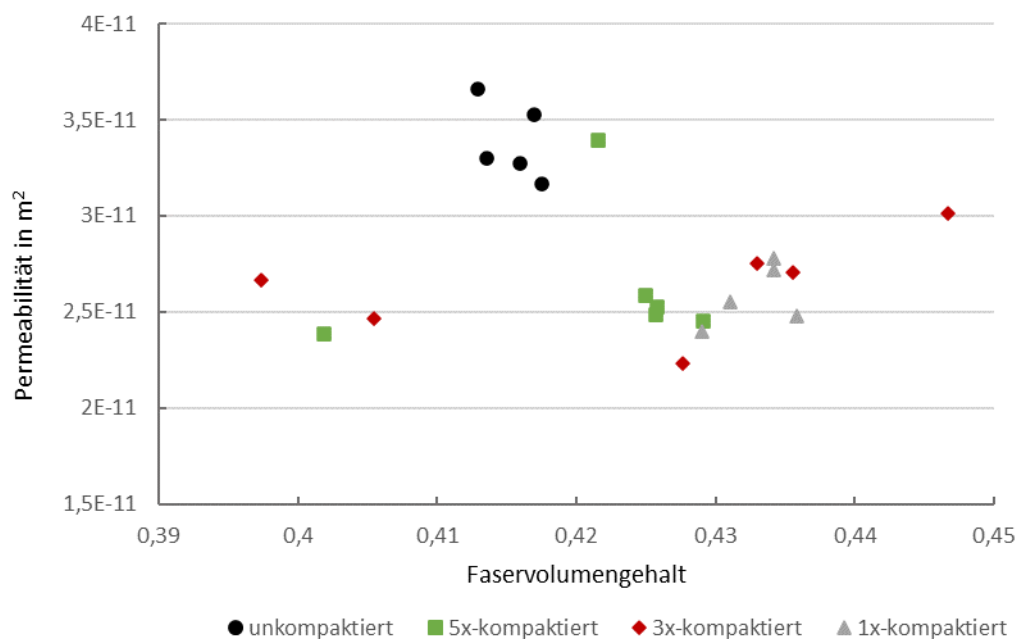


Abbildung 18: Permeabilität in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes (Gewebe)

Abbildung 19 stellt die Verringerung der Permeabilität im direkten Vergleich der verschiedenen Zykluszahlen dar. Hier zeigen alle vorkompaktierten Proben, unabhängig von der Anzahl an Kompaktierungen, einen deutlichen Abfall der Permeabilität. Die größte Verringerung der Permeabilität weisen die fünffach-kompaktierten Proben (22 %) auf, die einfach-kompaktierten (23,6 %) und die 3x-kompaktierten Proben (22,1 %) liegen leicht darunter. Diese Verringerungen der Permeabilität fallen außerdem etwas größer aus als beim Flachs-Gelege, dessen größter Abfall der Permeabilität bei 16,3 % liegt.

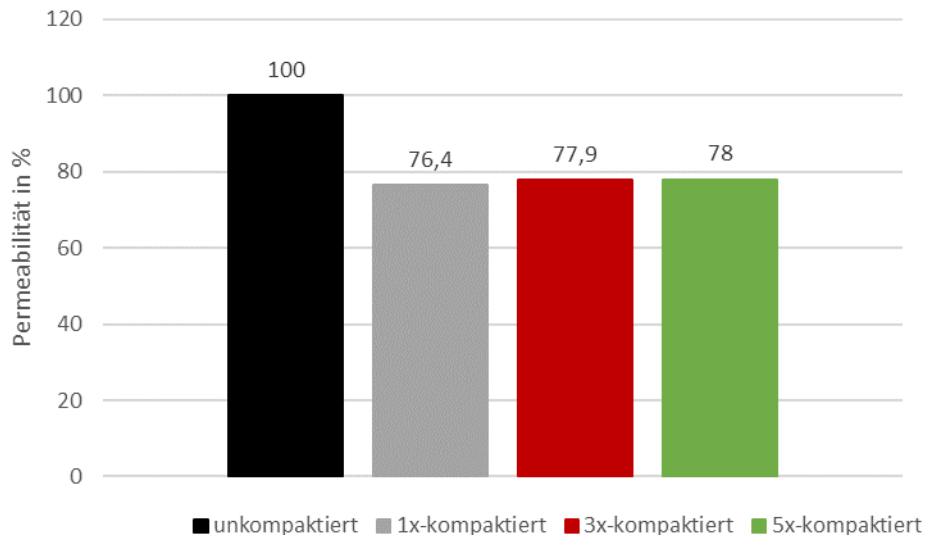


Abbildung 19: Prozentualer Vergleich der vorkompaktierten Proben mit der unkompaktierten Referenz (Gewebe)

4.2 Vergleich von Flachs-Gelege und Gewebe

Im direkten Vergleich der beiden Textilien zeigen sich deutliche Unterschiede in der Permeabilität. In Abbildung 20 sind die Ergebnisse der vorangegangenen zwei Unterkapitel im Vergleich dargestellt.

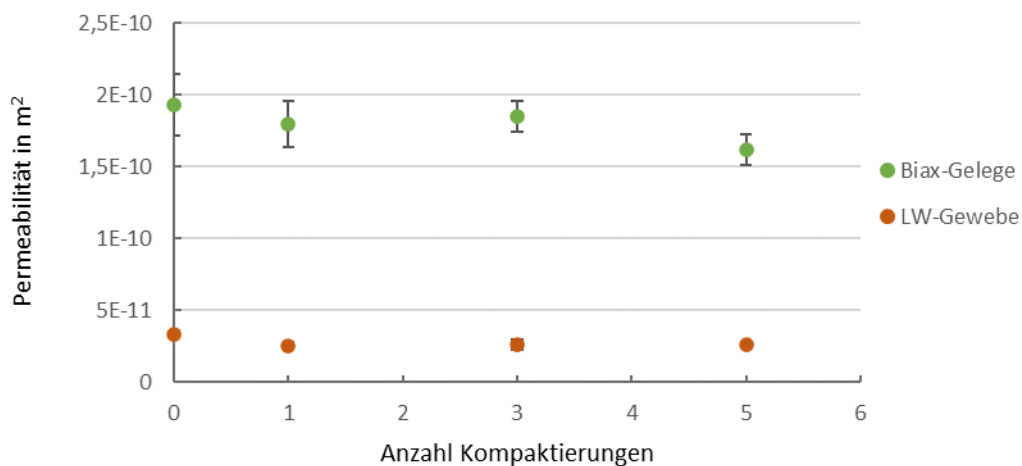


Abbildung 20: Vergleich der Permeabilität von Flachs-Gelege und Flachs-Gewebe

Während die Permeabilität der Gelege-Proben höher ausfällt und mit zunehmender Anzahl an Kompaktierungszahl tendenziell abfällt, zeigen die Gewebe-Proben eine insgesamt niedrigere Permeabilität. Hier weisen jedoch alle vorkompaktierten Proben eine geringere Permeabilität als ihre unkompaktierte Referenz auf. Die niedrigere Permeabilität der Gewebe-Proben im Vergleich zu den Gelege-Proben lässt sich mit dem strukturellen Aufbau der beiden Textilien erklären und entspricht den Erwartungen. Eine jede Lage der $\pm 45^\circ$ -biaxial-Gelege-Proben

besteht wiederum aus zwei Lagen eines unidirektionalen Geleges und bietet so geradlinige Fließkanäle zwischen den Rovings, die es der Messflüssigkeit erlauben, sich leichter auszubreiten.

Die Gewebeproben hingegen verfügen nicht über solche geradlinigen Fließkanäle, wodurch die Ausbreitung erschwert wird. Dieser Effekt wird im Allgemeinen durch die Kompaktierung der Textilien verstärkt, da die einzelnen Lagen der Gewebeproben durch den Kompaktierungsvorgang die Leerräume effektiver belegen können als die Gelegeproben, bei denen die Lagen immer um 90° zueinander verschoben sind und Hohlräume nur innerhalb einer Lage besetzt werden können.

Einen weiteren Anhaltspunkt für die Auswertung der Ergebnisse liefert neben der Permeabilität in Hauptrichtung A die Betrachtung des Verhältnisses der Permeabilität der beiden Hauptrichtungen. Dieses Verhältnis ergibt sich aus der Ausbildung der Fließfront ausgehend vom Punktanguss. Aufgrund der anisotropen Materialeigenschaften des textilen Halbzeuges bildet sich die Fließfront elliptisch aus. Je nach textilen Halbzeug ändert sich allerdings das Längen- zu Breitenverhältnis der Ellipse. Da im Rahmen dieser Arbeit bereits Veränderungen in der Permeabilität gezeigt werden konnten, wird nun die Veränderung der Fließfrontausbildung in Form des Verhältnisses der Permeabilität in die zwei Hauptrichtungen untersucht.

Im Allgemeinen zeigen die Gelege-Proben eine nahezu kreisförmige Fließfront, während die Gewebeproben eine typisch ellipsenförmige Fließfront ausbilden. Tabelle 4 zeigt die berechneten Mittelwerte der Verhältnisse der Permeabilität in die zwei Hauptrichtungen K_a/K_b .

Tabelle 4: Verhältnis der Hauptrichtungen der Permeabilität K_a/K_b

	Gelege	Gewebe
unkompaktiert	$1,23 \pm 0,04$	$1,56 \pm 0,08$
1x-kompaktiert	$1,24 \pm 0,07$	$1,73 \pm 0,38$
3x-kompaktiert	$1,20 \pm 0,04$	$1,50 \pm 0,16$
5x-kompaktiert	$1,24 \pm 0,08$	$1,25 \pm 0,20$

Wie in Tabelle 4 zu erkennen ist, weisen die Gelege-Proben mit Werten von ca. 1,2 geringere Werte als die Gewebe-Proben auf, die mit Ausnahme der fünffach-kompaktierten Proben höhere K_a/K_b -Verhältnisse aufweisen. Bei beiden Textilarten zeigt sich aber kein eindeutig erkennbarer Zusammenhang zwischen zunehmender Anzahl an Vorkompaktierungen und einem sich veränderndem K_a/K_b -Verhältnis.

Abbildung 21 und Abbildung 22 verdeutlichen diesen Unterschied, die Fließfront der Gewebe-Proben sind ellipsenförmig ausgeprägt, während die Fließfront des Geleges fast gänzlich kreisförmig ausfällt.

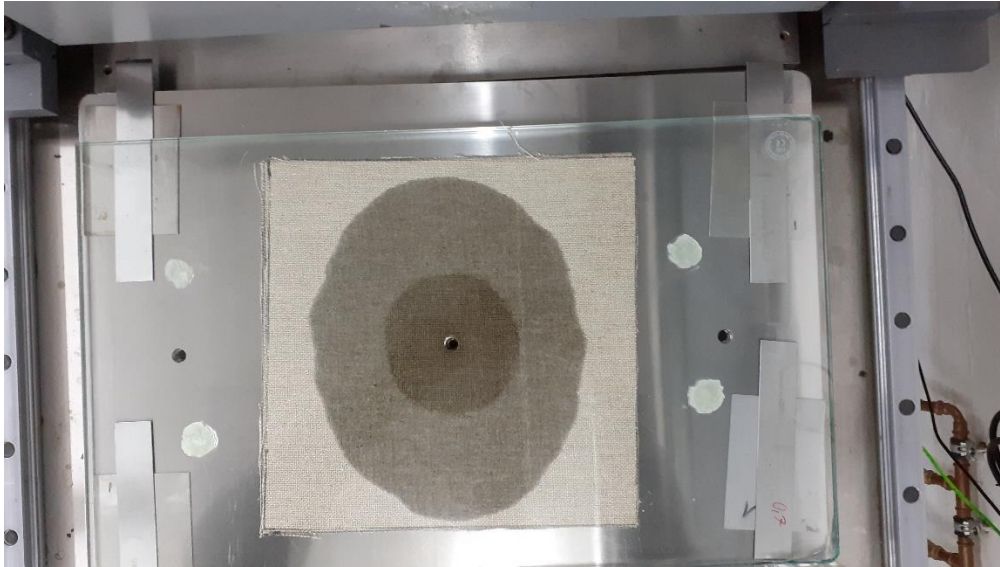


Abbildung 21: Fließfront nach abgeschlossener Messung einer Gewebe-Probe (3x-kompaktiert)

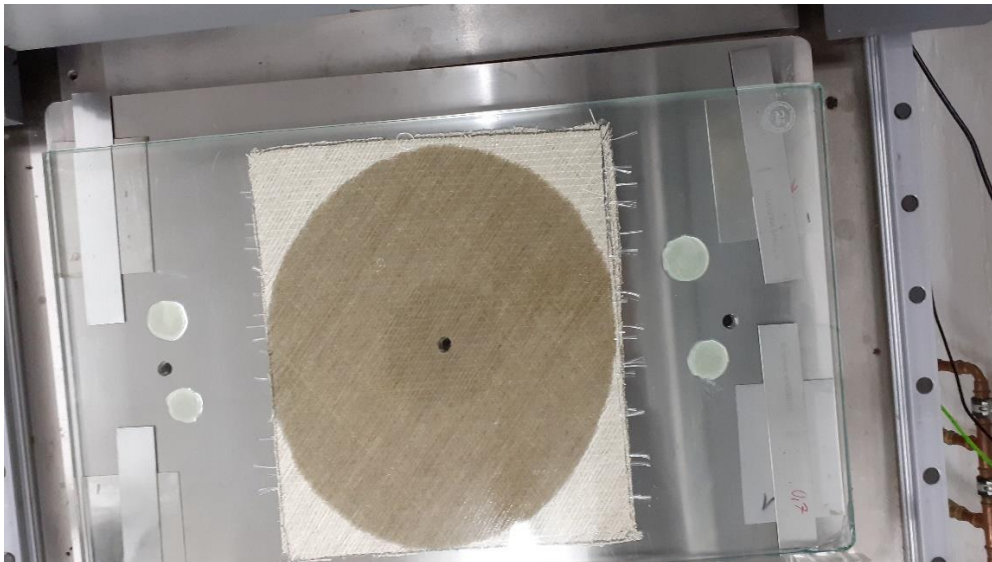


Abbildung 22: Fließfront nach abgeschlossener Messung einer Gelege-Probe (3x-kompaktiert)

Die Unterschiede in der Fließfrontform lassen sich analog zu den Unterschieden in der Permeabilität selbst ebenfalls auf die strukturellen Unterschiede der zwei Textilarten zurückführen. Während das Gelege durch seine biaxiale Anordnung zwei um 90° gedrehte Vorzugsrichtungen hat, in denen sich das Messfluid ähnlich schnell ausbreitet, und es so zu einer nahezu kreisförmigen Fließfront kommt, lässt die Struktur des Gewebes eine solche Ausbreitung nicht zu. In Hauptrichtung A des Gewebes, in der sich das Messfluid am schnellsten ausbreitet, verlaufen die Schussfäden, die im Vergleich zu den Kettfäden relativ geradlinig und ohne Krümmungen verlaufen (vgl. Kapitel 2.1.1, Textilarten) und dem Messfluid so möglicherweise Fließkanäle zur schnelleren Ausbreitung bieten, während sich die Ausbreitung in Richtung der Kettfäden, die abwechselnd oberhalb und unterhalb der Schussfäden und so nicht geradlinig verlaufen, schwieriger gestaltet.

4.3 Ergebnisse des zweiten Versuchsteils

4.3.1 Ergebnisse des Vorversuches zum Kompaktierungsverhalten

Nachdem im ersten Teil dieser Arbeit gezeigt werden konnte, dass eine Vorkompaktierung des Textils zu einer Verringerung der Permeabilität in beiden geprüften Textilien führt, wird diese Beobachtung im zweiten Teil dieser Arbeit weiter untersucht. Dazu werden neben der Anzahl an Kompaktierungen auch der Kompaktierungsdruck verändert, um verschiedene Probenhöhen und somit verschiedene Faservolumengehalte zu erreichen. Dazu wird die Kompaktierung ohne Abstandshalter durchgeführt. Das Vorgehen dieses Versuchsteils wird genauer in Kapitel 3.2 beschrieben.

Um die genauen Versuchsparameter dieser zweiten Versuchsreihe festlegen zu können, werden die Ergebnisse des Vorversuchs zur Kompaktierung ausgewertet. Die Ergebnisse der Gewebe-Proben sind in Abbildung 23 gezeigt. Die Ergebnisse des Geleges sind im Anhang unter Abbildung 29 beigefügt.

Wie anhand von Abbildung 23 zu erkennen ist, lässt sich mit den gewählten Druckwerten ein breiter Bereich an Kavitäten (ca. 1,6-1,2 mm) und somit auch ein breites Spektrum an Faservolumengehalten abdecken (ca. 47-63 %). Es konnten keine genauen Messwerte für einen Druck oberhalb von 100 bar bei drei Zyklen ermittelt werden. Mit Hilfe der Regressionsgeraden kann ein solcher Wert aber abgeschätzt werden. Im direkten Vergleich lassen die Flachs-Gewebe-Proben gegenüber den Gelege-Proben eine etwas stärkere Kompaktierung zu und behalten ihren kompaktierten Zustand nach der Entlastung deutlich besser bei, weshalb die Entscheidung über das Textil zu Gunsten des Gewebes fällt.

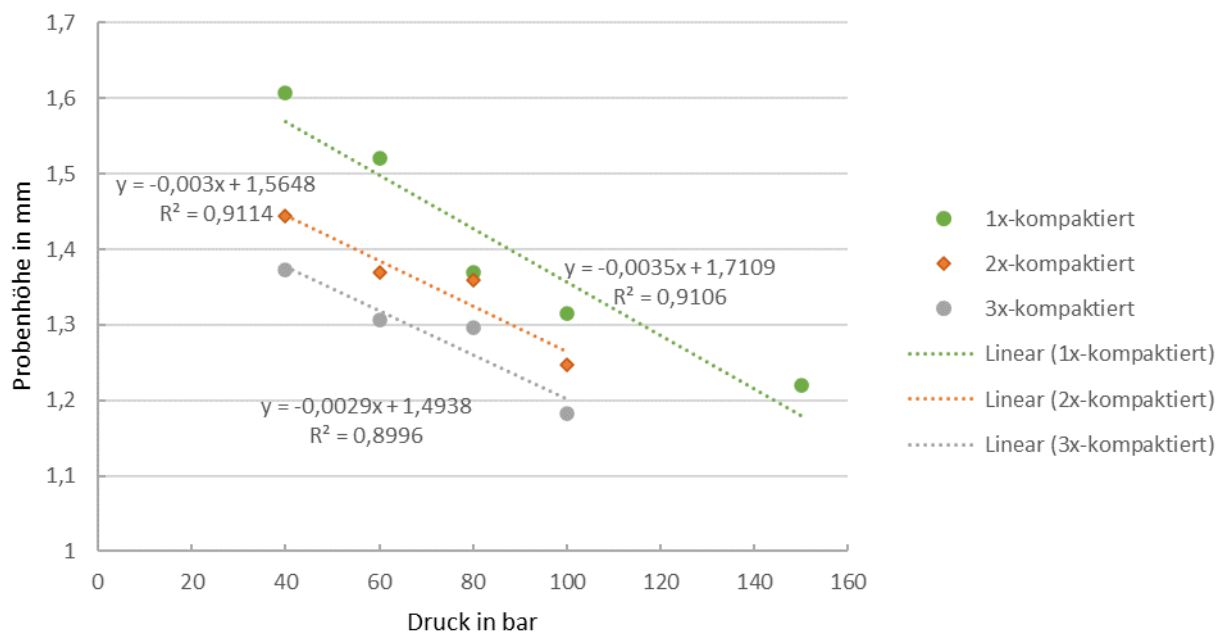


Abbildung 23: Probenhöhe der Gewebe-Proben in Abhängigkeit des Kompaktierungsdruckes

4.3.2 Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe

Wie bereits im vorangegangenen Unterkapitel erläutert, folgt diese Versuchsreihe der Versuchsmatrix nach Tabelle 2. Einen Überblick über die Ergebnisse liefert Abbildung 24. Die dargestellten Ergebnisse setzen sich als Mittelwert aus jeweils mindestens fünf Messungen zusammen. Wie anhand von Abbildung 24 erkennbar ist, zeigen die Messwerte mit zunehmendem Kompaktierungsdruck und demnach einem ansteigenden Faservolumengehalt eine geringere Permeabilität. Diese Beobachtung entspricht den Erwartungen.

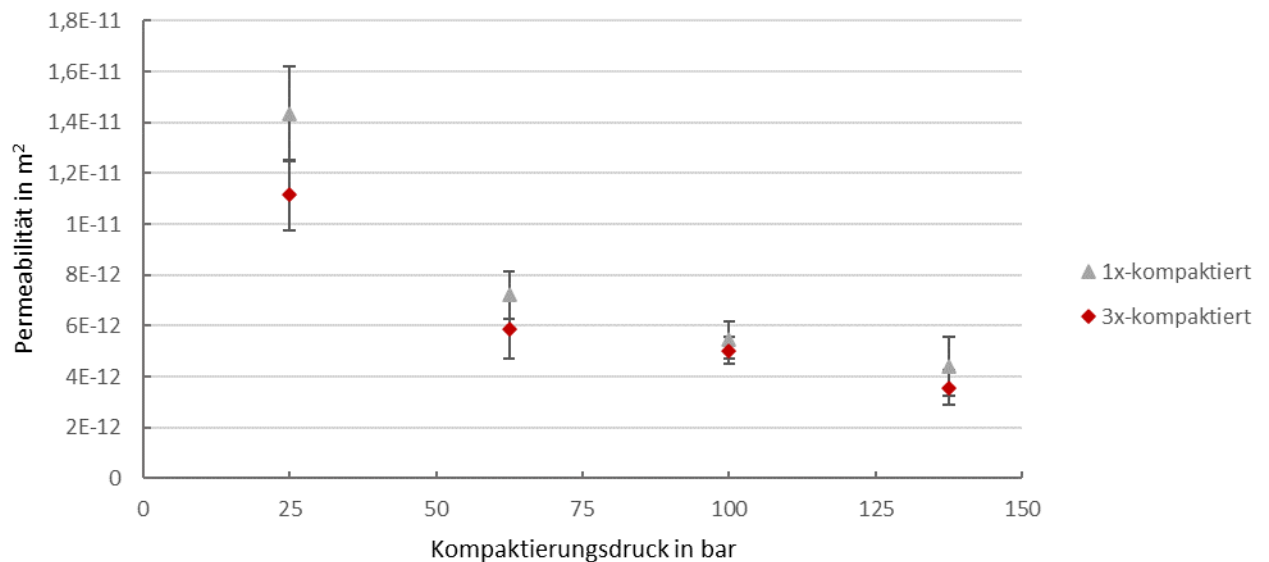


Abbildung 24: Permeabilität in Abhängigkeit des Kompaktierungsdruckes

Allerdings zeigt Abbildung 24 ebenfalls eine Diskrepanz im Permeabilitätswert der zwei Zykluszahlen. Hier muss jedoch die sich geringfügig verändernde Probenhöhe berücksichtigt werden, die sich im Vergleich zur einfach-kompaktierten Probe bei der dreifach-kompaktierten Probe einstellt und den Faservolumengehalt erhöht. Zur Überprüfung der Beobachtung des ersten Teils werden die Ergebnisse daher gegen den Faservolumengehalt aufgetragen, diese Darstellung ist in Abbildung 25 abgebildet.

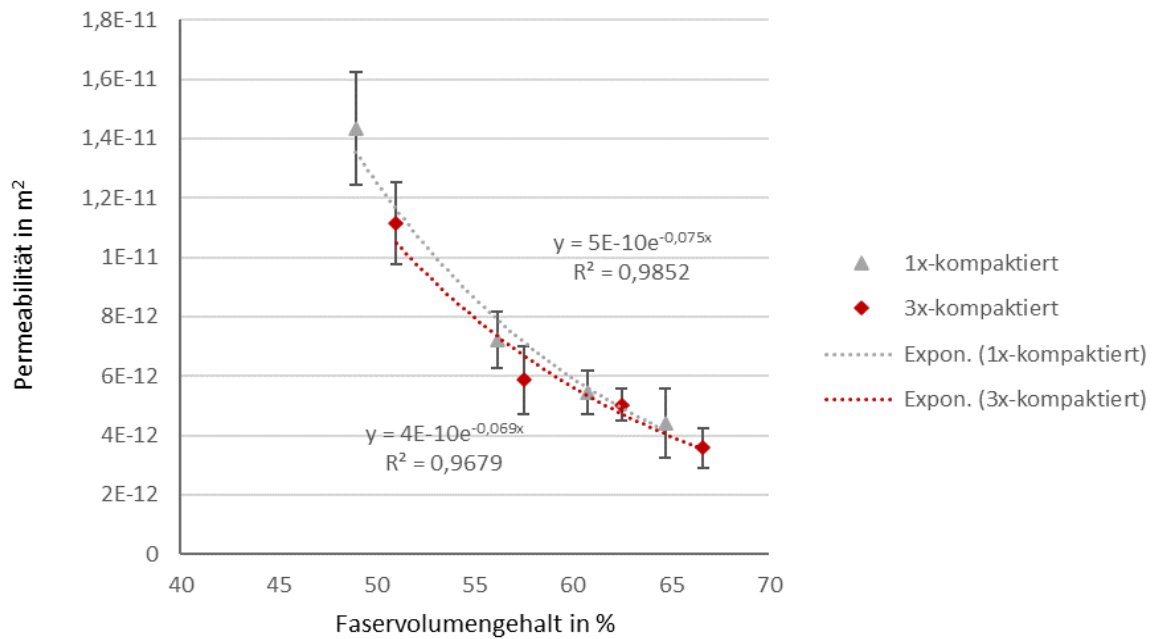


Abbildung 25: Permeabilität in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes

Analog zu Abbildung 24 zeigt sich auch hier der exponentielle Abfall der Permeabilität mit zunehmendem Faservolumengehalt, der Unterschied zwischen einfach- und dreifach-kompaktierten Proben fällt jedoch schon geringer aus. Die Regressionsgeraden der einfach- und dreifach-kompaktierten Proben nähern sich mit zunehmenden Faservolumengehalt aneinander an. Aufgrund der verhältnismäßig großen Standardabweichungen der Ergebnisse lässt sich der Unterschied zwischen den einfach- und dreifach-kompaktierten Proben hier nur tendenziell beschreiben, der Unterschied bildet sich anhand der vorliegenden Ergebnisse aber nicht eindeutig genug ab.

Dies wird durch Abbildung 26 bestätigt, in der die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen in einer Grafik aufgetragen sind, um die Regressionsmaße miteinander zu vergleichen. Das Regressionsmaß liegt mit 97,07 % zwischen den Regressionsmaßen der Einzelauftragungen. Eine eindeutige Unterscheidung der zwei Ergebnisreihen ist also nicht sinnvoll.

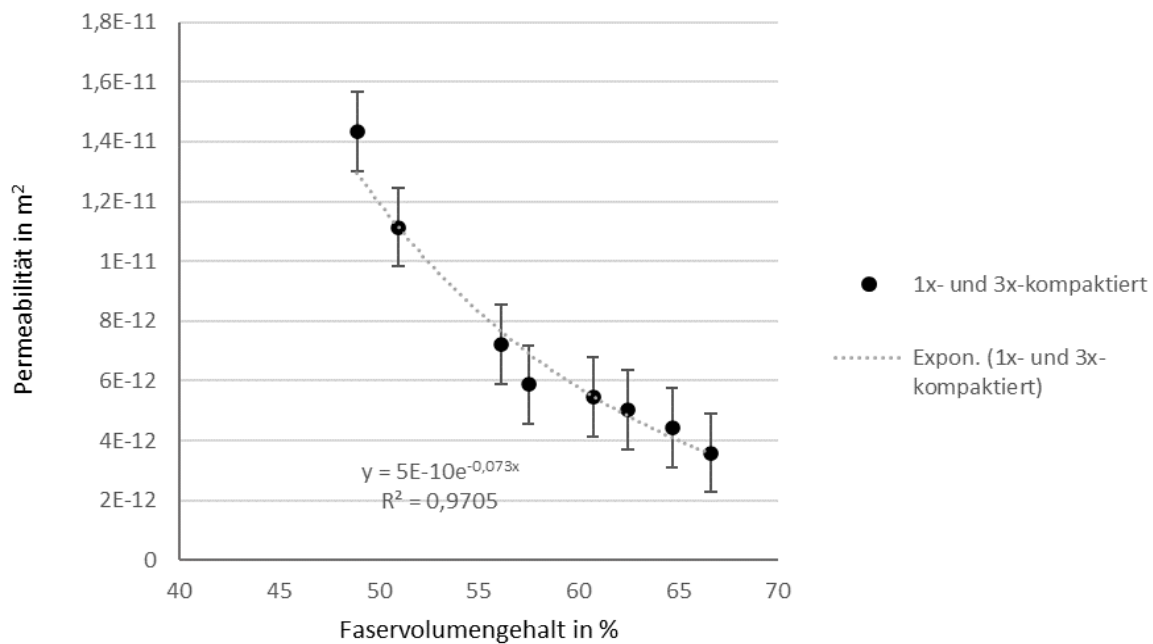


Abbildung 26: Permeabilität der 1x- und 3x-kompaktierten Proben

Analog zum ersten Versuchsteil soll nun noch das Verhältnis der Permeabilität der beiden Hauptrichtungen betrachtet werden. Tabelle 5 zeigt die K_a/K_b -Verhältnisse des zweiten Versuchsteiles in Abhängigkeit des Kompaktierungsdruckes.

Tabelle 5: K_a/K_b -Verhältnis der 1x- und 3x-kompaktierten Proben

	Gewebe	
	1x-kompaktiert	3x-kompaktiert
25 bar	$1,68 \pm 0,09$	$1,87 \pm 0,25$
62,5 bar	$1,92 \pm 0,13$	$1,74 \pm 0,09$
100 bar	$2,05 \pm 0,45$	$1,88 \pm 0,43$
137,5 bar	$1,79 \pm 0,11$	$1,90 \pm 0,43$

Ähnlich wie beim Vergleich der beiden Textilarten besteht auch hier kein Zusammenhang zwischen dem K_a/K_b -Verhältnis und der Anzahl an Kompaktierungen. Auch der Kompaktierungsdruck scheint unter Berücksichtigung der Abweichungen keinen Einfluss auf das K_a/K_b -Verhältnis zu haben.

Im direkten Vergleich mit den Ergebnissen aus dem ersten Versuchsteil (mittleres K_a/K_b -Verhältnis der Gewebeproben von 1,51) ist auffällig, dass das K_a/K_b -Verhältnis hier tendenziell größer ausfällt.

Mit steigendem Faservolumengehalt nimmt das Längen- zu Breitenverhältnis der ellipsenförmigen Fließfront also zu. Die anisotropen Eigenschaften des Gewebes in Bezug auf die Permeabilität werden durch den ansteigenden Faservolumengehalt verstärkt. Ein möglicher Erklärungsansatz dafür liegt in der Gewebestruktur. Es liegt nahe, dass die Poren und Hohlräume, die Fließkanäle in Hauptrichtung A bilden, von der Vorkompaktierung weniger stark komprimiert werden als Hohlräume, die Fließkanäle in die Nebenrichtung B bilden.

5. Fazit und Aussicht

Bei der Untersuchung des Einflusses der Vorkompaktierung auf die Permeabilität von Flachsfasertextilien konnte, auch unabhängig vom Faservolumengehalt der Proben, eine Verringerung der Permeabilität beobachtet werden.

Für die Ergebnisse des ersten Versuchsteils wird der Faservolumengehalt für alle Messungen so konstant wie möglich gehalten. Die Flachs-Gelege-Proben ($\pm 45^\circ$ -biax) zeigen unter Berücksichtigung der Abweichungen eine Tendenz hin zu einer niedrigeren Permeabilität. Dabei zeigen die fünffach-kompaktierten Proben die größte Verringerung mit 16,3 % im Vergleich zur unkompaktierten Referenz, während die einfach- und dreifach-kompaktierten Proben weniger stark von der Referenz abweichen. Dieser Zusammenhang ist vermutlich mit den Umstrukturierungen im Textil aufgrund der zyklische Be- und Entlastung zu erklären, durch die die Porenverteilung in der Probe immer gleichmäßiger wird und eine Abnahme großer Fließkanäle zu einer geringeren Permeabilität führt.

Das geprüfte Flachs-Gewebe mit Leinwandbindung zeigt ebenfalls eine Verringerung der Permeabilität, die bei den vorkompaktierten Proben mit ca. 22 % im Vergleich zu den Gelege-Proben auch größer ausfällt. Die Anzahl der Vorkompaktierungen hat hier allerdings keinen signifikanten Einfluss auf diese Verringerung. Im Vergleich zu dem Gelege ist beim Gewebe davon auszugehen, dass bereits nach einem Vorkompaktierungszyklus die Faserstruktur ausreichend umstrukturiert wird, um eine deutliche Verringerung der Permeabilität zu verursachen. Das geringe Rückstellvermögen nach der Entlastung ermöglicht zudem keine weiteren bedeutsamen Umstrukturierungen mehr, weshalb hier weitere Kompaktierungszyklen keinen Einfluss mehr haben.

Im direkten Vergleich miteinander zeigt das Gewebe den Erwartungen entsprechend eine signifikant geringere Permeabilität als das Gelege. Auch die Fließfrontform der beiden Textilarten weist Unterschiede auf: das Gelege bildet eine fast kreisförmige Fließfront aus, während die des Gewebes ellipsenförmig ist. Dies lässt sich ebenfalls mit der Textilstruktur erklären, die Struktur des Geleges ist in Hinblick auf die Permeabilität aufgrund der biaxialen Ausrichtung der Fasern weniger anisotrop aufgebaut als die des Gewebes, bei dem es durch die Anordnung von Kett- und Schussfäden zu einer einfacheren Ausbreitung des Messfluides in Richtung der Schussfäden kommt.

Der zweite Versuchsteil dieser Arbeit untersucht den Einfluss der Vorkompaktierung unter Berücksichtigung verschiedener Faservolumengehalte. Analog zu den Untersuchungen aus dem ersten Versuchsteil zeigen sich hier keine Unterschiede zwischen den einfach- und dreifach-kompaktierten Proben. Mit Hilfe der Vorkompaktierung können Faservolumengehalte zwischen 48,9 % und 66,6 % erzielt werden. Die Proben zeigen wie vermutet einen exponentiellen Abfall der Permeabilität mit zunehmendem Faservolumengehalt, was signifikant höhere Messzeiten am Permeabilitätsmessstand mit sich bringt und in der Anwendung ebenfalls zu längeren Taktzeiten führt. Mit zunehmendem Faservolumengehalt nimmt zudem das Längen- zu Breitenverhältnis der Fließellipse der Gewebeproben zu. Hier ist davon auszugehen, dass die Poren und Hohlräume im Gewebe, die die Fließkanäle bilden, nicht gleich stark von der Kompaktierung betroffen sind und es zu einer stärkeren Komprimierung der Fließkanäle in Richtung der Kettfäden, also der Nebenrichtung B kommt.

Die Verringerung der Permeabilität bei gleichbleibendem Faservolumengehalt bietet zudem einen Ansatz für weitere Untersuchungen. Aufgrund der Umstrukturierungen im Textil und einer gleichmäßigeren Verteilung der Fasern und Hohlräume ist es möglich, dass daraus einheitlichere und möglicherweise auch etwas bessere mechanische Eigenschaften resultieren.

Grundsätzlich ist es ebenso möglich, den Zusammenhang von Vorkompaktierung und Permeabilität für weitere Flachs-Textilien zu untersuchen, aber auch andere Naturfasern wie beispielsweise Hanffasern können hier für weitere Untersuchung interessant sein.

In Hinblick auf weitere Permeabilitätsmessungen wäre die Erzielung von geringeren Standardabweichungen zudem wünschenswert. Im Rahmen dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass es am vorgestellten Permeabilitätsmessstand mit zunehmendem Faservolumengehalt zu größeren Standardabweichungen der Ergebnisse kommt, wodurch geringfügige Veränderungen in der Permeabilität nicht mehr eindeutig bewertet werden können. Eine Möglichkeit zur Verringerung der Standardabweichungen wäre die Erhöhung des Messfluid-Infusionsdrucks. Auf diese Weise würde sich die Fließfront weiter ausbilden können und möglicherweise zu konsistenteren Ergebnissen führen. Allerdings müsste hier die Veränderung des Infusionsdrucks als Einflussfaktor auf die Permeabilität zunächst erst untersucht werden, um eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedener Permeabilitätsuntersuchungen herzustellen.

Eine weitere Forschungsmöglichkeit besteht in der Untersuchung der Kompaktierung mit sehr hohen Drücken. Zwar konnte im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden, dass Faservolumengehalt von bis zu ca. 68 % möglich sind, allerdings ist der Einfluss dieser großen Druckeinwirkung auf die Naturfaser von Interesse, da eine Beschädigung, z.B. der Kollaps des Lumen, durch zu große Krafteinwirkung wiederum zur Verringerung der mechanischen Eigenschaften im Verbund führen würde.

6. Literaturverzeichnis

- [ABBB11] ARBTER, R. ; BERAUD, J.M. ; BINETRUY, C. ; BIZET, L. ; BRÉARD, J. ; COMAS-CARDONA, S. ; DEMARIA, C. ; ENDRUWEIT, A. ; U. A.: Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Bd. 42 (2011), Nr. 9, S. 1157–1168. DOI:10.1016/j.compositesa.2011.04.021.
- [Aran16] ARANDA GALLARDO, S.: *Contribution to the Characterization of the Compaction of Fibre Reinforcements for Composite Manufacturing and Repair*, Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2016. Vertrieben durch: Papierflieger Verlag GmbH (Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 2, 17). ISBN: 978-3-869-48548-5.
- [Auri00] AURICH, TORSTEN: *Spritzgießen und resultierende Verbundeigenschaften von flachsverstärktem Polypropylen*, Technische Universität Chemnitz, 2000. Online verfügbar unter: <https://monarch.qucosa.de/api/qucosa%3A17730/attachment/ATT-1/>. Zuletzt aufgerufen am 30.06.2023.
- [Avki10] AVK, INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE (Hrsg.): *Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen; mit 46 Tabellen, Praxis*. 3., vollst. überarb. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2010 — ISBN 978-3-8348-0881-3.
- [BIGa95] BLEDZKI, A K ; GASSAN, J: Einfluss von Haftvermittlern auf das Feuchteverhalten naturfaserverstärkter Kunststoffe , 1995. DOI:10.1002/apmc.1996.052360110.
- [Darc56] DARCY, HENRY PHILIBERT GASPARD: Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, 1856.
- [Dick15] DICKERT, MATTHIAS: *Einfluss von Binder auf die Herstellung von Faserkunststoffverbunden*, Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2015. Online verfügbar unter: https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/Document_derivate_00000263/Db112484.pdf. Zuletzt aufgerufen am 30.06.2023.
- [CaGa08] DIPL.-PHYS. MICHAEL CARUS, DIPL.-GWL. CHRISTIAN GAHLE, DIPL.-ING. AGR. CEZAR PENDAROVSKI, ; DIPL.-GEOGR. DOMINIK VOGT, DIPL.-ÖKONOM SVEN ORTMANN, DR. MED. FRANJO GROTENHERMEN, ; DIPL.-GEOGR. THOMAS BREUER, DIPL.-ING. CHRISTIN SCHMIDT: *Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaserwerkstoffen (Deutschland und EU), Gülzower Fachgespräche*. Bd. 26 : Media Cologne Kommunikationsmedien GmbH, 50354 Hürth www.mediacolonne.de, 2008
- [FIZR95] FLEMMING, MANFRED ; ZIEGMANN, GERHARD ; ROTH, SIEGFRIED: *Faserverbundbauweisen*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1995 — ISBN 978-3-642-63352-2
- [FIZR99] FLEMMING, MANFRED ; ZIEGMANN, GERHARD ; ROTH, SIEGFRIED: *Faserverbundbauweisen*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1999 — ISBN 978-3-642-63557-1
- [Kenz21] KENZLERS, KATRIN: *Composites mit vorkompaktierten Flachsfasergelegen – Untersuchung des textilen Materialverhaltens und der resultierenden*

- mechanischen Eigenschaften*, Masterarbeit, Technische Universität Clausthal, 2021.
- [Klun08] KLUNKER, FLORIAN: *Aspekte zur Modellierung und Simulation des Vacuum Assisted Resin Infusion*. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2008. Vertrieben durch: Papierflieger Verlag GmbH: ISBN-Nr. 978-3-89720-982-4.
- [Kück14] KÜCK, ULRICH; WOLFF, GABRIELE: *Botanisches Grundpraktikum*. 3. Aufl. Heidelberg : Springer Spektrum, 2014.DOI: 10.1007/978-3-642-53705-9.
- [May20] MAY, DAVID: *Integrierte Produktentwicklung mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020 — ISBN 978-3-662-60285-0.
- [PiEL16] PICKERING, K.L. ; EFENDY, M.G. ARUAN ; LE, T.M.: A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Bd. 83 (2016), S. 98–112. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.08.038.
- [Rieb11] RIEBER, GUNNAR: *Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe*, IVW-Schriftenreihe. Als Ms. gedr. Kaiserslautern : Inst. für Verbundwerkstoffe, 2011 — ISBN 978-3-934930-92-6.
- [RöHB16] RÖSLER, JOACHIM ; HARDERS, HARALD ; BÄKER, MARTIN: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016 — ISBN 978-3-658-13794-6.
- [Schü07] SCHÜRMANN, HELMUT: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden: mit 39 Tabellen, VDI-[Buch]*. 2., bearb. und erw. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer, 2007 — ISBN 978-3-540-72189-5.
- [Shaf96] SHAFI, VAHID: *Beitrag zur Charakterisierung der Permeabilität flächiger Verstärkungsmaterialien*, 1996 — ISBN 3-8267-2339-2.
- [VRAA14] VERNET, N. ; RUIZ, E. ; ADVANI, S. ; ALMS, J.B. ; AUBERT, M. ; BARBORSKI, M. ; BARARI, B. ; BERAUD, J.M. ; U. A.: *Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II*. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Bd. 61 (2014), S. 172–184. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.02.010.
- [Weit96] WEITZENBÖCK, JAN RÜDIGER: *Flow Characterization in Resin Transfer Moulding*, University of Southampton, 1996.
- [WJXK13] WU, WANGQING ; JIANG, BINYAN ; XIE, LEI ; KLUNKER, FLORIAN ; ARANDA, SANTIAGO ; ZIEGMANN, GERHARD: Effect of Compaction and Preforming Parameters on the Compaction Behavior of Bonded Textile Preforms for Automated Composite Manufacturing. In: *Applied Composite Materials* Bd. 20 (2013), Nr. 5, S. 907–926. DOI: 10.1007/s10443-012-9308-1.

7. Anhang

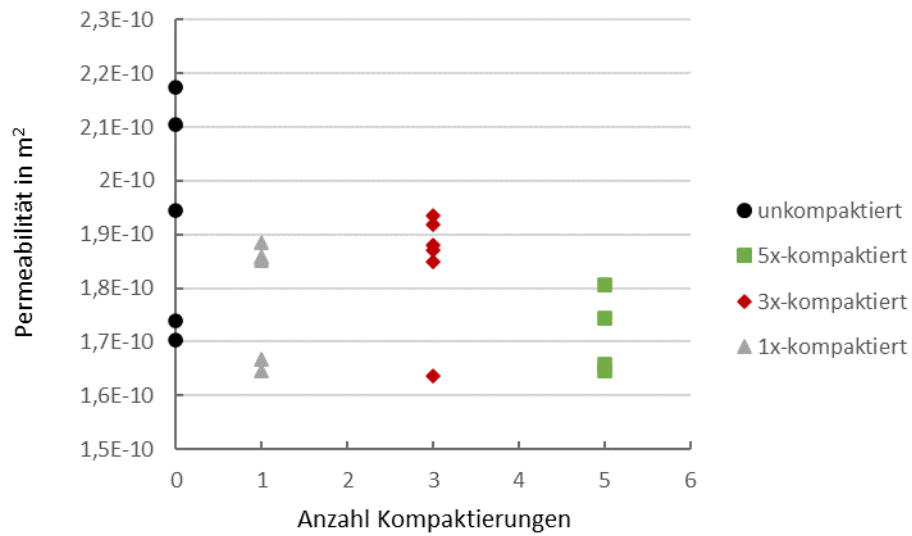


Abbildung 27: Permeabilität der Gelege-Proben in Abhängigkeit der Zykluszahl, alle Messergebnisse

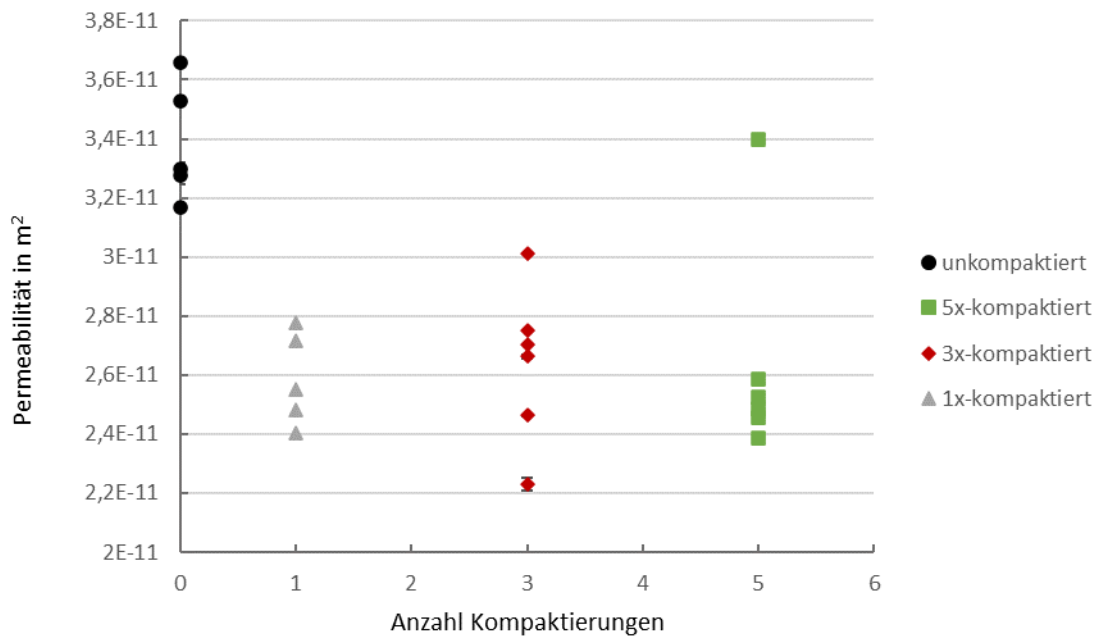


Abbildung 28: Permeabilität der Gewebe-Proben in Anhängigkeit der Zykluszahl, alle Messergebnisse

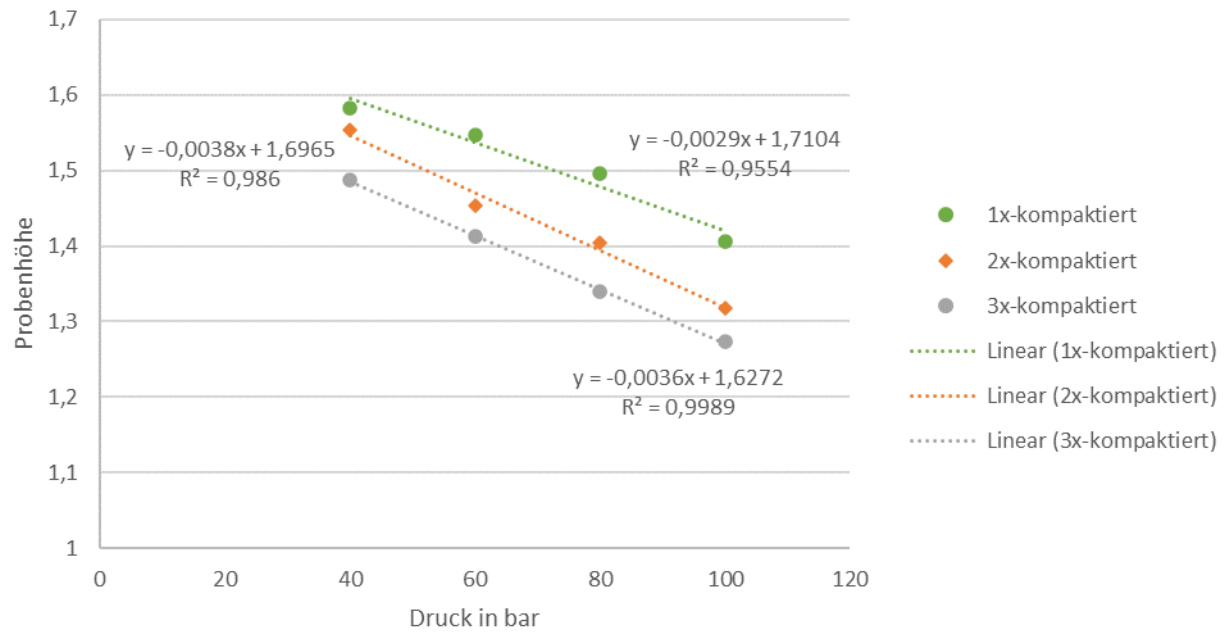


Abbildung 29: Probenhöhe in Abhängigkeit des Kompaktierungsdruckes und der Zykluszahl (Gelege)