



TU Clausthal



PuK

Technische Universität Clausthal

Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

Masterarbeit

Evaluation der Prozessparameter für eine Vorkompaktierung von Faserverbunden aus Celluloseregenerat-Textilien

Carrie Schulz

Matrikelnummer: 492100

Clausthal-Zellerfeld

21.08.2024

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Wierach

Zweitgutachter: Dr. sc. nat. Leif Steuernagel

Betreuung durch: M. Sc. Katrin Kenzlers

Zusammenfassung

Durch Vorkompaktierungsschritte ist es möglich, den Faservolumengehalt sowie die resultierenden Eigenschaften von Faserkunststoffverbunden zu steigern.

In dieser Arbeit wird die monozyklische Vorkompaktierung von trockenen Celluloseregenerat-Geweben untersucht. Die Kompaktierungsparameter Geschwindigkeit, Temperatur, Dauer und Druck werden optimiert und die erzielten Auswirkungen auf die Celluloseregenerat-Faserverbunde beurteilt, um daraus eine Methodik zur Parameteroptimierung zu entwickeln.

Die Faserverbundherstellung erfolgt im „Vacuum Assisted Resin Infusion“-Verfahren, ein Prozess, der selbst nur geringe Kompaktierungsdrücke auf das Material ausübt.

Die Arbeit ist in drei Teile unterteilt, wobei im ersten und zweiten Teil die optimalen Kompaktierungsparameter durch verschiedene Prüfungen ermittelt werden. Als ausschlaggebender Kennwert wird der Faservolumengehalt genutzt.

Die Gegenüberstellung der Zugeigenschaften und der Permeabilitätswerte im dritten Teil ergibt eine deutliche Abnahme der Permeabilität bei einer verhältnismäßig geringen bis keiner Steigerung in Zugmodul und -festigkeit durch den Vorkompaktierungsschritt. In beiden Messungen sind die Auswirkungen dessen in Kettrichtung des Gewebes stärker, aufgrund einer höheren Fadendichte, verglichen zur Schussrichtung.

Eine Abweichung bei der Druckaufbringung im dritten Teil führt dazu, dass nicht der optimale Kompaktierungsdruck ausgeübt und dadurch nicht die maximale Steigerung des Faservolumengehalts erreicht wird. Dies beeinflusst das resultierende Eigenschaftsprofil und verhindert eine Beurteilung der optimalen Kompaktierung für das verwendete Material. Trotzdem kann das durchgeführte Vorgehen zum Erhalt optimaler Kompaktierungsparameter zu einer Methodik zusammengefasst werden.

Schlagworte: Faserkunststoffverbund, Kompaktierung, Celluloseregenerat, Vacuum Assisted Resin Infusion, Faservolumengehalt, Leinwandgewebe

Abstract

Using pre-compaction steps, it is possible to increase the fibre volume content as well as the resulting properties of fibre-reinforced composites.

The focus of this thesis lies in the investigation of the monocyclic pre-compacting of dry regenerated cellulose fabrics. The compaction parameters such as speed, temperature, duration, and pressure are improved, and the effects on the cellulose regenerate fibre composites are evaluated in order to develop a methodology for parameter optimization. The fibre composite is manufactured using the Vacuum Assisted Resin Infusion process, applying minimal compaction pressures to the material.

The work consists of three sections, with the initial two sections concentrating on identifying the optimal compaction parameters through various experiments. The fibre volume content is used as the decisive parameter.

The comparison of the tensile properties and the permeability values in the third part shows a clear decrease in permeability with a relatively low to no increase in tensile modulus and tensile strength due to the pre-compaction step. In both measurements, the effects are more pronounced in the warp direction of the fabric due to its higher thread density compared to the weft direction.

A deviation in pressure application in the third part results in a suboptimal compaction pressure being exerted, preventing the achievement of maximum fibre volume content. This influences the resulting property profile and hinders the assessment of the optimal compaction for the material used. Nevertheless, the procedure carried out to obtain optimum compaction parameters can be summarized as a method.

Keywords: fibre-reinforced plastic composite, compaction, regenerated cellulose, vacuum assisted resin infusion, fibre volume content, canvas fabric

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
Diagrammverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
2 Zielsetzung	3
3 Forschungsstand und theoretische Grundlagen	4
3.1 Naturfasern.....	4
3.2 Natürliche Cellulose.....	6
3.3 Celluloseregenerat(-fasern)	7
3.3.1 Unterschiede zwischen regenerierter und natürlicher Cellulose	8
3.3.2 Celluloseregenerat- und andere Fasern im Vergleich.....	8
3.3.3 Herstellung von Celluloseregeneratfasern im Viskoseverfahren.....	9
3.4 Textile Flächegebilde.....	12
3.5 Faserkunststoffverbund	13
3.6 Epoxidharzsystem	16
3.7 „Vacuum Assisted Resin Infusion“-Verfahren	18
3.8 Kompaktierung von Textilien	20
3.9 Permeabilitätsmessung	24
3.10 Thermogravimetrische-Analyse	27
4 Material	29
5 Vorversuch	31
5.1 Methodik.....	31
5.2 Ergebnisse	33
6 Teil I: Ermittlung der Kompaktierungsparameter.....	34
6.1 Methodik.....	34
6.1.1 Kompaktierungsgeschwindigkeit	34

6.1.2	Kompaktierungstemperatur	34
6.1.3	Kompaktierungsdauer, Relaxations- und Rückstellverhalten	34
6.1.4	Kompaktierungsdruck.....	37
6.2	Auswertung	44
6.2.1	Kompaktierungstemperatur	44
6.2.2	Kompaktierungsdauer, Relaxations- und Rückstellverhalten	45
6.2.3	Kompaktierungsdruck.....	48
6.3	Fehlerdiskussion	58
6.4	Ergebnisse	62
7	Teil II: Weitere Optimierung des Kompaktierungsdrucks	63
7.1	Methodik.....	63
7.1.1	Garnzugversuch.....	63
7.1.2	Simulation von Vorkompaktierung und Herstellungsprozess des Faserverbundes in der Universalprüfmaschine.....	65
7.1.3	Dickenmessung von Faserverbundplatten.....	68
7.2	Auswertung	69
7.2.1	Garnzugversuch.....	69
7.2.2	Simulation von Vorkompaktierung und Herstellungsprozess des Faserverbundes in der Universalprüfmaschine.....	71
7.2.3	Dickenmessung von Faserverbundplatten.....	75
7.3	Fehlerdiskussion	77
7.4	Ergebnisse	78
8	Teil III: Beurteilung der Optimierung	80
8.1	Methodik.....	80
8.1.1	Dickenmessung und Zugversuch	80
8.1.2	Permeabilitätsmessung	81
8.2	Auswertung	85
8.2.1	Faservolumengehalt.....	85
8.2.2	Zugversuch	87
8.2.3	Permeabilitätsmessung	94
8.3	Fehlerdiskussion	96
8.4	Ergebnisse	100

9	Methodik zur Ermittlung optimaler Vorkompaktierungsparameter für Faserverbunde.....	102
10	Ausblick.....	105
11	Literaturverzeichnis.....	108

Abkürzungsverzeichnis

Liste der verwendeten Abkürzungen:

Abkürzung	Erklärung
CT	Computertomographie
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie
FKV	Faserkunststoffverbund
FVG	Faservolumengehalt
FVG _{krit}	Kritischer Faservolumengehalt
FVG _{max}	Maximaler Faservolumengehalt
FVG _{min}	Minimaler Faservolumengehalt
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
ILSF	Interlaminare Scherfestigkeit
KMP	Köper mit Poren
LCM	„Liquid Composite Moulding“
LW	Leinwand
NFK	Naturfaserverstärkter Kunststoff
Ref	Referenz
TGA	Thermogravimetrische Analyse
VARI	„Vacuum Assisted Resin Infusion“

Liste der verwendeten Formelzeichen:

Abkürzung	Erklärung	Einheit
A	Querschnittsfläche	m^2
d	Dicke des Faserverbundes	mm
d_{vor}	Werkzeugabstand vor Beginn des Rückstellens	mm
d_{nach}	Werkzeugabstand nach Beendigung des Rückstellens	mm
Δp	Fluiddruckunterschied zwischen dem Ein- und Auslass	Pa
F_{vor}	Kraft vor Beginn der Relaxation	N
F_{nach}	Kraft nach Beendigung der Relaxation	N
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
h	Höhenunterschied	m
l	Fließlänge	m
m_A	Flächengewicht des textilen Halbzeuges	g/m^2
n	Lagenanzahl	-
Rel_r	Relaxationsverhalten; relative Relaxationswerte	%
$Rück_r$	Rückstellverhalten; relative Rückstellwerte	%
$\dot{V}$	Volumenstrom	m^3/s
ρ	Fluidichte	kg/m^3
K	Permeabilität des porösen Mediums	m^2
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	m/s
η	Dynamische Viskosität des Fluids	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
ρ_F	Dichte der Fasern	g/cm^3
σ_F	Festigkeit der Faser	MPa
σ_{FKV}	Festigkeit des Faserkunststoffverbundes	MPa
σ_M	Festigkeit der Matrix	MPa
σ'_M	Spannung an der Matrix bei Faserversagen	MPa

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Einteilung der Naturfaser [eigene Darstellung nach [Aki11]	4
Abbildung 2:	Schematischer Bastfaseraufbau [Ste15]	4
Abbildung 3:	Molekulare Struktur von Cellulose [modifiziert nach End09]	6
Abbildung 4:	Schematische Darstellung des Viskoseverfahrens zur Herstellung von Celluloseregeneratfasern [modifiziert nach Tür14]	9
Abbildung 5:	Prozess des Ausflockens von Celluloseregenerat [modifiziert nach Vei23]	11
Abbildung 6:	Mikroskopieaufnahmen von Viskosefasern vor dem Verstrecken im Querschnitt (links) und in der Längsansicht (Mitte) sowie nach dem Verstrecken (rechts) [modifiziert nach Vei23]	11
Abbildung 7:	Grundbindungen von Geweben (links: Leinwand- , Mitte: Köper- , rechts: Atlasbindung) [Ehr06]	13
Abbildung 8:	Qualitative Darstellung der Festigkeit des Faserkunststoffverbund in Abhängigkeit des Faservolumengehalts [modifiziert nach Sha13]	15
Abbildung 9:	Darstellung der Reaktionsedukte und dem -produkt der Polyaddition zwischen Epoxidharz und Diamin-Härter [Ehr06]	17
Abbildung 10:	Schema des VARI-Verfahrens zur Herstellung eines Sandwichverbundes [Zen05]	18
Abbildung 11:	Darstellung der Fließfront während der Infusion im VARI-Verfahren [modifiziert nach Che11]	19
Abbildung 12:	Schematische Darstellung der Druckverteilung im VARI-Verfahren [modifiziert nach Cor05]	19
Abbildung 13:	Schematische Darstellung des Kompaktierungsprozesses (oben) und die zugehörigen Kurvenverläufe (unten) [modifiziert nach Ara16]	20
Abbildung 14:	Mechanismen der Kompaktierung eines Textils in den Größenskalen [modifiziert nach Sha15]	21
Abbildung 15:	Wandeffekte der Kompaktierung auf das Textil bei einem Werkzeug höherer Steifigkeit (links) und niedriger Steifigkeit (rechts) [modifiziert nach Ara16]	23
Abbildung 16:	Darstellung der Parameter des Darcy-Gesetzes [Höl13]	24
Abbildung 17:	Schematische Darstellung des Makro- (oben) und Mikrofluss (unten) sowie die Bildung von Lufteinschlüssen über die Zeit [modifiziert nach Dic15]	26
Abbildung 18:	Schematischer Aufbau einer horizontalen TGA-Messeinheit [Ehr04]	28
Abbildung 19:	Aufnahme des Leinwandgewebes (links) und des Köpergewebes mit Poren (rechts) auf einem roten Hintergrund	29
Abbildung 20:	VARI-Aufbau für die Vorversuche am Beispiel des Leinwandgewebes	32
Abbildung 21:	Vergleich der Fließfronten im VARI-Verfahren von unkompaktierten (links) und kompaktierten (rechts) Lagenaufbauten am Beispiel des Leinwandgewebes	33

Abbildung 22: Aufbau der Kompaktierungsversuche (links: schematische Darstellung ohne den Ofen [eigene Darstellung nach Ara16]; rechts: Aufbau während der Messung).....	35
Abbildung 23: Veranschaulichung eines Kompaktierungszyklus [modifiziert nach Ken21]	36
Abbildung 24: Schematische Darstellung der Faserverbundherstellung im VARI-Verfahren.....	39
Abbildung 25: Darstellung des VARI-Aufbaus mit Veranschaulichung des Harzsystems-Zulaufes (links) und der Fließfrontausbreitung (rechts)	40
Abbildung 26: FKV-Platten mit aufgeklebten Aufleimern (links) und Zusägen der Zugproben (rechts)	41
Abbildung 27: Aufbau des Zugversuchs	42
Abbildung 28: Eingebettete Proben vor dem Schleif- und Polierprozess	43
Abbildung 29: Schliffbilder der Konfigurationen des Köpergewebes mit Poren (oben links: Referenz; oben rechts: 28 bar; unten links 38 bar; unten rechts: 48 bar)	50
Abbildung 30: Gegen das Licht gehaltene FKV-Platte der Referenz (links) und der mit 48 bar kompaktierten Konfiguration (rechts) des Köpergewebes mit Poren	51
Abbildung 31: Vergrößerter Ausschnitt des Schliffbildes der mit 38bar kompaktierten Probe des Köpergewebes mit Poren	53
Abbildung 32: Schliffbilder der Referenz (links) und der mit 48 bar kompaktierten Konfiguration (rechts) des Leinwandgewebes.....	56
Abbildung 33: Schräge Einspannung der Proben während des Zugversuchs.....	60
Abbildung 34: Über die Zeit entstanden Risse in den Schliffproben durch feuchtigkeitsinduziertes Schrumpfen der Cellulose regeneratfasern	61
Abbildung 35: Aufbau des Garnzugversuches.....	65
Abbildung 36: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen FVG und Kompaktierungsdruck	66
Abbildung 37: Aufbau der Dickenmessung von FKV-Platten	69
Abbildung 38: Welligkeit der ungeprüften Garne aus Schussrichtung (oben) und aus Kettrichtung (unten)	70
Abbildung 39: Dickenverteilung in mm der FKV der mit 67 bar kompaktierten Platte (links) und der mit 100 bar kompaktierten Platte (rechts)	76
Abbildung 40: Darstellung des Stanzprozesses mit der hydraulischen Handpresse	82
Abbildung 41: Gewebelagen nach dem Pressvorgang für den Permeabilitätsversuch.....	82
Abbildung 42: Aufbau des Permeabilitätsmesstands	83
Abbildung 43: Darstellung der Auswertung der Permeabilitäten vom Messprogramm	84
Abbildung 44: Verteilung der Dicke bzw. des FVG über die mit 100 bar kompaktierte Platte	86
Abbildung 45: Aufnahmen fortgeschrittener Fließfronten der unkompaktierten Referenz (links) und der bei 100 bar kompaktierten Konfiguration (rechts) während der Messung.....	96

Abbildung 46: Schrumpfverhalten des Leinwandgewebes bei Wasserkontakt.....	107
Abbildung 47: Leinwandgewebe vor Lagerung (oben) und nach der Lagerung (unten) im Ofen bei 105 °C	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verwendete Konfigurationen des Vorversuches	31
Tabelle 2:	Parameter der Kompaktierungsversuche.....	37
Tabelle 3:	Konfigurationen des Teil I zur Ermittlung des Kompaktierungsdrucks.....	38
Tabelle 4:	Lagenorientierung in Zugrichtung der Zugproben mit Leinwandgewebe	56
Tabelle 5:	Konfigurationen im Garnzugversuch.....	64
Tabelle 6:	Phasen des Simulationsversuches	67
Tabelle 7:	Konfigurationen zur Messung der Dicke zur Bestimmung des FVG an hergestellten FKV-Platten	68
Tabelle 8:	Konfigurationen des Zugversuchs zum Vergleich un- und optimal vorkompakter FKV	81
Tabelle 9:	Konfigurationen für die Permeabilitätsmessung zum Vergleich un- und optimal vorkompakter FKV.....	81

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Ergebnis der TGA-Messung des Celluloseregenerat-Gewebes	44
Diagramm 2: Darstellung der relativen Relaxation über den Kompaktierungsdruck	45
Diagramm 3: Repräsentative Kraftverläufe über die Zeit während des Kompaktierungsversuchs von Proben des Köpergewebes mit Poren	46
Diagramm 4: Darstellung des relativen Rückstellverhaltens über den Kompaktierungsdruck	47
Diagramm 5: Zugmoduln der Konfigurationen des Köpergewebes mit Poren in Abhängigkeit des FVG	48
Diagramm 6: Zugfestigkeiten der Konfigurationen des Köpergewebes mit Poren in Abhängigkeit des FVG	49
Diagramm 7: Aus den Schliffbildern gemessenen Flächen der Poren des Köpergewebes.....	52
Diagramm 8: Zugfestigkeiten der Konfigurationen des Leinwandgewebes in Abhängigkeit des FVG	54
Diagramm 9: Zugmoduln der Konfigurationen des Leinwandgewebes in Abhängigkeit des FVG	55
Diagramm 10: Verhältnis Höhe zu Breite der ellipsenförmigen Garnquerschnitte im Leinwandgewebe.....	57
Diagramm 11: Festigkeiten der Garne des Leinwandgewebes ohne (Referenz) und nach Kompaktierung mit 428 bar	70
Diagramm 12: Darstellung der simulierten und gemessenen Werte des Faservolumengehalts in Abhängigkeit des Kompaktierungsdrucks.....	71
Diagramm 13: Vergleich der Relaxation des Leinwandgewebes im ersten und zweiten Kompaktierungsversuch bei unterschiedlichen Parametern.....	73
Diagramm 14: Vergleich des Rückstellverhaltens des Leinwandgewebes im ersten und zweiten Kompaktierungsversuch bei unterschiedlichen Parametern.....	74
Diagramm 15: Faservolumengehalt der FKV-Platten in Abhängigkeit des Kompaktierungsdrucks	75
Diagramm 16: Faservolumengehalt der unkompaktierten Referenz und der mit 100 bar kompaktierten FKV	85
Diagramm 17: Repräsentative Kurvenverläufe der vier Konfigurationen im Standardkraft- Dehnungs-Diagramm.....	87
Diagramm 18: Darstellung des Zugmoduls der unkompaktierten Referenzen und der mit 100 bar kompaktierten Konfigurationen mit jeweils Kett- oder Schussrichtung, parallel zur Zugbelastung	89
Diagramm 19: Darstellung der Zugfestigkeit der unkompaktierten Referenzen und der mit 100 bar kompaktierten Konfigurationen mit jeweils Kett- oder Schussrichtung, parallel zur Zugbelastung	90
Diagramm 20: Zugmoduln in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes der untersuchten Konfigurationen	91

Diagramm 21: Zugfestigkeiten in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes der untersuchten Konfigurationen	93
Diagramm 22: Permeabilitäten der unkompaktierten Referenz und der mit 100 bar kompaktierten Konfiguration in Kett- und Schussrichtung	95
Diagramm 23: Gemessene Abhängigkeit des Faservolumengehalts vom Kompaktierungsdruck bei unterschiedlichen Größen der Platten (angegeben in mm).....	97

1 Einleitung

Faserkunststoffverbunde (FKV) finden heutzutage ihren Einsatz in den verschiedensten Anwendungsgebieten und zeigen einen weltweit steigenden Marktanteil. Die Kombination verschiedener Materialien erzielt einen Verbundwerkstoff, der gegenüber den Einzelkomponenten ein verbessertes Eigenschaftsprofil aufweist und somit viele Vorteile bietet [Bun21] [Ehr06]. Der aufkommende Nachhaltigkeitsgedanke in der Gesellschaft sorgt für eine wachsende Nachfrage an naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK). Anstelle synthetisch hergestellter Fasern werden biologisch abbaubare Naturfasern in duroplastische Matrizen eingebracht. NFK sollen Leichtbau und ökologische Aspekte vereinen [Ant12].

Allerdings weisen NFK unter identischen Herstellungsbedingungen verglichen zu synthetischen FKV geringere Faservolumengehalte auf. Der Faservolumengehalt korreliert mit den mechanischen Eigenschaften, sodass möglichst hohe Faseranteile angestrebt werden. Der begrenzende Faktor ist die vollständige Benetzung der Fasern durch die Matrix und somit material- und verfahrensspezifisch [Ant12] [May20].

Durch Kompaktierungsschritte können Faservolumengehalte mit Naturfaserverbunden erhalten werden, die denen von synthetischen Faserverbunden entsprechen. Bei der Kompaktierung wird das Fasermaterial zusammengedrückt, damit sich der Packungsgrad durch Minimierung des freien Volumens erhöht. Dabei laufen auf den Größenskalen der textilen Halbzeuge verschiedene Mechanismen ab, die spezifisch für das Material und die Kompaktierungsparameter sind [Ara16] [Sha15]. Eine Kompaktierung des Fasermaterials ist in der Regel bereits Teil der Faserverbundherstellung, z.B. durch Nutzung des Autoklaven. Die Vorkompaktierung als Integration eines zusätzlichen Schrittes in den Herstellungsprozess ist vor allem bei Verfahren, die niedrige Drücke auf das Fasermaterial aufbringen, sinnvoll, um Faservolumengehalte zu steigern. Dazu zählen Vakuumsackverfahren, bei denen der Kompaktierungsdruck nur durch Differenz zum Umgebungsdruck aufgebaut wird. Ein Gleichgewicht zwischen äußeren Kompaktierungskräften und Rückstellkräften des Fasermaterials wird dabei bereits bei geringen Faservolumengehalten erreicht [Dic15].

Um das Potenzial einer Vorkompaktierung vollständig auszuschöpfen, müssen die Kompaktierungsparameter auf Material und Verfahren abgestimmt werden.

Die Entwicklung einer Methodik für einen optimalen Vorkompaktierungsprozess wird durch die naturbedingten Schwankungen der NFK erschwert. Als Naturprodukt besitzen die Fasern eine Uneinheitlichkeit in unter anderem Qualität und Durchmesser sowie eine begrenzte Faserlänge. Pflanzliche Naturfasern sind zudem ein Verbund aus verschiedenen Bestandteilen wie Cellulose, Hemicellulose, Lignin und Pektin [Nei14] [Rei15]. Die vielen Einflussfaktoren erschweren die Interpretation von Messdaten.

Eine mögliche Lösung die Uneinheitlichkeit zu reduzieren und gleichzeitig die Nähe zur Naturfaser zu bewahren bietet Celluloseregenerat. Cellulose ist der Hauptbestandteil des Verbundes der pflanzlichen Naturfaser und ist in reiner Form als Celluloseregenerat erhältlich. Celluloseregenerat ist biobasiert und biologisch abbaubar, aber synthetisch aus natürlicher Cellulose hergestellt. Durch den Herstellungsprozess kann eine Endlosfaser mit definierten Faserdurchmesser und ohne naturbedingte Schwankungen produziert werden [Erd17] [Vei23].

2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Vorkompaktierungsprozess für Celluloseregenerat-Gewebe zu optimieren, zu beurteilen und ein möglichst allgemein gültiges Vorgehen zu entwickeln.

Der betrachtete Kompaktierungsprozess wird ausschließlich monozyklisch mit trockenem Fasermaterial separiert vor der Faserverbundherstellung durchgeführt.

Als Fasermaterial werden Leinwand- und Köpergewebe mit Poren ausgewählt, die ähnliche Flächengewichte aufweisen. Beide Celluloseregenerat-Gewebe sind aus hochfesten Viskosefasern des Typs Cordenka® 700 Super 3 als verdrehte Garne aufgebaut. Für die Matrix der Faserverbunde wird ein Epoxidharz mit Aminhärter verwendet.

Die Faserverbundherstellung erfolgt im „Vacuum Assited Resin Infusion“-Verfahren, einem Vakuumsackverfahren, welches während des Prozesses nur geringe Kompaktierungsdrücke auf das Fasermaterial ausübt. Die Auswirkungen der Vorkompaktierung spiegeln sich somit deutlich im ausgehärteten Faserverbund wider und die Einflussnahmen der einzelnen Kompaktierungsparameter können einfacher interpretiert werden.

Im ersten und zweiten Teil der Arbeit werden optimale Parameter ermittelt. Dazu zählen Be- und Entlastungsgeschwindigkeit, Temperatur, Dauer und Druck. Die Grundlage bildet dabei die Arbeit von [Ken21], welche Auswirkungen der Kompaktierungsparameter an Flachsfaserverbunden untersucht hat.

Inwiefern die Vorkompaktierung mit den ermittelten Parametern das Eigenschaftsprofil der Celluloseregenerat-Gewebe beeinflusst, soll im dritten Teil der Arbeit bewertet werden. Als Beurteilungsgrundlage wird der Zugversuch als erste Einschätzung der Auswirkungen auf das mechanische Verhalten und die Permeabilitätsmessung als Auskunft über die Prozessierbarkeit gewählt. Damit soll eine erste Gegenüberstellung der für die Praxis relevanten Faktoren mechanische Kennwerte und Prozessierbarkeit erfolgen.

Aus den vorangestellten Untersuchungen wird eine Methodik abgeleitet, die das Vorgehen zum Erhalt optimaler Kompaktierungsparameter zusammenfasst. Es soll ein Leitfaden für weitere Arbeiten entstehen, da zur Ausnutzung des Optimierungspotenzials der Vorkompaktierung material- und verfahrensspezifische Anpassungen erforderlich sind.

3 Forschungsstand und theoretische Grundlagen

3.1 Naturfasern

Die Materialklasse der Naturfasern setzt sich aus einer Vielzahl von Ausgangsstoffen zusammen, sodass zwischen tierischen, pflanzlichen und mineralischen Naturfasern unterschieden wird. Pflanzenfasern spielen für Verbundwerkstoffe die bedeutendste Rolle. Abhängig davon, aus welchem Teil der Pflanze sie gewonnen werden, ergibt sich eine weitere Unterteilung in Samen-, Bast- und Hartfaser. In Abbildung 1 ist die Einteilung der Naturfasern dargestellt [Nei14] [Lam01].

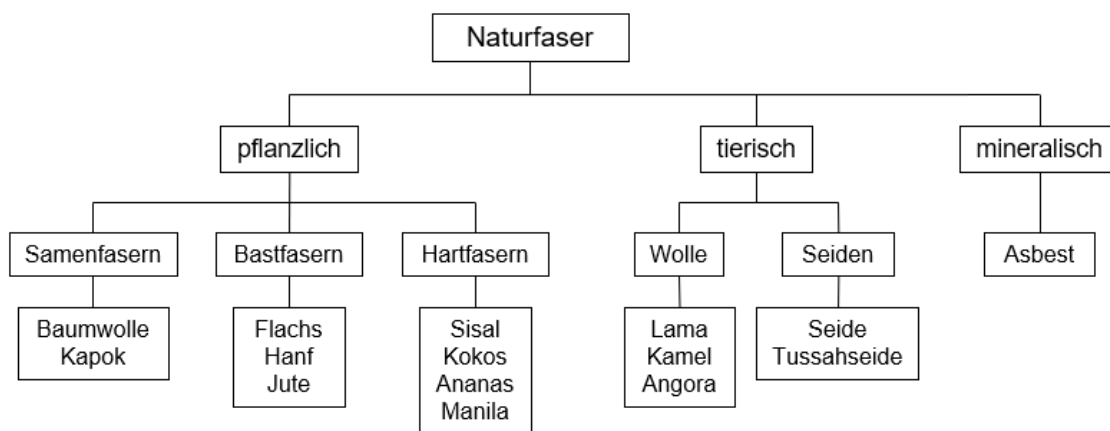


Abbildung 1: Einteilung der Naturfaser [eigene Darstellung nach [Aki11]]

Der allgemeine Aufbau von pflanzlichen Naturfasern ist in Abbildung 2 am Beispiel einer Bastfaser (Flachsfaser) dargestellt. Der Stängel besteht aus vielen Elementarfasern, die wiederum aus den Fibrillensträngen aufgebaut sind. Weiter betrachtet folgen die Makrofibrille, die Mikrofibrille und letztendlich die Elementarfaser [Ste15].

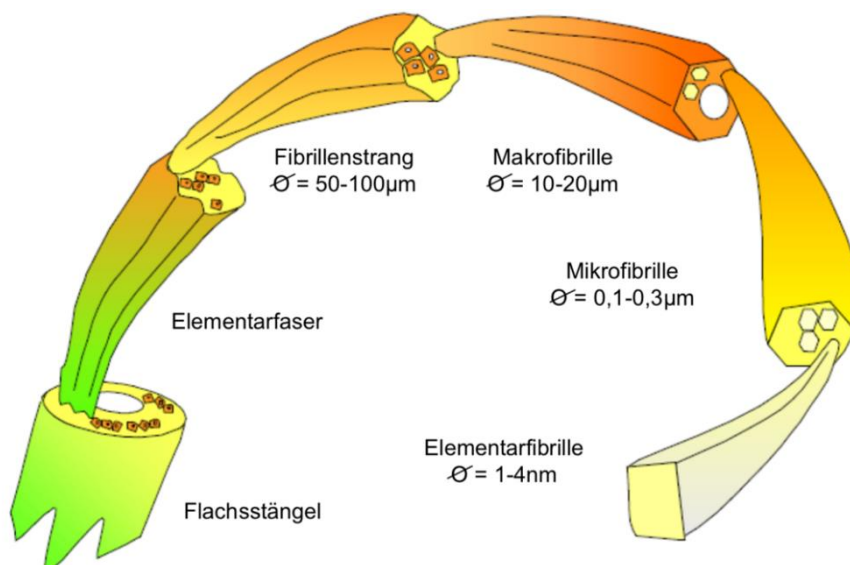


Abbildung 2: Schematischer Bastfaseraufbau [Ste15]

Aufgrund ihres Aufbaus handelt es sich bei der Naturfaser um eine diskontinuierliche Faser, die sowohl in Länge und Durchmesser variieren kann. Dadurch ergeben sich Streuungen der Eigenschaftswerte, sodass die Qualität des Naturproduktes von zahlreichen Umweltfaktoren abhängig ist [Nei14]. Dazu zählen unter anderem Standort, Klima- und Bodenverhältnisse während des Wachstums sowie Reife, Erntetechnik, Röste und Aufschlussart. Trotz der Inhomogenität des Materials bestehen Pflanzenfasern im Allgemeinen aus Cellulose, Hemicellulose, Pektin, Lignin und mineralischen Bestandteilen. Weitere Bestandteile sind Proteine, Wachse, Fette und Öle [Aki11] [Rei15].

Außerdem sind Pflanzenfasern hydrophil, sodass sie Feuchtigkeit aus der Luft oder anderen Umgebungsmedien aufnehmen. Das aufgenommene Wasser beeinflusst je nach Menge die Materialeigenschaften. Die Höhe der Wasseraufnahme unterscheidet sich zwischen den verschiedenen Pflanzenfasern. Allgemein gilt, dass geeignete Vortrocknungsschritte die negative Auswirkungen der Wasseraufnahme weitestgehend reduzieren [Aki11] [Lam01].

Neben Qualitätsvariation und Wasseraufnahme stellen niedrige thermische Beständigkeit, Altersbeständigkeit sowie Geruchsneutralität weitere Probleme dar [Ehr06]. Teilweise sind aufwendige Vorbehandlungen für die Kompatibilität mit der Matrix notwendig. Bei der Naturfaser sind gute Ergebnisse einer Oberflächenmodifizierung mit Alkalibehandlung, durch Anwendung von Isocyanat- und Silanverbindungen sowie durch Plasmabehandlung möglich [Ehr06] [Nei14].

Naturfasern weisen zudem eine Permeabilität für Harzsysteme auf. Sie absorbieren das Harzsystem in ihre Hohlräume und quellen daher auf. Dadurch erhöht sich das Gewicht der Naturfasern. Bei einer Messung der Permeabilität (vgl. Kapitel 3.9) wird diese Eigenschaft der Absorption als „Senke“ bezeichnet und beeinflusst auftretende Kapillareffekte [Pan20] [Ste19]. Vorteile der Naturfasern liegen aufgrund geringer Dichte und niedriger Materialkosten im Leichtbaupotenzial. Zudem zeigen sie eine hervorragende akustische Dämpfung, geringe Abnutzung bei mechanischer Beanspruchung, besitzen einen eigenen Brennwert bei der thermischen Verwertung und einen geringen Energiebedarf bei der Herstellung [Ehr06]. Im Hinblick auf die CO₂-Emission liefert die Naturfaser keinen Beitrag zur globalen Erwärmung [Erd17] [Nei14]. Die pflanzliche Naturfaser wird teilweise speziell für die Kunststoffindustrie angebaut oder steht als Abfallprodukt anderer Verwertungsbereiche zur Verfügung [Aki11].

3.2 Natürliche Cellulose

Das Naturpolymer Cellulose ist der Hauptbestandteil der pflanzlichen Zellwand. Es bildet das Grundgerüst und bietet den Pflanzenzellwänden Stabilität, da es sowohl hohe Formstabilität als auch Biegefestigkeiten und -steifigkeiten aufweist [Rei15].

Cellulose ist ein Polysaccharid. Saccharide werden auch als Kohlenhydrate bezeichnet und bestehen nur aus Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffatomen. In Abbildung 3 ist der Aufbau von Cellulose aus Molekülketten von D-Glucose zu sehen. Die kleinste Wiederholungseinheit wird Cellobiose genannt [End09].

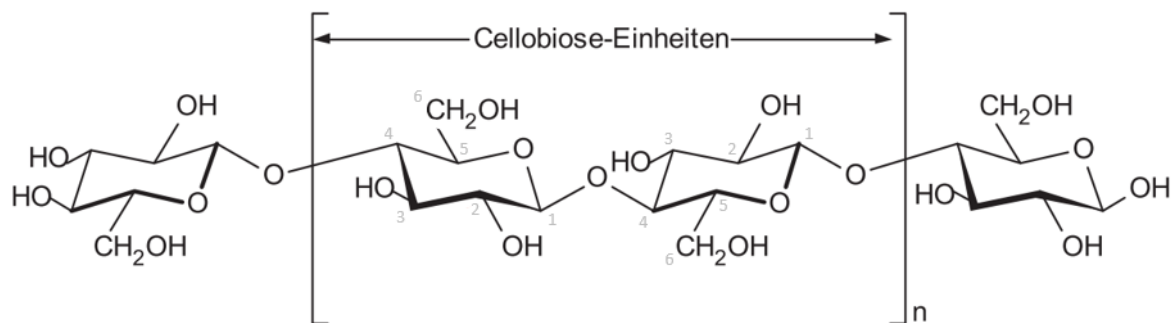


Abbildung 3: Molekulare Struktur von Cellulose [modifiziert nach End09]

Die D-Glucosemoleküle sind in der Molekülkette kovalent verbunden und um 180° gedreht zueinander angeordnet. Durch diese β -1-4-glykosidische Bindung ergibt sich eine lineare unverzweigte Kette, die eine Parallelanordnung der Ketten begünstigt [Kle05] [Tür14]. Jedes Glucosemolekül besitzt drei freie Hydroxygruppen, sodass inter- und intramolekulare Wasserstoffbrückenbindungen ausgebildet werden können und ein dreidimensionales Netzwerk entsteht. Die intramolekularen Wechselwirkungen sorgen für eine geringe Beweglichkeit und Steifigkeit der einzelnen Ketten. Dies führt dazu, dass eine Kettenfaltung oder Verschlaufung nahezu ausgeschlossen werden kann. Es kommt dabei zu einer Wasserstoffbrückenbindung zwischen dem Ringsauerstoffatom und einer gegenüberliegenden Hydroxygruppe. Intermolekulare Wasserstoffbrückenbindungen werden zwischen den Hydroxygruppen benachbarter Ketten ausgebildet [Erd17] [Rih03]. Diese Bereiche besitzen eine hohe Ordnung und sind kristallin. Sie wechseln sich mit amorphen Bereichen ab. Der Kristallinitätsgrad natürlicher Cellulose liegt üblicherweise bei bis zu 60 %, aber es sind auch Werte bis zu 80% möglich [Rei15] [Tür14]. Mit dem Wachstumsprozess einer Pflanze nimmt die Kristallinität zu und steigt somit mit dem Alter der Pflanze an. Je nach Pflanzenart und Behandlung variiert zudem Anzahl an Cellobiose-Einheiten und damit der Polymerisationsgrad des Homopolymers [Rih03] [Tür14].

Trotz der hydrophilen Hydroxygruppen ist Cellulose durch relative Unzugänglichkeit der kristallinen Bereiche wasserunlöslich. Jedoch quillt Cellulose in Wasser um bis zu 90% auf.

Löslich ist Cellulose in starken Säuren oder Laugen, welche das Wasserstoffbrückennetzwerk aufbrechen können [End09] [Rei15].

In der Natur tritt Cellulose zudem oftmals im Verbund mit Lignin auf. Bei mehrjährigen Pflanzen kann es zu der sogenannten Verholzung kommen und Lignocellulose gebildet werden, indem das Lignin die Matrix aus Hemicellulose und Cellulose durchdringt [End09] [Rei15].

3.3 Celluloseregenerat(-fasern)

Bei Celluloseregenerat handelt es sich verallgemeinert um gelöste und neu zusammengesetzte Cellulose. Dies ist notwendig, da die Cellulosefasern aus der Natur zu kurz sind um direkt zu Garnen versponnen zu werden. Die chemische Struktur wird bei der Herstellung von Celluloseregenerat nicht dauerhaft verändert, sodass von einem Regenerat gesprochen wird [End09] [Vei23]. Bei der neuen Zusammensetzung der Cellulose wird diese gleichzeitig in Form, meist von Fasern oder Folien, gebracht. Der Fokus dieses Kapitel liegt auf Celluloseregenerat als Faser [End09].

Celluloseregeneratfasern sind demnach synthetische Fasern aus einem biobasierten Ausgangsstoff. Der Naturstoff Cellulose wird in einem technischen Prozess neu zu einer Endlosfaser bzw. einem Filament oder Multifilamentgarn versponnen [Erd17].

Es gibt verschiedene Herstellungsprozesse zum Erhalt der regenerierten Cellulose, welche zu Celluloseregenerat mit unterschiedlichen Eigenschaften und Bezeichnungen führt. Zu den Bezeichnungen zählen Viskose, Lyocell, Zellwolle, Kunstseide, Rayon und einige weitere. Ein Hinweis auf das Herstellungsverfahren verbirgt sich jedoch nicht hinter allen. Rayon und Kunstseide sind beispielsweise nicht genormte Sammelbezeichnungen [End09] [Erd17].

Viskose, die im gleichnamigen Viskoseverfahren hergestellt wird, ist das mengenmäßig bedeutendste Celluloseregenerat. Das Viskoseverfahren ist ein industrielles Nassspinnverfahren, dass in Kapitel 3.3.3 näher beschrieben wird [End09] [Erd17].

Viskosefasern sind biobasiert und biologisch abbaubar. Sie weisen eine gute thermische Stabilität auf und finden Anwendung unter anderem in der Textilindustrie, für Medizin- und Hygieneprodukte oder als Reifencord. Letzterer ist eine technische Anwendung, bei der die Fasern als Verstärkungskomponente dienen. Bei einem Einsatz als Verstärkungskomponente ist eine gute Anbindung von Faser und Matrix erforderlich. Dabei gilt: je hydrophober die Matrix, desto schlechter die Anbindung. Durch eine Auftragung von Haftvermittlern kann das Problem gezielt gelöst werden [End09] [Erd17].

3.3.1 Unterschiede zwischen regenerierter und natürlicher Cellulose

Die molekulare Struktur von Celluloseregenerat ist mit der von natürlicher Cellulose identisch [Erd17]. In Kapitel 3.2 ist der Aufbau beschrieben und in Abbildung 3 veranschaulicht. Trotzdem gibt es Unterschiede zwischen natürlicher und regenerierter Cellulose, die auf den Herstellungsprozess zurückzuführen sind. Aus welchen Schritten des Herstellungsprozesses im Viskoseverfahren diese Änderungen zurückzuführen sind wird in Kapitel 3.3.3 erläutert.

Regenerierte Cellulose besteht nahezu vollständig aus reiner Cellulose (>99,5 %). In Pflanzen tritt Cellulose hingegen mit Begleitsubstanzen auf, sodass sie nicht in reiner Form vorliegt [Erd17] [Vei23]. Der Polymerisationsgrad von Celluloseregenerat ist mit 250 bis 500 deutlich geringer als bei natürlicher Cellulose (Kapitel 3.2). Gleiches gilt für die Kristallinität, die bei regenerierter Cellulose nur zwischen 10 % und 40 % liegt. Thermodynamisch sind die kristallinen Bereiche regenerierter Cellulose, bezeichnet als Cellulose II, stabiler als die natürlicher Cellulose, der Cellulose I. Die nebeneinander existierenden kristallinen und amorphen Bereiche der Celluloseregeneratfaser besitzen eine Vorzugsrichtung entlang der makroskopischen Faserlänge [Erd17]. Durch die veränderte Kristallinität ist das Wasseraufnahmevermögen der regenerierten Cellulose höher. Viskose zeigt eine Wasseraufnahme von 74 %, während diese bei Baumwolle nur 18 % beträgt [Tür14].

3.3.2 Celluloseregenerat- und andere Fasern im Vergleich

Celluloseregeneratfasern und pflanzliche Naturfasern sind biobasiert und biologisch abbaubar. Fasern aus regenerierter Cellulose besitzen einen definierten Faserdurchmesser und sind als Endlosfasern herstellbar. Naturfasern können hingegen nur als Endlosgarn produziert werden. Zudem hat Celluloseregenerat durch den Herstellungsprozess keine naturbedingten Schwankungen in dessen Eigenschaftsprofil. Die Verfügbarkeit ist kalkulierbar und saisonale Schwankungen nicht vorhanden. Ein weiterer großer Unterschied zu Naturfasern ist die Reinheit der regenerierten Cellulose. Sie besteht (fast) ausschließlich aus Cellulose, während Naturfasern an sich ein Verbundmaterial aus verschiedenen Stoffen darstellen (vgl. Kapitel 3.1) [Erd17].

Bei einem Vergleich von Celluloseregeneratfasern zu anderen synthetischen Fasern, wie Glas- und Kohlenstofffasern, ist ein großer Vorteil der biobasierte Ursprung, die biologische Abbaubarkeit und die geringere Dichte. Gegenüber Glasfasern besitzen sie zudem eine bessere akustische Dämpfung sowie geringe Splitterneigung [Erd17].

3.3.3 Herstellung von Celluloseregeneratfasern im Viskoseverfahren

Die Herstellung von Celluloseregeneratfasern im Viskoseverfahren erfolgt in einem mehrstufigen Prozess. In Abbildung 4 sind die einzelnen Schritte des Viskoseverfahrens schematisch dargestellt.

Das Ausgangsprodukt ist ein Zellstoff, der aus Holz gewonnen wird, bis zu 98% aus Cellulose besteht und niedrige Anteile an Hemicellulose besitzt [End09] [Rih03]. Er wird in Blatt- oder Flockenform geliefert und die in ihm enthaltenen Cellulosefasern sind unschmelzbar sowie zu kurz um direkt versponnen zu werden. Die Qualität des Zellstoffes, d.h. der Anteil an reiner Cellulose, spielt für den Herstellungsprozess von Celluloseregenerat eine wichtige Rolle. Seine Herstellung unterliegt einem separaten Prozess, der hier nicht erläutert wird [Vei23].

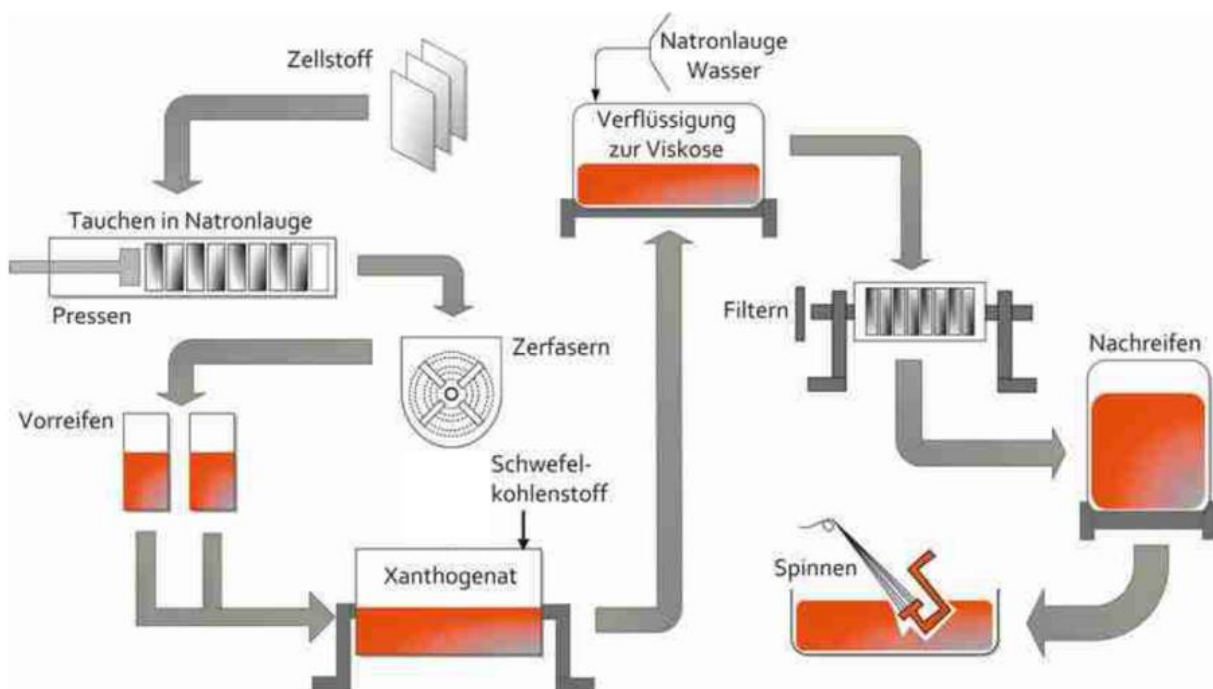


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Viskoseverfahrens zur Herstellung von Celluloseregeneratfasern [modifiziert nach Tür14]

Der erste Schritt des Verfahrens ist die Alkalisierung der Cellulose. Dafür wird der Zellstoff bei 17°C bis 45°C in 20 %ige Natronlauge getaucht. Es entsteht Alkalicellulose, eine gequollene, krümlige Masse, während die restliche Hemicellulose in Lösung geht. Dabei wird das über Wasserstoffbrückenbindungen verbundene Gefüge der Celluloseketten gelockert. Die Alkalicellulose wird ausgepresst, zerfasert und einer Vorreife unterzogen. Ein Zerfasern ist nur notwendig, wenn der Zellstoff als Ausgangsmaterial eine Blattform aufwies. Die Vorreife erfolgt für 2 bis 3 Tage bei 30 °C. Währenddessen kommt es zur Änderung der Kristallmodifikation von Cellulose I zu Cellulose II, einem partiellen Abbau der Celluloseketten und somit einer Verringerung des Polymerisationsgrades auf 250 bis 400 bei normalen und 400 bis 500 bei hochfesten Fasern. Diese drastische Abnahme ist erforderlich, um Viskosität der Spinnlösung aus den letzten Schritten des Verfahrens zu senken [End09] [Erd17] [Tür14] [Vei23].

Im Knetter folgt für einige Stunden bei 25 °C bis 30 °C die Umsetzung der Alkalicellulose zu Cellulosexanthogenat durch Zugabe von 35 %igem Schwefelkohlenstoff. Cellulosexanthogenat ist eine zähe orangegelbe Masse, die unter Wärmefreisetzung entsteht. Diese wird im nächsten Herstellungsschritt in 40 %iger Natronlauge gelöst. Die entstandene Spinnlösung ist die eigentliche Viskose, mit 7 % bis 10 % reiner Cellulose und einer Viskosität zwischen 3 Pa·s bis 10 Pa·s [End09].

Daraufhin wird die Lösung mehrfach filtriert und einem Nachreifeprozess unterzogen. Dabei verringert sich der Xanthogenierungsgrad und es kommt zur Rückbildung der OH-Gruppen. Bei einer spinnbaren Lösung enthalten zwei $C_6H_{10}O_5$ -Gruppen ein Schwefelkohlenstoffmolekül. Die Nachreife erfolgt in 2 bis 3 Tagen bei 15 °C bis 18 °C unter Luftausschluss. Die Entgasung ist notwendig um entstandene Gase zu entfernen, die beim folgenden Schritt des Spinnens einen Faserbruch erzeugen können [End09] [Vei23].

Die Viskose wird in sogenannten Fällbädern durch Spinndüsen (Edelmetall- oder Keramikplatten mit mehreren Öffnungen) gepumpt. Die Anzahl der Öffnung entspricht bei der Filamentgarnherstellung der Anzahl der gewünschten Filamente im Garn. Durch die im Fällbad enthaltenen Salze und Säuren flockt die Viskose aus und es entsteht ein fester Faden aus annähernd reiner Cellulose, der fälschlicherweise als Viskosefaser betitelt wird [End09] [Erd17] [Vei23].

Das Ausflocken, auch Koagulation genannt, findet aufgrund einer ablaufenden chemischen Reaktion zwischen Spinnlösung, der Viskose, und der wässrigen Schwefelsäure aus dem Spinnbad statt, wie in Abbildung 5 zu sehen ist.

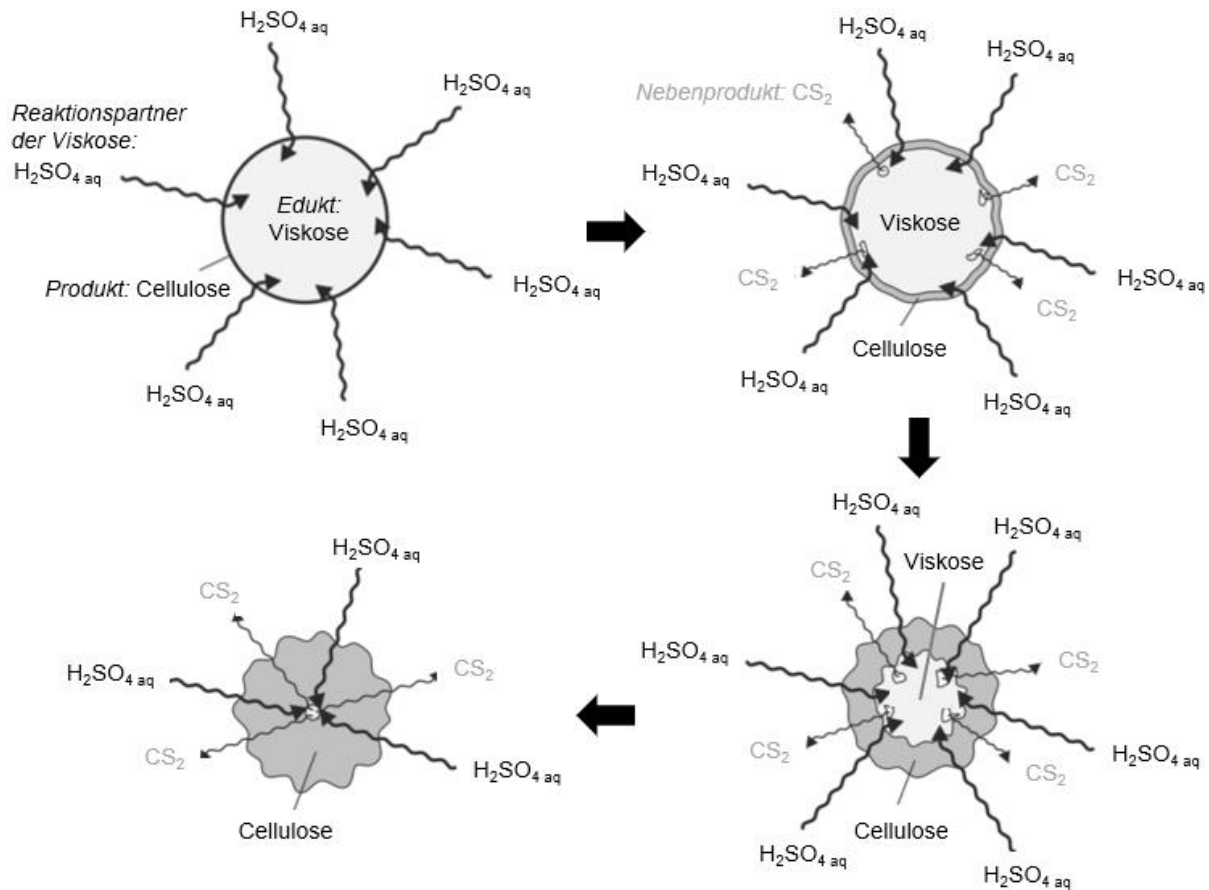


Abbildung 5: Prozess des Ausflockens von Celluloseregenerat [modifiziert nach Vei23]

Die entstehenden Celluloseregeneratfasern besitzen zunächst eine Kern-Mantel-Struktur. Nach der Formgebung durch die Spinndüse bildet sich außen eine dünne Haut aus regenerierter Cellulose, während die chemische Reaktion innen noch nicht stattgefunden hat. Der Reaktionspartner der Viskose ist die Schwefelsäure aus dem Spinnbad. Diese dringt in den Kern ein und es findet die Entstehungsreaktion von Celluloseregenerat statt, sodass der Anteil des Mantels zunimmt. Das Nebenprodukt Schwefelkohlenstoff diffundiert dabei nach außen ins Fällbad. Dadurch bilden sich Hohlräume, sodass die Faser letztendlich kollabiert. Der ursprünglich gebildete äußere Mantel aus regenerierter Cellulose ist jedoch fest und kann nicht schrumpfen. Es entsteht ein unrunder Querschnitt der Celluloseregeneratfaser (vgl. Abbildung 6) [Vei23].

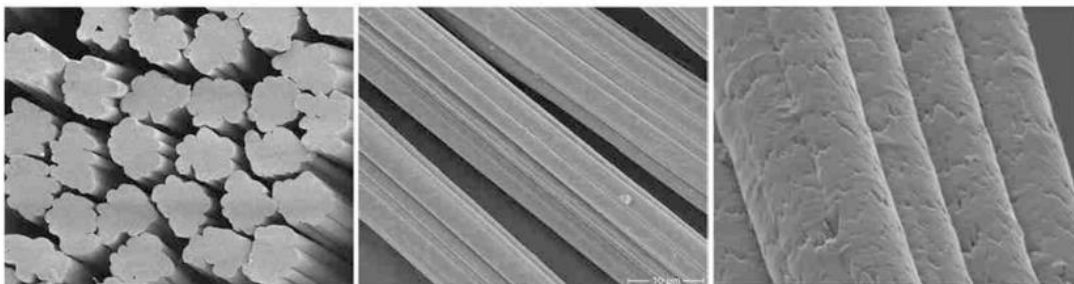


Abbildung 6: Mikroskopieaufnahmen von Viskosefasern vor dem Verstrecken im Querschnitt (links) und in der Längsansicht (Mitte) sowie nach dem Verstrecken (rechts) [modifiziert nach Vei23]

Nach Verlassen des Spinnbads werden die Filamente einer Spinndüse gebündelt und gelangen in einen Heißluftstrom, in welchem sie verstreckt werden. Die Gesamtverstreckung von Standardfasern liegt bei circa 20 %. Hochfeste Fasern hingegen können eine Gesamtverstreckung von bis zu 150 % aufweisen [End09] [Vei23].

Das Verstrecken sorgt für eine Orientierung der Moleküle und Verbesserung der Fasereigenschaften, vor allem der Festigkeit in Längenrichtung. Der Prozess beeinflusst die Größe und die Anordnung der Kristallite sowie den kristallinen Anteil der Faser. Zudem wird die Form des Faserquerschnitts verändert, sodass die in Abbildung 6 zu sehenden Riefen verringert werden. In Heißwasserbädern werden die Fasern von Begleitsubstanzen aus dem Fällbad befreit. Im Regelfall erfolgt in den letzten Schritten des Herstellungsprozesses das Bleichen der Fasern mit Chlorlauge oder Wasserstoffperoxid. Je nach Weiterverarbeitung findet eine Beschichtung der Faser mit Gleitmittel oder Haftvermittler statt. Abschließend durchlaufen die Fasern einen Trocknungsschritt [End09] [Tür14] [Vei23].

Das resultierende Fasereigenschaftsprofil wird durch die Herstellungs- und Nachbehandlungsparameter, insbesondere die Spinnparameter sowie das Verstrecken, maßgeblich beeinflusst [Vei23].

Neben den Viskosefaser entstehen bei der Herstellung teilweise giftige, brennbare oder mit Luft explosive Nebenprodukte, die sowohl schädlich für die Umwelt als auch gefährlich für Mitarbeitende sind [End09]. Das Viskoseverfahren hat einen sehr hohen Verbrauch an Chemikalien, Wasser und Energie, sodass versucht wird viele Kreisläufe aufzubauen [Vei23].

3.4 Textile Flächengebilde

Textile Flächengebilde sind Faserhalbzeuge, die aus Garnen oder Rovings aufgebaut werden, die wiederum aus Einzelfasern bestehen. Ein Roving sind mehrere parallel zusammengefasste Fasern, meist Endlosfasern, die nicht miteinander verdreht werden. Garne bestehen wiederum aus verdrehten Fasern. Durch die Verdrehung ist es möglich, Fasern mit begrenzter Faserlänge, wie z.B. Naturfasern, zu einem (Endlos-) Garn zu verarbeiten [AVK10] [Ehr06].

Die Feinheit von Garnen wird als Titer bezeichnet und in der Einheit tex bzw. dtex angegeben $\left(1 \text{ dtex} = \frac{1 \text{ g}}{10.000 \text{ m}}\right)$ [Vei23].

Gewebe und Gelege gehören zu den häufigsten und bekanntesten Formen der textilen Flächengebilde. Gewebe bestehen aus rechtwinklig gekreuzten Kett- und Schussfäden, die über- und untereinander liegen. Bei der Gewebeerstellung werden die Kettfäden je nach Webart in Teilen gehoben und gesenkt. Die Schussfäden werden im 90°-Winkel zwischen die Kettfäden eingeschossen. Dies geschieht in einem vorgegebenen Takt. So entsteht eine bidirektionale Verstärkung mit unterschiedlichen Fadenkreuzungen, den Bindungen. Es gibt

drei Grundbindungen: Leinwand-, Köper- und Atlasbindung. In Abbildung 7 sind diese Bindungsarten dargestellt [AVK10] [Ehr06].



Abbildung 7: Grundbindungen von Geweben (links: Leinwand-, Mitte: Köper-, rechts: Atlasbindung) [Ehr06]

Die Leinwandbindung besitzt die höchste Flottierung. Das bedeutet in einer bestimmten Länge treten die häufigsten Kreuzungen auf. Dadurch ist eine gute Handhabung und eine hohe Verschiebfestigkeit gegeben. Die Flottierung nimmt über die Köperbindung hin zur Atlasbindung ab, sodass die Drapierbarkeit zu- und der wellenförmige Faserverlauf abnimmt. Letzteres hat positive Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Fasern [AVK10] [Ehr06].

Die Fadendichte in Kett- und Schussrichtung der Gewebetypen kann variieren, sodass unidirektionale Textilien entstehen. Außerdem gibt es Gewebe mit unterschiedlichen Kett- und Schussfäden, sogenannte Misch- oder Hybridgewebe. Schussfäden können aber auch nur zur Fixierung eingesetzt werden [AVK10] [Ehr06].

Im Gegensatz zu Geweben besitzen Gelege keine wellenförmig verlaufenden Fasern oder Webungen. Sie bestehen aus parallel angeordneten Fasern, die in größeren Abständen durch Schussfäden oder Klebvliese zusammengehalten werden [Ehr06].

Textilien besitzen Mehrskaleneigenschaften, da sie unterschiedliche Strukturen auf der Größenskala besitzen. In der kleinsten Skala der drei Größenebenen sind die einzelnen Filamente bzw. Fasern zu nennen, die eine gewisse Anordnung besitzen. Es folgt die Anordnung der Garne bzw. Rovings zueinander, was wiederum die Art des textilen Flächengebildes wiedergibt und letztendlich das Textil als ein Material [Dic15].

3.5 Faserkunststoffverbund

Ein Faserkunststoffverbund (FKV) besteht generell aus Verstärkungsfasern und einer Kunststoffmatrix. Die Matrix umschließt dabei die Fasern und sorgt für eine Einleitung der auftretenden Kräfte in die Verstärkungsfasern, welche für die eigentlichen Festigkeiten und Steifigkeiten in Faserrichtung verantwortlich sind. Außerdem bietet die Kunststoffmatrix eine Stützwirkung, sorgt für den Zusammenhalt der Verstärkungskomponente, fixiert ihre Ausrichtung und schützt diese vor Umwelteinflüssen. Somit werden die positiven

Eigenschaften der Verstärkungsfasern und der Matrix in einem FKV miteinander ergänzt [Erd17] [Lam01] [Ehr06].

Nach der Länge der eingesetzten Verstärkungsfasern können FKV strukturbezogen in kurz-, lang- und endlosfaserverstärkte Kunststoffe unterteilt werden [Erd17]. Die Einteilung nach Faserlänge unterscheidet sich je nach Autor bzw. Quelle, sodass nicht von einer allgemein gültigen Bezeichnung gesprochen werden kann.

Ein bedeutender Faktor, um optimale Eigenschaften des Verbundes zu erzielen, ist die Faser-Matrix-Haftung des FKV. Dabei handelt es sich um keine zweidimensionale geometrische Grenzfläche, sondern vielmehr um eine dreidimensionale Grenzschicht bzw. Grenzphase. Die Entstehung von Wechselwirkungen zwischen Fasern und Matrix ist sowohl durch Adhäsionsvorgänge und/oder chemische Reaktionen an der Grenzschicht als auch durch Diffusion und Wechselwirkungen, wie Wasserstoffbrückenbindungen, Säure-Base-Bindungen sowie Komplexbildungen, bedingt. Aufgrund der oftmals geringen chemischen Ähnlichkeit der Fasern mit der Matrix, kommen Haftvermittler bzw. Schichten zum Einsatz und werden durch Oberflächenbehandlungen auf die Verstärkungsfasern aufgetragen [Ehr06] [Nei14]. Die Zusammensetzung und Wirkungsweise der Schichte ist sehr komplex, für die jeweilige Matrix spezifisch und wird von den Herstellern der Fasern nicht genau bekannt gegeben. Allgemein gilt es für die optimale Faser-Matrix-Haftung eine chemische Bindung anzustreben [Nei14]. In Naturfaserverbunden beeinflusst eine Feuchtigkeitsaufnahme die Faser-Matrix-Haftung zudem negativ [Erd17].

Neben der beschriebenen Faser-Matrix-Haftung werden die Eigenschaften des Verbundes primär durch das Verhältnis der beiden Komponenten, dem Faservolumengehalt (FVG), beeinflusst. Allgemein wird ein möglichst hoher Verstärkungsfasergehalt im Verbund durch Minimierung des Matrixanteils angestrebt. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 8 verdeutlicht [Erd17] [May20].

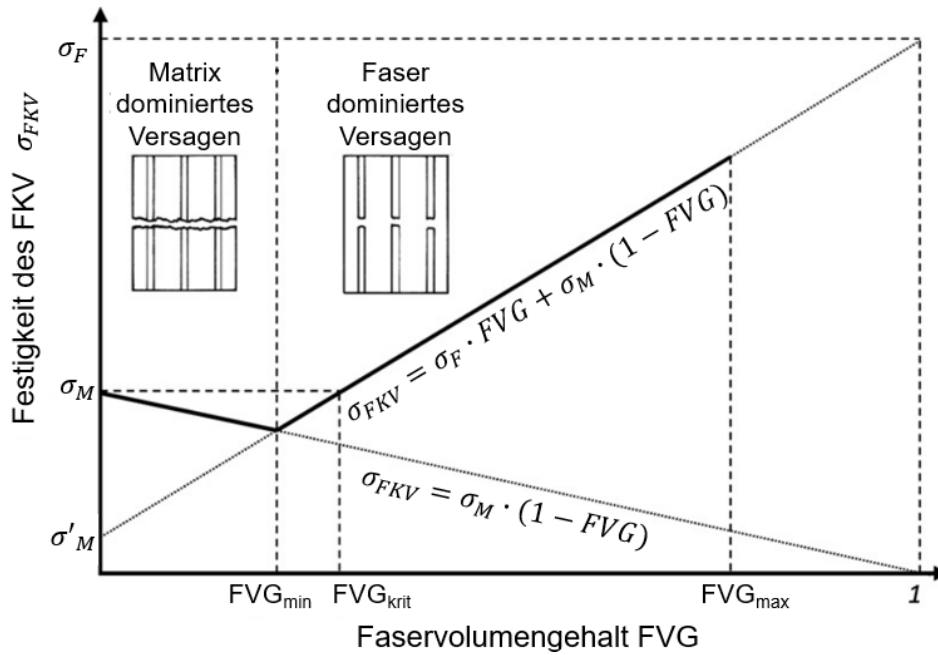


Abbildung 8: Qualitative Darstellung der Festigkeit des Faserkunststoffverbunds in Abhängigkeit des Faservolumengehalts [modifiziert nach Sha13]

Eine Faserzugabe unterhalb des kritischen FVG sorgt für eine Schwächung des FKV. Die Fasern wirken unter dem minimalen FVG als Defekte, da sie zu große Abstände zueinander aufweisen und eine Kraftweiterleitung verhindert wird. Die eingebrachten Faserdefekte reduzieren den nutzbaren Querschnitt, sodass die Verbundfestigkeit unterhalb der Festigkeit der reinen Matrix liegt. Oberhalb des minimalen FVG steigen die Eigenschaften des FKV entsprechend der Mischungsregel an. Das Versagen wird von den Fasern dominiert, die sich jedoch weiterhin negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirken [May20].

Erst ab dem kritischen FVG werden die Fasereigenschaften ausgenutzt und es kommt zu einem Anstieg der mechanischen Eigenschaften des verstärkten verglichen zum unverstärkten Kunststoff. Der maximale FVG eines Verbundes wird durch die Packungsdichte abhängig vom Querschnitt der Fasern festgelegt. In der Realität wird der FVG von der vollständigen Benetzbarkeit aller Fasern des Verbundes begrenzt und ist damit verfahrens- und materialspezifisch. Kann die Matrix die dicht liegenden Fasern nicht vollständig benetzen, führt die Entstehung von trockenen Stellen zu einer fehlenden Faser-Matrix-Haftung und letztendlich zur Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften [May20] [Sha13].

Der Faservolumengehalt FVG eines ausgehärteten FKV kann über Gleichung 3.1 berechnet werden. Dafür sollten die Lagenanzahl n , das Flächengewicht des textilen Halbzeuges m_A , die Dichte der Fasern ρ_F und die Dicke des FKV d bekannt sein. Außerdem wird angenommen, dass der Verbund nur aus Fasern und Matrix besteht. Fehlstellen wie Lufteinschlüsse oder Verunreinigungen werden vernachlässigt [OBr18].

$$FVG = \frac{n \cdot m_A}{\rho_F \cdot d \cdot 1000} \quad (3.1)$$

Die Faserverteilung und -orientierung besitzen ebenfalls einen Einfluss auf die Eigenschaften des Verbundes. Aufgrund der Anisotropie der Verstärkungsfasern ist vorzugsweise eine Ausrichtung der Fasern in die Belastungsrichtung(en) gewünscht. Zudem korrelieren die mechanischen Eigenschaften des Verbundes mit der Länge bzw. dem Aspektverhältnis $\left(\frac{\text{Länge}}{\text{Durchmesser}}\right)$ der Verstärkungsfasern. Ein hohes Aspektverhältnis, d.h. hohe Faserlänge bzw. geringer Faserdurchmesser, begünstigen die Krafteinleitung aus der Matrix in die Verstärkungsfasern, da die Einleitung fast ausschließlich über den Mantel der Faser erfolgt und somit die mechanischen Eigenschaften beeinflusst [Erd17].

Faserverstärkte Kunststoffe zeichnen sich durch hohe spezifische Festig- und Steifigkeiten aus. Sie besitzen im Allgemeinen enormes Leichtbaupotenzial, geringe Wärmeausdehnung, hohe Korrosionsbeständigkeit und Schwingfestigkeit [Erd17].

3.6 Epoxidharzsystem

In einer chemischen Reaktion von Harz- und Härtermolekülen des Epoxidharzsystems entsteht der ausgehärtete Feststoff, welcher zusätzliche Hilfsstoffe wie Lösungsmittel enthalten kann. Er gehört zu den Duroplasten und bildet eine sehr vielfältige Werkstoffklasse, da Harz und Härter mit chemisch unterschiedlichen Strukturen existieren. Durch die Wahl des Harzes, des Härters und der Zusatzstoffe können die Materialeigenschaften des ausgehärteten Systems eingestellt werden [Ehr06].

Bei Raumtemperatur sind Epoxidharze fest oder mittel- bis hochviskos. Die Härter können in flüssiger oder in Pulverform dazugegeben werden. Das Vermischen der beiden Komponenten muss aufgrund des chemischen Aufbaus nach einem streng stöchiometrischen Verhältnis erfolgen. Die chemische Struktur des Epoxidharzes enthält mindestens eine Epoxidgruppe. Diese entspricht einem Dreiring zwischen zwei Kohlenstoffatomen und einem Sauerstoffatom, der aufgrund starker Spannung eine hohe Reaktivität besitzt. Im Molekül des Härters ist aktiver Wasserstoff enthalten, der mit dem Epoxidring reagiert. Bei multifunktionellen Epoxiden und multifunktionellen Härtern entsteht nach der Reaktion ein dreidimensionales Netzwerk. Der Mechanismus hinter der Reaktion ist eine Polyaddition, in der eine Wanderung von Protonen stattfindet. In Abbildung 9 sind die Reaktionsprodukte und das -produkt der Polyaddition zu sehen [AVK10] [Ehr06] [Ste20].

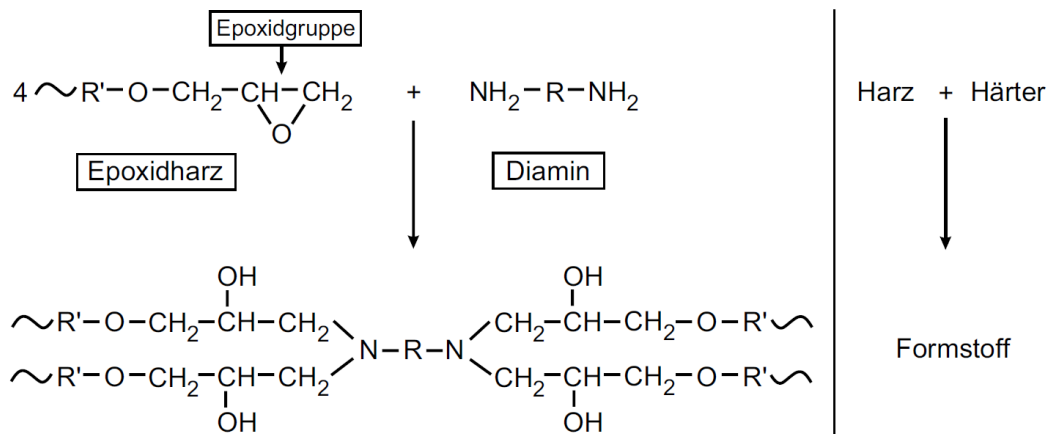


Abbildung 9: Darstellung der Reaktionsedukte und dem -produkt der Polyaddition zwischen Epoxidharz und Diamin-Härter [Ehr06]

Der Dreiring des Epoxidharzes wird durch die negativ geladene Elektronenwolke des Stickstoffatoms geöffnet. Mit dem endständigen Kohlenstoffatom geht das Stickstoffatom aus der Amingruppe eine Bindung ein, womit das Stickstoffatom positiv und das Sauerstoffatom des geöffneten Dreirings negativ geladen sind. Daraufhin findet die Protonenwanderung statt, in der das aktive Wasserstoff des Diamins zum negativ geladenen Sauerstoffatom wandert und eine Hydroxygruppe (OH-Gruppe) ausbildet. Ein Diamin, dass vier aktive Wasserstoffe und zwei Stickstoffatome besitzt, kann sich mit vier Epoxidharzmolekülen verknüpfen [Ehr06] [Ste20].

Die Polyaddition zur Bildung des Epoxidharzsystems startet verhältnismäßig langsam. Es handelt sich um eine exotherme Reaktion, deren Geschwindigkeit temperaturbedingt erhöht wird [Ehr06].

Das ausgehärtete Epoxidharzsystem weist eine gute thermische und elektrische Isolierwirkung, sehr gute mechanische und dynamische Eigenschaften und gute Haftung mit vielen Substraten auf. Je nach Wahl des Härters kann zudem eine chemische Beständigkeit erzielt werden. Weitere Vorteile sind, dass sie kein Lösungsmittel benötigt und keine flüchtigen Nebenprodukte entstehen sowie nur eine geringe Volumenabnahme durch Schrumpfen stattfindet. Diese findet Großteiles in der flüssigen Phase statt und liegt bei 2-5 % [Ehr06] [Zen05].

Anwendungen finden die Harzsysteme in unterschiedlichen Bereichen. Dazu gehören die Verwendung als Gieß- und Laminierharz in der Elektroindustrie, als Beschichtungs- und Werkzeugharz und als Bindemittel für Mörtel. Ungefähr 8 % der Epoxidharzsysteme werden als Matrix für Faserverbundwerkstoffe mit hochwertigen Fasern verwendet. Aufgrund ihrer Eigenschaften sind sie fast mit allen Faserarten verwendbar [Ehr06] [Zen05].

3.7 „Vacuum Assisted Resin Infusion“-Verfahren

Das „Vacuum Assisted Resin Infusion“-Verfahren (VARI-Verfahren) zählt zu der Gruppe der sogenannten „Liquid Composite Moulding“-Verfahren (LCM-, Harzinjektions- und Harzinfusionsverfahren). Diese beinhaltet verschiedene Herstellungsverfahren, bei denen die trockenen Fasern in ein Werkzeug gelegt und mit einem flüssigen Matrixsystem imprägniert werden. [Bai22].

Bei dem LCM-Verfahren entsteht, ebenso wie bei anderen Herstellungsverfahren, ein festes Bauteil durch die exotherme Vernetzungsreaktion von Harz und Härter. Der Gelierpunkt des Harzsystems sollte jedoch erst erreicht sein, wenn eine vollständige Imprägnierung des Bauteils gegeben ist. Anderenfalls können trockene Stellen oder Hohlräume entstehen [Zen05].

Das VARI-Verfahren bietet eine einfache Werkzeugbereitstellung und erlaubt die Herstellung von verschiedenen geometrischen Strukturen. Allerdings erfordert der VARI-Aufbau einen hohen manuellen Arbeitsaufwand, sodass sich dieses Verfahren aus ökonomischer Sichtweise nur für Produktionsserien geringer Stückzahl eignet [Bai22] [Zen05].

Der allgemeine Aufbau des VARI-Verfahrens zur Herstellung eines Sandwichverbundes ist in Abbildung 10 dargestellt. Beim VARI-Verfahren liegt das Werkzeug nur einseitig vor, während eine flexible Vakuumfolie als obere Werkzeughälfte dient. Die Vakuumfolie wird mit einem Dichtband luftdicht mit der Form versiegelt. Zwischen Form und Folie befinden sich der Lagenaufbau der trockenen Fasern oder im Fall eines Sandwichverbundes die Fasern und der Kern. Der Aufbau benötigt zusätzlich einen Anguss und einen Abfluss für das Harzsystem sowie eine Verbindung mit der Vakuumpumpe, die über den Abfluss hergestellt wird. Durch das Anlegen des Vakuums wird ein Unterdruck (< 1 bar) erzeugt, der Aufbau evakuiert und das Material kompaktiert. Nach Öffnen des Harzangusses beginnt die Imprägnierung der Fasern durch das flüssige Harzsystem, welches durch die Druckdifferenz zum Atmosphärendruck gezwungen wird, das Verstärkungsmaterial zu durchfließen [Bai22] [Cha03].

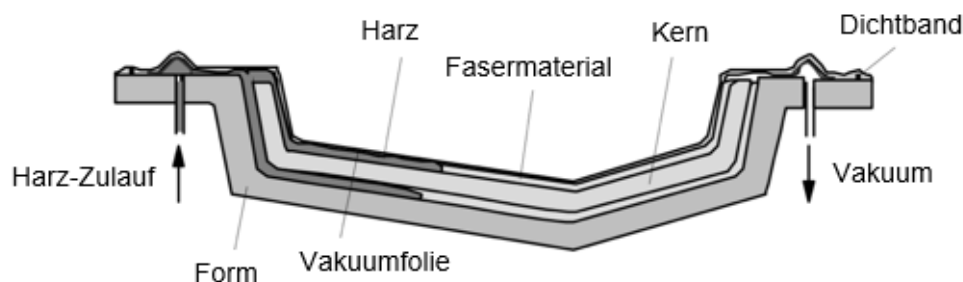


Abbildung 10: Schema des VARI-Verfahrens zur Herstellung eines Sandwichverbundes [Zen05]

Für die Infusion muss das Harzsystem durch das Fasertextil (beispielsweise Gewebe oder Gelege) hindurchströmen, sodass die Permeabilität des Textils von entscheidender Bedeutung ist. Im Allgemeinen weisen Verstärkungsfasern selber, abgesehen von pflanzlichen Naturfasern, keine Permeabilität für das Harzsystem auf. Die Verteilung des Harzes wird deshalb durch Verwendung einer Fließhilfe erreicht. Dafür wird in dem vakuumdichten Aufbau oberhalb des Fasermaterials ein Abreißgewebe, gefolgt von der Fließhilfe, platziert. Das Abreißgewebe dient lediglich dem Entfernen der Fließhilfe nach Fertigstellung des Formteils. Die Fließhilfe besitzt eine hohe Permeabilität für das Harzsystem, sodass das Fasermaterial zeitgleich in und senkrecht zur Infusionsrichtung imprägniert wird (vgl. Abbildung 11). Die Fließfront hat die Form eines Keils, dessen Winkel hauptsächlich von der Permeabilität des Fasermaterials abhängt [Cha03].

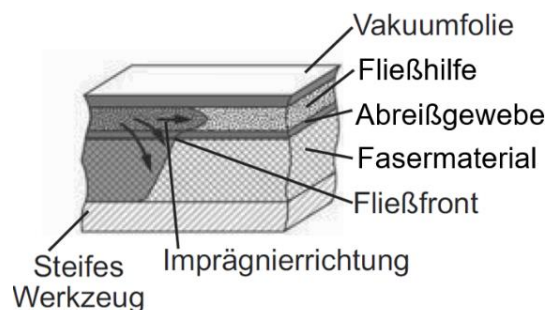


Abbildung 11: Darstellung der Fließfront während der Infusion im VARI-Verfahren [modifiziert nach Che11]

Die Druckdifferenz zum Atmosphärendruck ist an der Fließfront am höchsten. Dies ist in Abbildung 12 veranschaulicht. Damit ergibt sich ein orts- und zeitabhängiger Kompaktierungsdruck, der wiederum die Permeabilität des Materials beeinflusst. Die flexible obere Werkzeughälfte begünstigt zudem das Aufschwämmen der Matrix oberhalb des Fasermaterials durch die verringerte Druckdifferenz am Anguss. Der ausgehärtete Verbund besitzt eine Dickenvarianz über die Fließweglänge und damit einen ortsabhängigen FVG [Cor05] [Klu08].

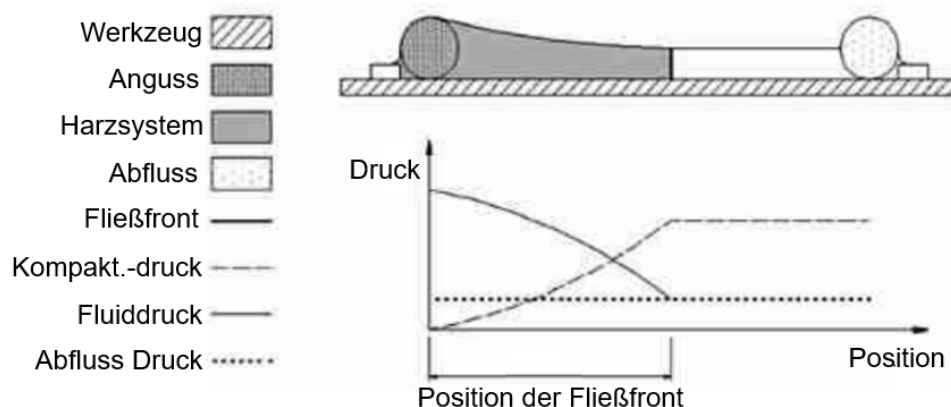


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Druckverteilung im VARI-Verfahren [modifiziert nach Cor05]

3.8 Kompaktierung von Textilien

Kompaktierung beschreibt das Zusammenpressen von Materialien durch Aufbringung einer Kraft bzw. eines Druckes. Bei Faserverbunden wird durch die Kompaktierung der Verstärkungskomponente eine Erhöhung des Faservolumengehalts angestrebt, sodass der Prozess in der Regel ein Teil der Herstellungsverfahren ist. Abhängig vom Herstellungsverfahren unterscheiden sich die Kompaktierungsdrücke, die Permeabilitäten der Textilien und die resultierenden FVG [Ara16] [Dic15].

In Abbildung 13 ist der Kompaktierungsprozess schematisch dargestellt und die materialabhängigen Kompaktierungskurven sind beispielhaft veranschaulicht.

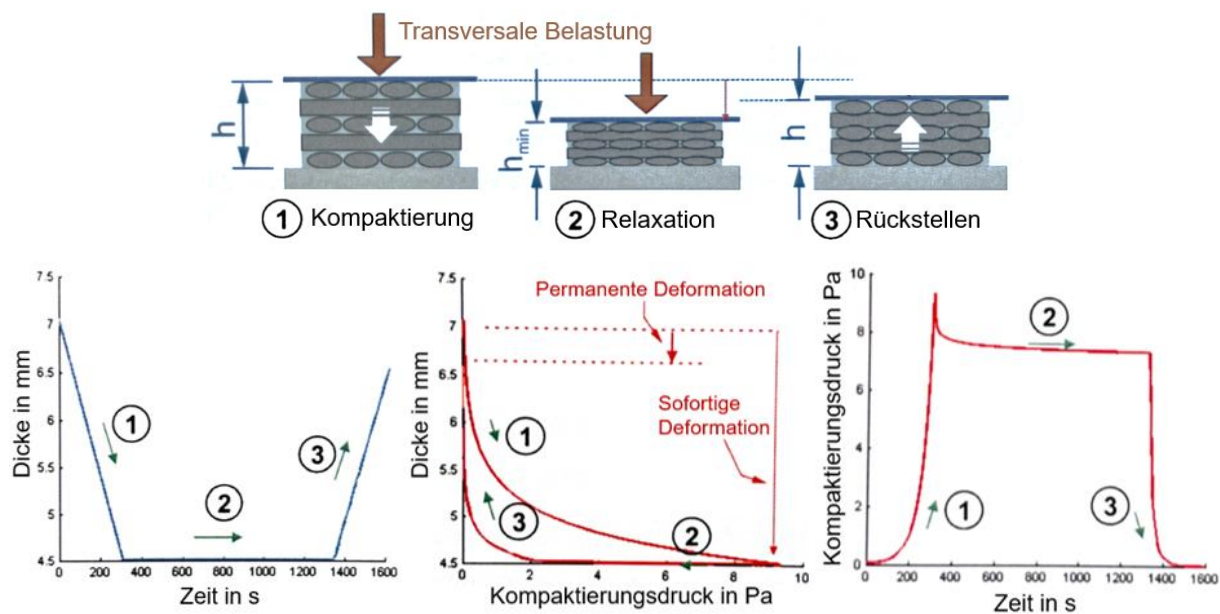


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Kompaktierungsprozesses (oben) und die zugehörigen Kurvenverläufe (unten) [modifiziert nach Ara16]

Bei der Kompaktierung wird das Textil transversal belastet und deformiert. Mit steigender Aufbringung des transversalen Druckes nimmt die Dicke des Lagenaufbaus durch Verringerung des Werkzeugabstandes ab und der FVG des Fasermaterials zu. Die aufgebrachte Deformation setzt sich dabei aus elastischen, viskosen und plastischen Deformationen zusammen. Je nach Textil und Parametern ändern sich deren Anteile an der Gesamtdeformation [Ara16].

Bei Erreichen der angestrebten Belastung wird der gegenwärtige Werkzeugabstand für eine festgelegte Dauer konstant gehalten und es kommt zu einer Relaxation des Materials. Das bedeutet, dass eine zeitabhängige Reorganisation stattfindet, da das Material einen Zustand geringerer Energie einnimmt und somit ein Teil der aufgebrachten Kraft abbaut. Dabei ist die Kraftabnahme zu Beginn der stationären Phase am höchsten und läuft mit steigender Zeit in ein Plateau [Ara16].

Nach der Entlastung kommt es zum Rückstelleffekt und die Höhe des Materials nimmt wieder zu. Allerdings bildet sich nur der elastische Anteil der Deformation zurück. Die viskosen und plastischen Anteile sorgen durch eine permanente Deformation für einen Unterschied zur Ursprungsdicke bzw. zum ursprünglichen Faservolumengehalt. Das Rückstellverhalten ist während bzw. direkt nach der Entlastung am höchsten [Ara16].

Der Einfluss der Kompaktierung auf das Textil sowie die auftretenden Mechanismen sind stark von den Materialeigenschaften und den Kompaktierungsparametern abhängig. Bei dem Textil müssen dabei die Mehrskaleneigenschaften berücksichtigt werden, da auf den verschiedenen Betrachtungsebenen unterschiedliche Vorgänge stattfinden [Ara16] [Sha15].

In Abbildung 14 sind einige der möglichen Mechanismen auf den drei Größenskalen dargestellt. Die Mechanismen sind beschrieben und aufgelistet, in welchen Flächengebilden bzw. Faserarten sie auftreten [Sha15].

	Mechanismus	
Faser	Kollaps von Zellwand/Lumen (Faserquerschnitt-Deformation)	
	Garnquerschnitt-Deformation	
Garn (Roving)	Verdichtung der Hohlräume (zw. d. Fasern)	
	Garnabflachung	
	Biegeverformung von Faser/Garn	
Textil	„Nesting“ und Erhöhung der Packungsdichte	

Abbildung 14: Mechanismen der Kompaktierung eines Textils in den Größenskalen [modifiziert nach Sha15]

Der erste in Abbildung 14 aufgeführte Mechanismus, das Kollabieren der Zellwand bzw. des Lumens, tritt nur bei Naturfasern auf. Je nach Naturfaserart besitzen diese ein Lumen, das

verschiedene Größen einnehmen und unterschiedlich zum Kompaktierungsprozess beitragen kann [Sha15].

Für Garne/Rovings gibt es mehrere Mechanismen, die auftreten können. Ein immer auftretender Effekt ist die Änderung des Querschnittes durch die aufgebrachte Belastung. Die Deformation kann ebenfalls dazu führen, dass Hohlräume zwischen den Fasern des Garnes/Rovings geschlossen werden und die Packungsdichte im Querschnitt höher wird. Wellen oder Verwebungen von Garnen/Rovings werden geglättet oder durch den Druck in eine gebogene Form gezwungen. Dies geschieht, da auf der Makroebene des textilen Flächengebildes eine Verringerung der Packungsdichte stattfindet. Das freie Volumen, das den Halbzeugen im Lagenaufbau ursprünglich zur Verfügung stand, wird durch die Kompaktierung verkleinert [Sha15].

Zwischen den Lagen kommt es zu sogenannten „Nesting“-Effekten. Diese sorgen dafür, dass die einzelnen Lagen nicht mehr eindeutig voneinander getrennt werden können. Inwiefern diese Mechanismen stattfinden, hängt von den Freiheitsgraden von Faser, Garn/Roving und Textil sowie dem während der Deformation zur Verfügung stehenden Volumen zur Umlagerung ab. Begünstigt wird eine Umlagerung durch niedrigere Reibung zwischen den Komponenten, wenn beispielsweise Gleitmittel aufgebracht oder andere Oberflächenveränderungen vorgenommen wurden [Sha15].

Weitere Einflussfaktoren auf die Mechanismen auf Faserebene sind die Art, die Oberflächenbeschaffenheit bzw. -rauheit und die Querschnittsform der Faser. Hinzu kommen auf der Größenskala vom Garn/Roving der Querschnitt, die Fadendichte und der Verdrillungsgrad sowie für die Textilebene die Art des Flächengebildes, die Faserausrichtung und der Lagenaufbau. Zum letzteren zählen Anzahl, Reihenfolge und Ausrichtung bzw. Orientierung der Lagen zueinander. Einige der Faktoren sind dabei ausschlaggebend ob ein Mechanismus aus Abbildung 14 überhaupt stattfinden kann [Ara16] [Sha15]

Eine geringere Steifigkeit ermöglicht beispielsweise besseres „Nesting“ und damit die Einnahme einer höheren Packungsdichte, da der Widerstand gegen die Verformung niedriger ist. Naturfasern können eine Garnhaarigkeit aufweisen, die für eine höhere ursprüngliche Dicke des Aufbaus und eine größere Oberflächenrauheit sorgt. Abstehende Fasern sind fehlorientiert und behindern das Einnehmen eines hohen Packungsgrads. Die Unterschiede zwischen Garnen und Rovings im Querschnitt und Verdrillungsgrad sorgen dafür, dass Rovings kompaktierbarer sind. Da sie nicht verdrillt sind, besitzen Rovings höhere Freiheitsgrade und können miteinander verschmelzen, sodass einzelne Rovings kaum unterschieden werden können. Besonders bei unidirektionalen Flächengebilden kann dieser Effekt beobachtet werden [Sha15].

Grundsätzlich können hohe Packungsdichten zwischen Lagenabfolgen mit gleicher Faser- bzw. Garn/Roving-Orientierung erreicht werden, da ein „Nesting“ begünstigt wird. Bei

Gewebe sind an den Webpunkten Hohlräume, die durch die Kreuzung nicht vollständig geschlossen werden können, sodass höhere Lagenanzahlen die Kompaktierung verschlechtern [Pan20, Sha15].

Generell kommt es während der Kompaktierung zu einem Zusammenspiel der Mechanismen aufgrund der Eigenschaften von Faser, Garn/Roving und Textil. Des Weiteren sind die Kompaktierungsparameter entscheidend. Dazu zählen Temperatur, Dauer, Druck sowie Be- und Entlastungsgeschwindigkeit [Ara16] [Sha15].

Höhere Kompaktierungsgeschwindigkeiten sorgen für eine geringere Relaxation. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten kommt es hingegen schon während der Kompaktierung zur Relaxation des Materials, sodass niedrigere Drücke notwendig sind, um die gleichen FVG zu erhalten wie bei hohen Geschwindigkeiten. Da die auftretenden Mechanismen eine Materialabhängigkeit aufweisen, sind auch die Einflüsse der Kompaktierungsparameter je nach Materialeigenschaften und stattfindenden Kompaktierungsvorgängen unterschiedlich [Ara16] [Sha15].

Als letzte wichtige Komponente ist der Aufbau der Kompaktierung zu nennen. Im Regelfall wird bei der Kompaktierung von einer transversalen Belastung ausgegangen. Weicht der Kompaktierungswinkel von 90° ab, treten weitere Effekte auf. Zudem erfahren die beiden äußeren Lagen an der Werkzeugseite eine stärkere Kompaktierung, sofern das Werkzeug eine höhere Steifigkeit als das zu kompaktierende Material aufweist (vgl. Abbildung 15). Es wird von Wandeffekten gesprochen, die bei Aufbauten mit weniger Lagen einen höheren Einfluss haben. Beim VARI-Verfahren ist dies beispielsweise nur auf der Werkzeugseite der Fall, da die Vakuumfolie sich an die Form des Textils anpasst [Ara16].

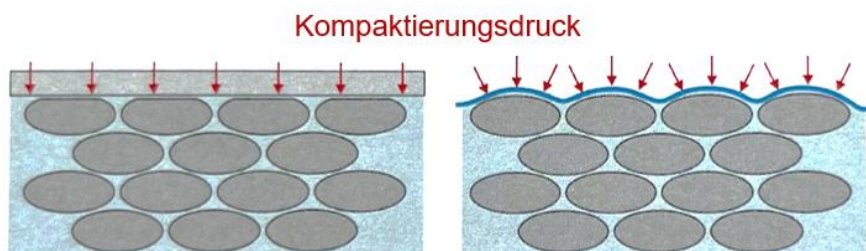


Abbildung 15: Wandeffekte der Kompaktierung auf das Textil bei einem Werkzeug höherer Steifigkeit (links) und niedriger Steifigkeit (rechts) [modifiziert nach Ara16]

Die Durchführung einer zyklischen Kompaktierung, bei der nach dem ersten Zyklus eine geänderte Belastungshistorie des Materials vorliegt, oder einer Nasskompaktierung beeinflusst die auftretenden Vorgänge ebenfalls maßgeblich. Auf beide wird nicht weiter eingegangen, da sie in dieser Arbeit keine Anwendung finden.

3.9 Permeabilitätsmessung

Die Permeabilität beschreibt die Durchlässigkeit eines Mediums für ein Fluid. Eine höhere Permeabilität bedeutet eine höhere Durchlässigkeit und ein schneller fließendes Fluid. Im Bereich der Faserverbunde wird mit der Permeabilität auch die Tränkbarkeit des Textils beschrieben. Für alle LCM-Verfahren stellt sie einen Materialkennwert da, der den Herstellungsprozess, vor allem die Prozesszeiten, maßgeblich beeinflusst. Entsprechend bedeutend ist die Kenngröße für Bauteildesign, Prozesssteuerung und Wirtschaftlichkeit des Prozesses [Dic15] [Nei14].

Der Ursprung der Permeabilitätsmessung liegt im Darcy-Gesetz. Dieses Gesetz wurde im Jahr 1856 von Henry Philibert Gaspard Darcy veröffentlicht. Der französische Bauingenieur erforschte über laminare Strömungen den Fluss einer Newtonschen Flüssigkeit (Wasser) durch ein poröses Medium (Sand). Durch empirische Messungen erkannte Darcy eine Proportionalität zwischen dem durch eine Fläche A hindurchströmenden Volumenstrom $\dot{V}$ und dem Höhenunterschied h bzw. der reziproken Fließlänge l . Er formulierte das Darcy-Gesetz (vgl. Gleichung 3.2) und als Proportionalitätsfaktor führte Darcy den Durchlässigkeitsbeiwert k_f ein [Dic15] [Höl13]

Heutzutage ist bekannt, dass es sich beim Darcy-Gesetz um eine spezielle Lösung der Navier-Stokes-Gleichung aus der Strömungsmechanik handelt. In Abbildung 16 sind die Parameter des Darcy-Gesetzes bildlich dargestellt [Dic15] [Höl13].

$$\dot{V} = k_f \cdot A \cdot \frac{h}{l} \quad (3.2)$$

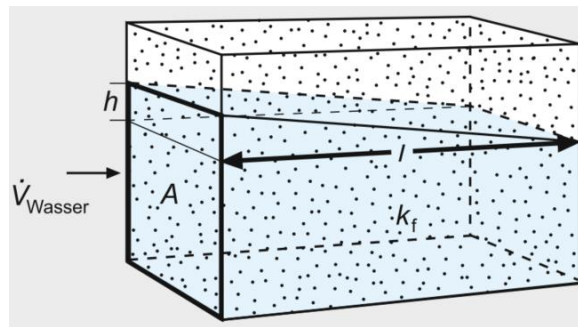


Abbildung 16: Darstellung der Parameter des Darcy-Gesetzes [Höl13]

Dabei muss bedacht werden, dass das poröse Medium und damit auch seine Querschnittsfläche A aus Feststoff- und Hohlraumanteilen bestehen. Das Medium selbst kann nicht durchtränkt werden und nimmt bereits ein für das Messfluid impermeables Volumen ein. Somit muss für eine Fließgeschwindigkeitsbestimmung das durchflusswirksame Volumen mit in die Berechnung einbezogen werden [Dic15] [Höl13].

Obwohl der Durchlässigkeitsbeiwert k_f die Einheit m/s besitzt, handelt es sich nicht um eine Geschwindigkeit. Er gibt den hindurchfließenden Strom einer Flüssigkeit durch eine

bestimmte, senkrecht zur Fließrichtung ausgerichteten Querschnittsfläche pro Zeiteinheit wieder. Abhängig ist er von der Permeabilität des porösen Mediums K , der dynamischen Viskosität des Fluids η sowie der Fluidichte ρ und der Erdbeschleunigung g [Dic15] [Höl13]. Dies gibt Gleichung 3.3 wieder.

$$k_f = K \cdot \frac{\rho}{\eta} \cdot g \quad (3.3)$$

Der im Darcy-Gesetz auftauchende Quotient aus Höhenunterschied und der Fließlänge wird als hydraulischer Gradient bezeichnet. Der Höhenunterschied h selbst ist abhängig vom Fluidruckunterschied zwischen dem Ein- und Auslass Δp , der Fluidichte ρ und der örtlichen Erdbeschleunigung g (siehe Gleichung 3.4) [Dic15] [Höl13].

$$h = \frac{\Delta p}{g \cdot \rho} \quad (3.4)$$

Durch Einsetzen der Gleichung 3.3 und 3.4 in das Darcy-Gesetz (Gleichung 3.2) entsteht die folgende Gleichung 3.5 für die Permeabilität [Dic15] [Höl13].

$$K = \eta \cdot \frac{\dot{V}}{A} \cdot \frac{l}{\Delta p} \quad (3.5)$$

Die Bestimmung der Permeabilität von textilen Halbzeugen erfolgt ausgehend von dieser Gleichung. Dabei wird diese auf die Messmethode und den Messstand angepasst.

Es gilt generell zu beachten, dass die experimentelle Bestimmung der Permeabilität keinem genormten Messverfahren unterliegt, sodass die ermittelten Werte von der Messmethode abhängig sind. Permeabilitätsmessungen sind relativ aufwändig und erfordern zudem einen hohen Anteil an händischen Arbeiten in der Vorbereitungsphase [Ken21] [Dic15].

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Messstand wird die ungesättigte Ebenpermeabilität von Textilien gemessen. Ebenpermeabilität bedeutet, dass es einen planaren Fließaufbau gibt und somit der Winkel zwischen Fluidein- und Fluidauslass null beträgt. Eine ungesättigte Permeabilitätsmessung erfolgt über die Ermittlung der Fließgeschwindigkeit eines Messfluids, das mit konstantem Druck in ein trockenes Textil injiziert wird. Die Fließgeschwindigkeit kann über einem Durchflussmesser am Ein- oder Auslass gemessen oder über die Fließfrontausbreitung bestimmt werden. Die Messung der Fließfrontausbreitung erfolgt entweder manuell, durch eine Videokamera oder durch Drucksensoren. In dieser Arbeit wird die Permeabilität experimentell durch Aufnahme der Fließfrontposition in festgelegten Zeitabständen mit einer Videokamera ermittelt [Dic15] [Pan20] [Rie11].

Für die gesättigte Permeabilitätsmessung wird der Druckabfall bei einem konstanten Volumenstrom durch ein vollständig mit dem Messfluid durchtränktes Textil bestimmt [Rie11].

Im ungesättigten Fall auftretende Kapillardrücke können Unterschiede zwischen der gesättigten und ungesättigten Permeabilität erzeugen [Rie11].

Der Kapillareffekt sorgt für einen sogenannten „Dual-Scale Flow“. Das bedeutet, dass es aufgrund der Mehrskaleneigenschaft von Textilien zum Mehrskalenfließen kommt. Zum einen gibt es das Inter-Garn bzw. Makrofließen, das zwischen den einzelnen Garnen stattfindet, wenn das viskose Fließen bedingt durch den angelegten Injektionsdruck dominiert. Bei hohen Druckgradienten zwischen Injektions- und Umgebungsdruck schreitet das Fluid in den Makrokanälen schneller voran, weil der Fließwiderstand dort geringer ist. Innerhalb der Garne, in den Mikrokanälen, kann es dabei zu trockenen Stellen kommen, die Mikroporen darstellen. Dies ist in Abbildung 17 oben veranschaulicht [Dic15] [Pan20].

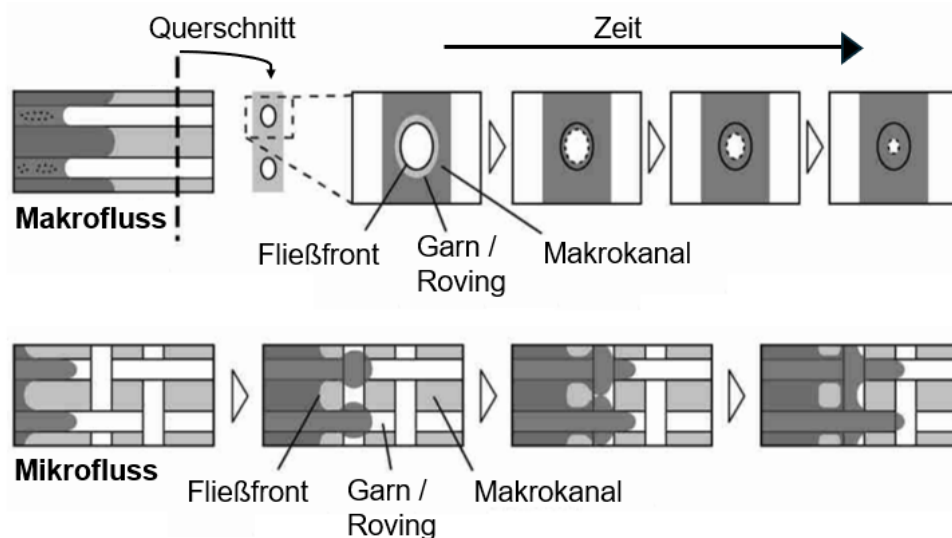


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Makro- (oben) und Mikroflusses (unten) sowie die Bildung von Lufteinschlüssen über die Zeit [modifiziert nach Dic15]

Zum anderen kommt es beim Mehrskalenfließen durch den Kapillardruck zum Intra-Garn bzw. Mikrofließen durch die Garne, das in Abbildung 17 unten zu sehen ist. Die treibende Kraft ist dabei der Kapillardruck, der durch die Oberflächenspannung des Fluids und den geringen Fadenabständen auftritt. Bei größeren Abständen vom Anguss nimmt der Injektionsdruck ab und das Mikrofließen dominiert die Fließgeschwindigkeit. Der Kapillardruck in Makrokanälen ist durch den höheren Abstand der Garne bzw. Filamente deutlich geringer, sodass diese langsamer gefüllt werden und durch kreuzende Garnstrukturen makroskopische Lufteinschlüsse entstehen können (vgl. Abbildung 17). Im optimalen Fall ist die Fließgeschwindigkeit des Mikro- und des Makrofließens identisch, sodass die Porenbildung reduziert wird. Dabei muss der Injektionsdruck stetig angepasst werden, um den Druckabfall bei steigender Entfernung von Einlass auszugleichen. Dies erfordert aufwändige Regelungstechnik und Sensoren. Deshalb wird der Injektionsdruck einer ungesättigten Permeabilitätsmessung meist so gewählt, dass er deutlich über dem Kapillardruck liegt und dessen Einfluss vergleichsweise klein wird. Bei hohen Faservolumengehalten der Textilien

nähern sich die benachbarten Garne soweit an, dass der Kapillareffekt innerhalb (intra) und zwischen (inter) den Garnen das Fließen dominiert und es im Wesentlichen nur zum Mikrofließen kommt [Dic15] [Pan20] [Rie11].

Der Einfluss des Kapillardrucks auf die Permeabilität bei einer ungesättigten Messung hängt demnach von verschiedenen Faktoren, wie dem Injektionsdruck, dem Messfluid und dem Faservolumengehalt des Textils, ab. Hinzu kommen die Textil bedingten Eigenschaften wie Garndurchmesser, Verdrillungsgrad, Faserart und -orientierung [Pan20] [Rie11].

Eine Permeabilitätsmessung kann eindimensional (1D), zweidimensional (2D) oder dreidimensional (3D) durchgeführt werden, wobei 3D-Messungen aufgrund der Komplexität sehr aufwändig sind. Bei einer 1D-Messung erfolgt der Messfluideinlass durch einen Linienanguss über eine Seite des Textils. Während der Messung ist dabei eine gerade Fließfrontausbreitung erforderlich. Fließt das Fluid an einer Stelle schneller wird von einem „Race Tracking“ gesprochen und die Messung ist invalide. Bei anisotropen Materialien werden in der Regel 2D-Messungen durchgeführt, sodass in einer Messung die Permeabilitäten in beide Raumrichtungen bestimmt werden können. Die Injektion des Messfluids erfolgt in der Mitte durch einen Lochanguss. Dafür muss ein Loch mit gleichem Durchmesser wie der Anguss vor der Messung in die Textilien eingebracht werden. Bei der Messung kommt es zu einer richtungsabhängigen Ausbreitung der Fließfront in Form einer Ellipse. Die Permeabilitäten werden entlang der beiden Hauptrichtungen der Ellipse bestimmt [Pan20] [Rie11].

Als Messfluid wird meist ein Öl oder eine Glycerin-Lösung verwendet. Diese müssen über die Messdauer konstante Eigenschaften aufweisen und sollen die Matrix, welche für den Faserverbund gewählt wird, repräsentieren. Darum sollte die Oberflächenspannung, das Benetzungsverhalten und die Viskosität des Messfluids ähnlich der Matrix sein, da diese das Mehrskalenfließverhalten des Textils beeinflusst. Abweichend von der Matrix ist wiederum die Viskosität des Fluids über die Zeit konstant. Um den Arbeitsaufwand zu minimieren, sollte das Messfluid nicht angemischt werden müssen und die Arbeitssicherheit einfach zu gewährleisten sein [Dic15] [Pan20] [Rie11].

3.10 Thermogravimetrische-Analyse

Bei der thermogravimetrischen Analyse (TGA) wird die Masse oder die Massenänderung einer Probe über die Zeit und/oder Temperatur gemessen. Massenänderungen können je nach Probe und Messumgebung unter anderem durch chemische Reaktionen, Verdampfung oder Zersetzungen hervorgerufen werden [Ehr04].

Bei der TGA wird die Probe in einen Tiegel gelegt. Dieser ist mit einem Balken verbunden, der wiederum mittels eines elektromagnetischen oder elektromechanischen Krafrückführungs-

systems konstant in Nulllage gehalten wird. Bei einer Massenänderung ergibt sich ein Kompensationssignal zur Stabilisation des Balkens. Dieses gibt Aufschluss über die Kraft, die notwendig ist, den Balken in der Horizontalen zu halten, worüber wiederum die Masse der Probe bestimmt werden kann. In Abbildung 18 ist der Aufbau einer TGA schematisch dargestellt. Neben diesem horizontalen Aufbau gibt es auch vertikale Messsysteme [Ehr04].

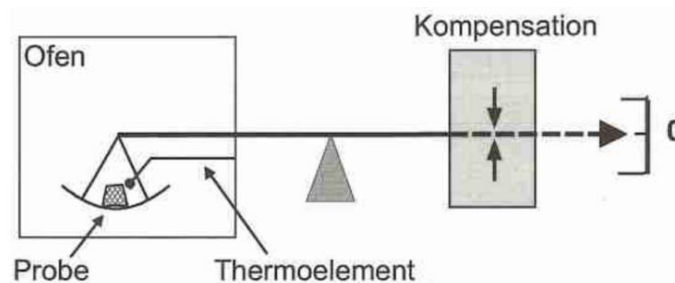


Abbildung 18: Schematischer Aufbau einer horizontalen TGA-Messeinheit [Ehr04]

Die Massenänderung wird entweder absolut in Milligramm oder prozentual als Funktion der Zeit und/oder Temperatur aufgenommen. Der Massenverlust kann dabei mehrere Stufen besitzen. Das Anfangsgewicht der Probe sollte zwischen 10 mg und 100 mg liegen und die Aufheizrate zwischen 0,5 °C/min und 20 °C/min [Ehr04].

Mit der TGA können Rückschlüsse auf z.B. Feuchtigkeitsaustritt, thermische Zersetzung und Veraschung gezogen werden. Im Bereich der Stoffanalyse wird die TGA meist mit anderen Messsystem wie der Dynamischen Differenzkalorimetrie oder Differenz-Thermoanalyse kombiniert [Ehr04].

Die TGA wurde mit dem Gerät TGA Q5000 V3.17 Build 265 der Firma TA INSTRUMENTS durchgeführt. Die Ausgangsgewichte der Proben wurden gemessen und im Messprogramm eingetragen.

4 Material

In diesem Kapitel werden die Materialien beschrieben, die in den folgenden Teilen der Arbeit untersucht bzw. zu Faserverbunden verarbeitet und daraufhin analysiert werden. Dabei handelt es sich zum einen um die zwei verwendeten Textilien aus Celluloseregeneratfasern und zum anderen um die verwendete Matrix, einem Epoxidharz mit Aminhärter. Weitere verwendete Materialien werden direkt in den Kapiteln beschrieben, wenn sie zur Verwendung kommen.

Bei den verwendeten Celluloseregenerat-Textilien handelt es sich um zwei Gewebe der Firma CORDENKA GMBH & CO. KG. Diese sind in Abbildung 19 zu erkennen.

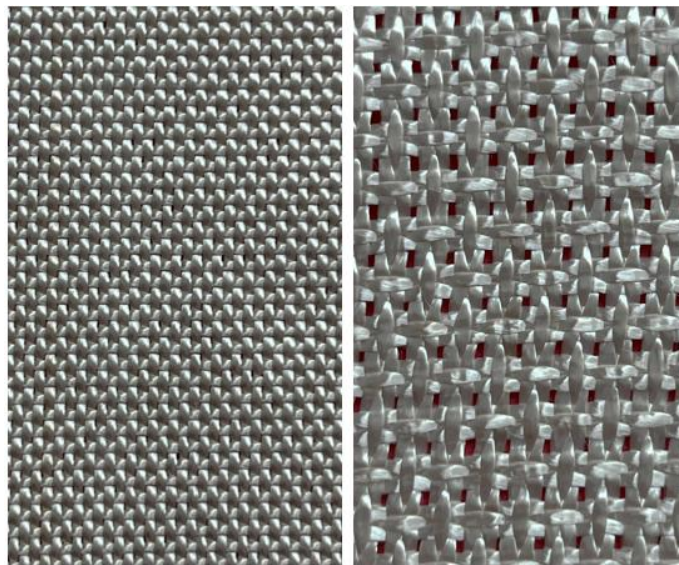


Abbildung 19: Aufnahme des Leinwandgewebes (links) und des Köpergewebes mit Poren (rechts) auf einem roten Hintergrund

Es wird ein Leinwandgewebe mit einem Flächengewicht von 423 g/m^2 und ein Köpergewebe mit Poren eines Flächengewichtes von 452 g/m^2 benutzt. Bei den Fasern handelt es sich um hochfeste Viskosefasern des Typs Cordenka® 700 Super 3 [BÜF23] [Cor22]. Die Fasern haben eine Dichte von $1,5 \text{ g/cm}^3$ und einen Durchmesser von $12 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ [Cor21] [Erd17]. Die Textilien sind aus einem gedrellten Garn mit einem Titer von 2440 dtex aufgebaut. Zudem ist ein Gleitmittel auf den Fasern aufgetragen, sodass hohe Geschwindigkeiten beim Spinnen und Weben möglich sind. Dieses soll keine negativen Auswirkungen auf die Haftung mit Thermoplasten oder Duromeren, vor allem Epoxidharzen, aufweisen [Pun23]. Weitere Informationen über das Gleitmittel sind nicht vorhanden. Die Fadendichten der Gewebe sind in Schuss- und Kettrichtung unterschiedlich. Beim Leinwandgewebe beträgt diese in Schussrichtung 60 Fd/10 cm und in Kettrichtung 100 Fd/10 cm . Das Köpergewebe mit Poren hat eine Fadendichte von 80 Fd/10 cm in Schuss- und von 83 Fd/10 cm in Kettrichtung. [BÜF23].

Als Matrix des Faserverbundes dient ein Epoxidharzsystem der Firma HEXION™. Es wird das Harz EPIKOTE™ Resin MGS RIMR 035c und dem Härter EPIKOTE™ Curing Agent MGS RIMH 037 benutzt. Die beiden Komponenten werden in einem Massenverhältnis von 100 : 28 (Harz : Härter) vermengt.

5 Vorversuch

Im Vorversuch soll die grundsätzliche These an den Celluloseregenerat-Geweben getestet werden. Das Ziel ist es, eine Veränderung der Eigenschaften der Textilien nach einem Vorkompaktierungsschritt zu erhalten.

In anderen Arbeiten wurde an Flachsfasertextilien bereits bewiesen, dass sich die Kompaktierung, neben dem FVG fertiggestellter Faserverbunde, ebenfalls auf die Permeabilität der Naturfasern auswirkt. Diese Änderungen werden durch die Verringerung des freien Volumens bei der Kompaktierung hervorgerufen [Hei23] [Ken21]. Das VARI-Verfahren, als Herstellungsprozess für Faserverbunde, wird gewählt, um über den Infusionsfortschritt in Abhängigkeit der Infusionsdauer eine erste Aussage über die Kompaktierung treffen zu können. Eine erfolgreiche Vorkompaktierung sollte die Permeabilität des textilen Halbzeuges stark beeinflussen. Dafür wird das unkompaktierte mit dem kompaktierten Gewebematerial in den direkten Vergleich gebracht.

5.1 Methodik

Es werden jeweils drei Lagen vorgetrocknetes Gewebe für eine Konfiguration verwendet, die in Tabelle 1 dargestellt sind. Die Vortrocknung erfolgt bei 60°C für mindestens 12 h.

Tabelle 1: Verwendete Konfigurationen des Vorversuches

Konfiguration	Gewebetyp	Vorkompaktierungsparameter			
		Druck in bar	Temperatur in °C	Dauer in min	Geschwindigkeit in mm/s
LW_Ref	Leinwand				
LW_38		38	120	15	0,04 (Belastung) und 0,05 (Entlastung)
KmP_Ref	Körper mit Poren				
KmP_38		38	120	15	0,04 (Belastung) und 0,05 (Entlastung)

Der Kompaktierungsprozess und die Kompaktierungsparameter werden an die Vorgehensweise und Ergebnisse von [Ken21] angelehnt. Als Kompaktierungstemperatur werden 120 °C, als -druck 38 bar und als -dauer 15 min verwendet. Die Druckanzeige der Thermopresse zeigt die Drücke bezogen auf ihren Presszylinder mit dem Durchmesser von 20 cm an, sodass eine Umrechnung des Drucks bezogen auf die Fläche des Materials, erfolgt. Bei den in dieser Arbeit angegebenen Kompaktierungsdrücken handelt sich um den tatsächlich aufgetragenen Druck auf das Material.

Die Kompaktierungsgeschwindigkeit wird durch die Be- und Entlastungsgeschwindigkeit der verwendeten Thermopresse KV 214 der Firma RUCKS MASCHINENBAU GMBH festgelegt. Die Angaben aus dem technischen Datenblatt liegen bei 0,7 mm/s als Press- und bei 30 mm/s als Öffnungsgeschwindigkeit. Entgegen dieser Werte wird eine Pressgeschwindigkeit von 0,04 mm/s und eine Entlastungsgeschwindigkeit von 0,05 mm/s ermittelt. Dafür wird die Dauer des Druckaufbaus auf Aluminiumbleche gleicher Dicke mit unterschiedlichen Flächen gestoppt und der Abstand der Presseplatten vor und nach Aufbringung des Druckes mit Hilfe eines Messschiebers ermittelt. Bei den bestimmten Geschwindigkeiten handelt es sich somit um gemessene Werte, die mit Fehlern behaftet, aber trotzdem deutlich präziser als die Werte des Datenblattes sind.

Um den direkten Vergleich zu erzielen, werden der kompaktierte und unkompaktierte Lagenaufbau eines Gewebetyps in einem VARI-Aufbau infundiert. Somit sollen andere Einflussfaktoren auf den Infusionsfortschritt als die Permeabilität, wie kleine Fehlstellen im Aufbau oder Versuchsmaterialien, weitestgehend vereinheitlicht werden. Der typische VARI-Aufbau wird dafür angepasst, indem eine Trennwand aus Tacky-Tape die beiden Fließfronten voneinander trennt. Entsprechend der Vorgehensweise aus [Ken21] wird zur Kompaktierung der gesamte VARI-Aufbau (ausgenommen der Harzfalle und der Vakuumpumpe) in die Thermopresse gestellt. Ein Stempel wird auf die zu kompaktierenden Gewebelagen platziert und die Presse zur Kompaktierung zugefahren. Da der gesamte Aufbau einer Temperatur von 120 °C standhalten muss, werden einige Materialien des Aufbau durch hitzebeständigere Alternativen ersetzt. Abbildung 20 zeigt ein Bild des VARI-Aufbaus für die beiden Konfigurationen einer Gewebeart vor der Kompaktierung.



Abbildung 20: VARI-Aufbau für die Vorversuche am Beispiel des Leinwandgewebes

Nach der Vorkompaktierung in der Thermopresse erfolgt der Start der Infusion mit dem Epoxidharzsystem. Dieses wird vorher angemischt und für ungefähr 20 min in der Harzfalle entgast.

Während der Infusion werden die Fließfronten der beiden Konfigurationen einer Gewebeart miteinander verglichen. Dies geschieht durch Einzeichnen der Fließfronten in ausgewählten Zeitabständen.

Für beide Gewebetypen wird jeweils ein VARI-Aufbau mit den beiden Konfigurationen erstellt.

5.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Vorversuchs bestätigen die grundsätzliche These, auf der diese Arbeit aufbaut.

Der Vergleich des Fließfortschrittes zu ausgewählten Zeitabständen zeigt eine deutliche Abnahme bei den kompaktierten Gewebeaufbauten. Zudem können erste wichtige Informationen zur Vorgehensweise des Kompaktierungsprozesses mit anschließender Herstellung der Faserverbunde im VARI-Verfahren gesammelt werden.

Im Kompaktierungsschritt sorgt die Temperatur von 120 °C in der Presse für ein Kollabieren der Schläuche des VARI-Aufbaus. Dies geschieht sowohl bei Kompaktierung des bereits vakuumierten Aufbaus sowie bei Kompaktierung und anschließendem Vakuumieren.

Die kollabierten Schläuche sorgen dafür, dass die Ergebnisse lediglich qualitativ verwertbar sind. Trotzdem zeigt sich eine deutlich verlangsamte Fließfront in den kompaktierten Gewebelagen verglichen zum selben unkompaktierten Lagenaufbau. Dies ist in Abbildung 21 erkenntlich.



Abbildung 21: Vergleich der Fließfronten im VARI-Verfahren von unkompaktierten (links) und kompaktierten (rechts) Lagenaufbauten am Beispiel des Leinwandgewebes

Die langsamere Fließgeschwindigkeit der kompaktierten Konfigurationen lässt den Rückschluss auf eine verringerte Permeabilität der Textilien zu. Der deutliche Unterschied lässt zudem vermuten, dass für eine Herstellung größerer Faserverbundplatten im VARI-Verfahren eine Fließhilfe benötigt wird.

Die Messung der Dicken der ausgehärteten Faserverbundplatten bestätigt zudem die Erhöhung des FVG der kompaktierten Konfigurationen. Da nur ein qualitativer Vergleich der Werte der kompaktierten und unkompaktierten Konfigurationen des gleichen Gewebetyps möglich ist, werden diese nicht weiter dargestellt.

6 Teil I: Ermittlung der Kompaktierungsparameter

Nach der Bestätigung der allgemeinen These am Material des Celluloseregenerat-Gewebes im Vorversuch, sollen im ersten Teil die optimalen Kompaktierungsparameter für die jeweiligen Gewebetypen eines dreilagigen Aufbaus bestimmt werden. Optimal bedeutet, dass die mechanischen Eigenschaften des Faserverbundes durch den Vorkompaktierungsprozess des Gewebes weitmöglichst gesteigert werden.

Die durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Vorkompaktierungsparameter, und die Gründe für die Auswahl dieser, sind im folgenden Kapitel 6.1 dargelegt.

6.1 Methodik

6.1.1 Kompaktierungsgeschwindigkeit

Die Kompaktierungsgeschwindigkeit wird durch die verwendete Thermopresse KV 214 der Firma RUCKS MASCHINENBAU GMBH auf 0,04 mm/s als Be- und auf 0,05 mm/s als Entlastungsgeschwindigkeit festgelegt. Entsprechend der Beschreibung in Kapitel 5 werden diese Werte in einer Messreihe ermittelt und weichen von den Angaben des technischen Datenblattes ab. Weitere Ausführungen sind in Kapitel 6.3 nachzulesen.

6.1.2 Kompaktierungstemperatur

Zur Ermittlung der Kompaktierungstemperatur wird eine TGA-Messung durchgeführt. Dabei wird ein Temperaturbereich von 25 °C bis 600 °C untersucht. Die Messung erfolgt mit dem Gerät TGA Q500 und wird in Sauerstoffatmosphäre mit einer Aufheizrate von 10 °C/min ausgeführt. Die Celluloseregenerat-Gewebe werden vor der thermischen Analyse für mindestens 88 Stunden unter Normklima bei (23 ± 2) °C und (50 ± 10) % relativer Luftfeuchte gelagert. Die Auswertung erfolgt mit dem Programm *Universal Analysis 2000* der Firma TA INSTRUMENTS.

Die optimale Kompaktierungstemperatur liegt zwischen der vollständigen Abgabe der kompletten Feuchtigkeit aus dem Material sowie der Zersetzungstemperatur [Ken21].

6.1.3 Kompaktierungsdauer, Relaxations- und Rückstellverhalten

Um das allgemeine Verständnis über das Materialverhalten während sowie nach dem Vorkompaktierungsprozess zu erweitern, werden Kompaktierungsversuche durchgeführt. Dabei liegt der Fokus auf das Relaxations- und Rückstellverhalten des Materials im gewählten Lagenaufbau, mit denen sich eine geeignete Kompaktierungsdauer festlegen lässt. Aus Vergleichbarkeitsgründen zu Kompaktierungsuntersuchungen vorheriger Forschungsarbeiten

[Hei23] [Ken21] wird eine Kompaktierungsdauer von 15 min angestrebt. In der gewählten Kompaktierungsdauer sollte das Relaxationsverhalten nahezu vollendet sein und ein Plateau erreichen.

Für die Kompaktierungsversuche werden 80 mm x 80 mm große Zuschnitte von den Geweben angefertigt.

Der Versuch wird mit der Universalprüfmaschine der Firma ZWICKROELL GMBH & CO.KG des Types BZ1-MM 14450.ZW05 mit einer Kraftmessdose von 10 kN durchgeführt. Die Aufnahme der Messwerte sowie die Auswertung erfolgt mit Hilfe des Programmes *testXpert II*.

Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 22 zu sehen.

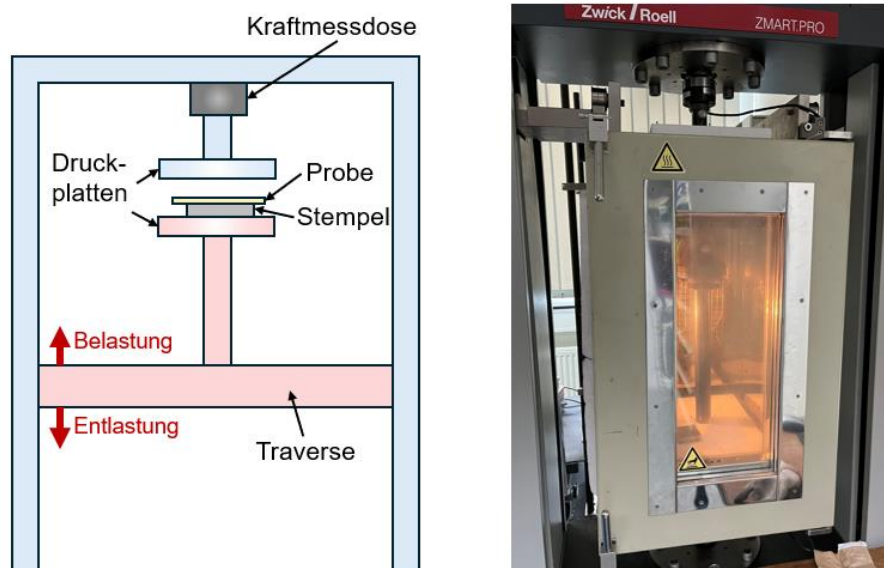


Abbildung 22: Aufbau der Kompaktierungsversuche (links: schematische Darstellung ohne den Ofen [eigene Darstellung nach Ara16]; rechts: Aufbau während der Messung)

In die Prüfmaschine werden zwei planare Flächen als Werkzeug eingebaut, wobei die untere Werkzeugseite durch die Verbindung zur Traverse beweglich ist. Die Kompaktierung geschieht durch Zufahren der Maschine, wobei die Kompaktierungsfläche durch einen 50 mm x 50 mm großen Stempel bestimmt wird (siehe Abbildung 22). Es werden jeweils drei Lagen eines Gewebetyps untersucht, die vor der Prüfung mindestens 24 h für 60 °C getrocknet werden. Um die Feuchtigkeitsaufnahme weitestgehend zu minimieren, werden die Fasern erst direkt vor der Prüfung aus dem Ofen genommen. Die Prüfung erfolgt innerhalb eines Ofens, sodass die Kompaktierungstemperatur von 120 °C ermöglicht wird. Vor Start des Versuches braucht der Ofen ungefähr 2 h zum vollständigen Aufheizen. Vollständig aufgeheizt bedeutet, dass auch die Metallteile des Prüfaufbaus homogen auf die gewünschte Temperatur gebracht sind. Aufgrund der Ausdehnung von Metallen bei Erwärmung ist dieses besonders wichtig.

Der Versuch besteht aus vier Phasen, wobei in jeweils einer Phase das Relaxations- bzw. Rückstellverhalten aufgenommen wird. Diese Phasen des Kompaktierungszyklus sind in Abbildung 23 skizziert.

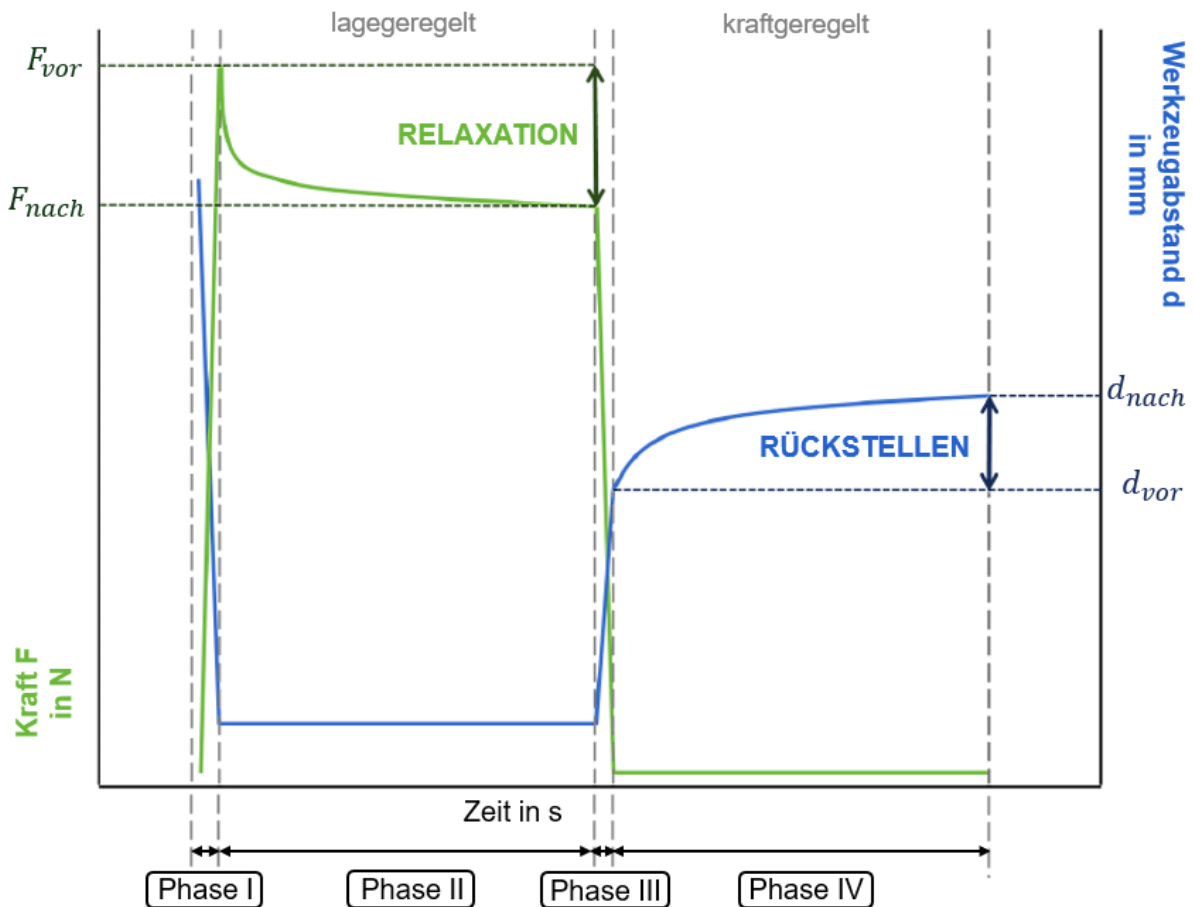


Abbildung 23: Veranschaulichung eines Kompaktierungszyklus [modifiziert nach Ken21]

In der ersten Phase wird eine festgelegte Kraft bzw. Druck mit einer konstanten Kompaktierungsgeschwindigkeit auf das Material aufgebracht, indem die Kompaktierungsflächen zusammenfahren. Nach Erreichen dieser Kraft beginnt Phase zwei. Die Traversenposition wird für die Kompaktierungsdauer nicht verändert und die Kraft, die auf den Textilaufbau wirkt, abgebaut und damit das Relaxationsverhalten gemessen. Es handelt sich um die lagegeregelt Phase. Nach der Kompaktierungsdauer beginnt die dritte Phase. Die Position der Kompaktierungsflächen zueinander wird zur Entlastung des Materials vergrößert bis lediglich 5 N auf das Material wirken. Es folgt die vierte Phase, die kraftgesteuert abläuft. Die Position der Traverse ändert sich entsprechend, dass die Kraft auf das Material konstant bei 5 N liegt und somit die Aufnahme des Rückstellverhaltens erfolgt. Eine Messung des Rückstellverhaltens bei vollständiger Entlastung ist nicht möglich, sodass eine minimale Kraft von 5 N ausgewählt wird.

Die weiteren, bei den Kompaktierungsversuchen verwendeten Parameter sind in Tabelle 2 aufgelistet. Es werden jeweils drei Wiederholungen eines Gewebetyps mit denselben Parametern durchgeführt.

Tabelle 2: Parameter der Kompaktierungsversuche

	Kraft in N	Druck in bar	Geschwindigkeit in mm/s	Dauer in min	Temperatur in °C
Belastung (Phase 1 und 2)	1000	4	1	15	120
	6000	24			
	9500	38			
Entlastung (Phase 3 und 4)	5	0,02		10	

Die Kompaktierungsgeschwindigkeit sowie die Belastungspunkte werden aus Vergleichbarkeitsgründen mit den Versuchen aus der Arbeit von [Ken21] gewählt. Die Kompaktierungstemperatur wird aufgrund der Ergebnisse der TGA-Messung festgelegt, die in Kapitel 6.2.1 beschrieben sind. Die Kompaktierungsdauer wird zunächst auf die angestrebten 15 min eingestellt und gegebenenfalls im Laufe der Versuche angepasst, falls die Relaxationswerte das Plateau innerhalb dieser Zeit nicht erreichen.

Die Auswertung der absoluten Werte der Relaxation erfolgt über Differenz der Kraft F_{vor} zu Beginn und der Kraft F_{nach} am Ende der zweiten Phase. Die relativen Relaxationswerte Rel_r werden nach Gleichung 6.1 berechnet.

$$Rel_r = \frac{F_{vor} - F_{nach}}{F_{vor}} \cdot 100 \quad (6.1)$$

Entsprechend erfolgt die Bestimmung des absoluten Rückstellverhalten über die Differenz des Werkzeugabstandes d_{vor} zu Beginn und d_{nach} am Ende der vierten Phase. Gleichung 6.2 gibt die Berechnung der relativen Rückstellwerte $Rück_r$ wider.

$$Rück_r = \left| \frac{d_{vor} - d_{nach}}{d_{vor}} \cdot 100 \right| \quad (6.2)$$

6.1.4 Kompaktierungsdruck

Zur Ermittlung des Kompaktierungsdrucks werden die Ergebnisse von [Ken21] an Flachsfasern herangezogen, die vor allem eine Auswirkung auf die Zugeigenschaften bei Änderung des Kompaktierungsdrucks zeigten. Darum wird der Zugversuch für diese Arbeit ausgewählt, um mit Hilfe der erreichten mechanischen Kennwerten, eine Aussage zum optimalen Kompaktierungsdruck treffen zu können. Dabei gilt es, die höchste Steigerung der

Zugeigenschaften durch den Kompaktierungsprozess zu erzielen. Bei der Korrelation zwischen Druck und mechanischen Kennwerten wird zunächst von einer Steigerung der Kennwerte bei erhöhtem Druck ausgegangen. Weiter wird angenommen, dass ein zu hoher Druck zu Schädigungen im Material führt und sich die mechanischen Kennwerte wieder verschlechtern. In Kapitel 7.1.2 wird dieser Zusammenhang nochmal genauer beschrieben und in Abbildung 36 schematisch dargestellt.

In Anlehnung an [Ken21] werden die Drücke von 28 bar, 38 bar und 48 bar ausgewählt. Der höchste untersuchte Druck von 38 bar zeigte bei [Ken21] die besten resultierenden mechanischen Eigenschaften. Da Celluloseregenerat im Vergleich zu Flachs ein anderes Verhalten aufweisen kann, werden zusätzlich Drücke über und unterhalb der 38 bar getestet. Ein Vergleich der Zugeigenschaften zwischen den kompaktierten Konfigurationen und der unkompaktierten Referenz sollen Auskunft über den optimalen Kompaktierungsdruck liefern.

6.1.4.1 Faserverbundherstellung im VARI-Verfahren

Im ersten Schritt erfolgt die Herstellung FKV-Platten mit einer Größe von 360 mm x 360 mm im VARI-Verfahren, aus denen später die Zugproben ausgesägt werden. Dabei wird pro Konfiguration eine FKV-Platte benötigt, die aus drei Gewebelagen aufgebaut ist. In Tabelle 3 sind die Konfigurationen aufgeführt.

Tabelle 3: Konfigurationen des Teil I zur Ermittlung des Kompaktierungsdrucks

Konfiguration	Gewebetyp	Vorkompaktierungsparameter			
		Druck in bar	Temperatur in °C	Dauer in min	Geschwindigkeit in mm/s
LW_Ref	Leinwand				
LW_28		28	120	15	0,04 (Belastung) und 0,05 (Entlastung)
LW_38		38			
LW_48		48			
KmP_Ref	Körper mit Poren				
KmP_28		28	120	15	0,04 (Belastung) und 0,05 (Entlastung)
KmP_38		38			
KmP_48		48			

Der Vorkompaktierungsschritt wird für die Konfigurationen, anders als beim Vorversuch, vom VARI-Verfahren losgelöst. Das bedeutet, dass der VARI-Aufbau nicht in die Thermopresse gelegt wird, sondern lediglich die Gewebe. Es bringt den Vorteil, dass der Aufbau nicht mehr bis 120 °C temperaturbeständig sein muss.

Die Prozessierbarkeit der Celluloseregenerat-Gewebe im VARI-Verfahren wird lediglich im Vorversuch im kleinen Maßstab getestet. Bei der Herstellung größerer Platten zeigen sich einige Hindernisse wie trockene Stellen im Fasermaterial, Lufteinschlüsse oder Aufschwemmen der Vakuumfolie, die sich in Fehlstellen äußern. Durch Variationen des Aufbaus und der Durchführung werden diese weitestgehend minimiert. In Abbildung 24 sind die einzelnen Schritte zur FKV-Herstellung mit dem Fokus auf die gewählte Vorgehensweise des VARI-Verfahrens dargestellt. Die angegebenen Zeitangaben über den Pfeilen beziehen sich auf die Dauer zwischen den Prozessschritten.

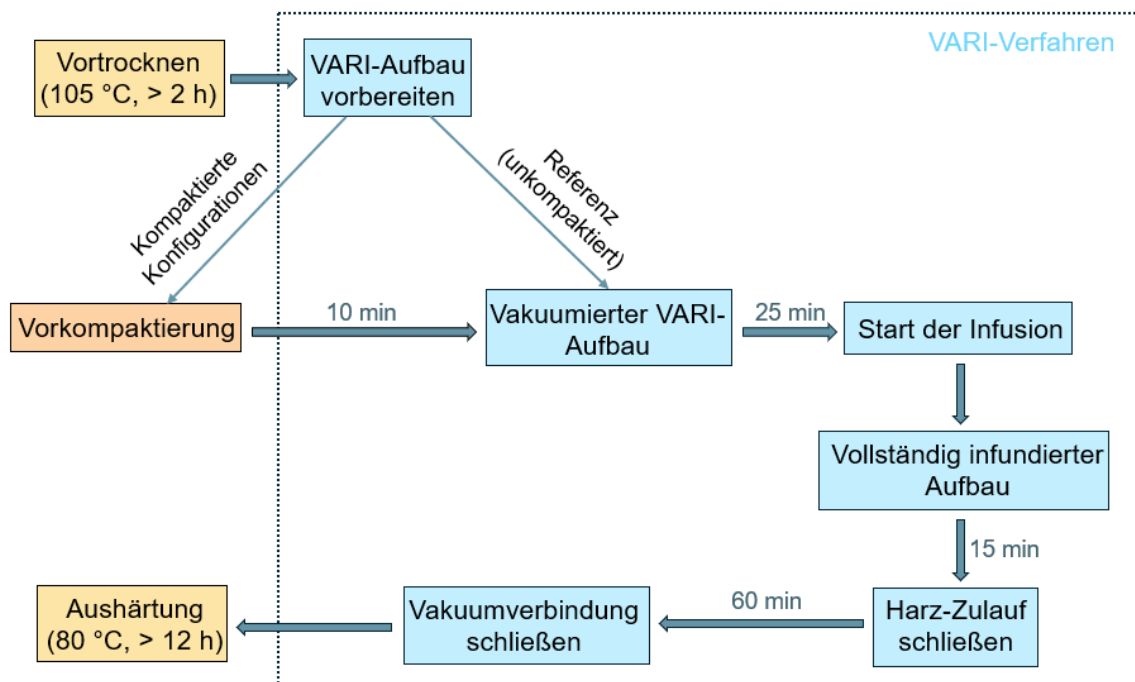


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Faserverbundherstellung im VARI-Verfahren

Die Vorkompaktierung erfolgt, wie bei den Vorversuchen, in der Thermopresse KV 214 der Firma RUCKS MASCHINENBAU GMBH. Beim Pressen dient als ebener Untergrund eine Metallplatte, auf welcher die drei Gewebelagen gestapelt platziert sind. Ein planplanarer Metallstempel der Größe 380 mm x 380 mm wird auf dem Lagenaufbau gelegt und die Presse auf den gewünschten Druck zugefahren.

Vor der Kompaktierung wird sichergestellt, dass Presse, Metallplatte sowie -stempel vollständig auf die Kompaktierungstemperatur aufgeheizt sind.

Die Celluloseregenerat-Textilien liegen zudem bis zur Vorkompaktierung, oder im Falle der Referenz bis zur Fertigstellung des VARI-Aufbaus, im Ofen bei 105 °C. Dort werden sie für mindestens 2 h vorgetrocknet.

Die Vorbereitung des VARI-Aufbaus erfolgt weitestgehend vor dem Kompaktierungsprozess, sodass die Fasern nach diesem lediglich in den Aufbau gelegt, der Aufbau mit der Vakuumfolie abgedichtet und schließlich vakuumiert wird. Die Zeit zwischen der Entnahme der Fasern aus

der Presse bzw. dem Ofen und einem vakuumierten Aufbau liegt bei ungefähr 10 min. Die Aufnahme der Luftfeuchtigkeit soll somit möglichst gering gehalten werden.

Der verwendete VARI-Aufbau ist in Abbildung 25 dargestellt. Der quasi-linienförmige Anguss liegt an zwei Kanten der Zuschnitte und der Punktabfluss ist in der gegenüberliegenden Diagonale platziert. Somit entstehen zwei, 90 ° zueinander ausgerichtete Fließfronten, die sich überlagern.

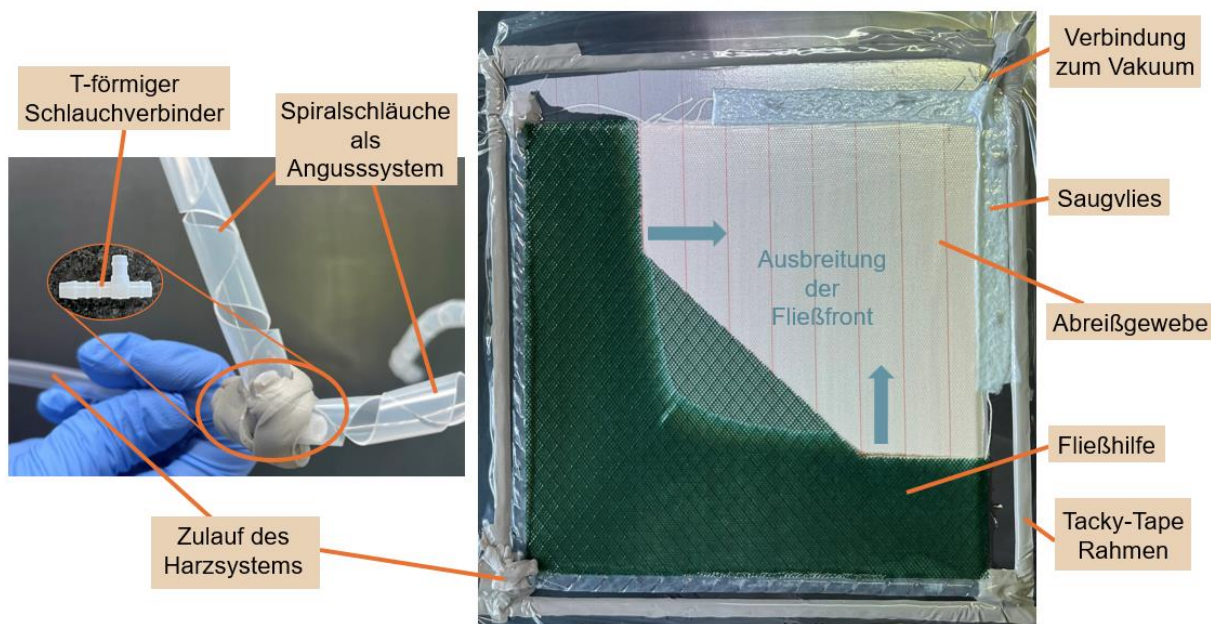


Abbildung 25: Darstellung des VARI-Aufbaus mit Veranschaulichung des Harzsystems-Zulaufes (links) und der Fließfrontausbreitung (rechts)

Nachdem der Aufbau vakuumiert ist, werden Harz und Härter vermengt und für circa 20 min entgast. Die benötigte Menge des Harzsystems hängt von der Konfiguration ab, da die Kompaktierung das freie Volumen des Lagenaufbaus verändert indem sich die Matrix ansammelt. Bei der Referenz liegt sie bei 250 g Harz und 70 g Härter. Die Infusion wird circa 25 min nach Vakuumieren des Aufbaus gestartet. Dabei erfolgt das Öffnen der Klemme am Harz-Zulaufschlauchs nicht vollständig. Nachdem die Fließfront das Ende der Fasern erreicht hat, wird eine weitere Stunde gewartet, in welcher der Aufbau am offenen Vakuum angeschlossen bleibt. Die verlangsamte Infusion und die Wartezeit nach vollständiger Infusion sollen dafür sorgen, dass verbliebene Lufteinschlüsse aus dem Laminat gezogen und die Fasern von der Matrix vollständig umschlossen werden. Nach dieser Zeit folgt das Zudrehen der Klemmen am An- und Abflussschlauch. Der Aufbau wird von der Harzfalle getrennt und in den Ofen gestellt. Die vollständige Aushärtung erfolgt dort bei 80 °C für mindestens 12 h. Den letzten Schritt der Herstellung stellt das Entformen des FKV aus dem Aufbau dar.

6.1.4.2 Herstellung der Zugproben

Nachdem die Faserverbunde in allen benötigten Konfigurationen hergestellt sind, werden die einzelnen Platten für den Zugversuch zu Zugproben weiterverarbeitet.

Im ersten Schritt erfolgt das Zusägen der Faserverbundplatten auf eine Größe von 300 mm x 250 mm. Die Breite von 250 mm entspricht dabei der Länge einer Zugprobe. Unter Berücksichtigung der Sägeblattbreite können aus der Länge von 300 mm zehn Zugproben mit einer Breite von 25 mm ausgesägt werden.

Vor dem Aussägen der einzelnen Zugproben erfolgt das Kleben von Krafteinleitungselementen, sogenannten Aufleimern, beidseitig entlang der langen Kanten der Platten. Als Aufleimer wird glasfaserverstärktes Kunststofflaminat (GFK) verwendet. Dieses wird zu 300 mm x 50 mm großen Rechtecken zugesägt, sodass die Fasern des GFK bei den fertigen Zugproben $\pm 45^\circ$ zur Zugrichtung orientiert sind. Vor dem Kleben erfolgt das Anrauen und Reinigen der Klebeflächen. Es wird ein Zweikomponentenkleber Araldite® 2011 der Firma HUNTSMAN CORPORATION benutzt. Die Aushärtung des Klebstoffes erfolgt zunächst für mindestens 2 h bei Raumtemperatur und daraufhin für mindestens 12 h bei 80 °C im Ofen. Links in Abbildung 26 sind FKV-Platten nach dem Klebeprozess mit den Aufleimern zu sehen. Die Klemmen sollen Druck ausüben, während der Klebstoff aushärtet.

Nach dem Aushärten wird der überschüssige, ausgehärtete Klebstoff mit einem Bandschleifer abgeschliffen. Im letzten Schritt werden die einzelnen Zugproben von der vorbereiteten Faserverbundplatte abgesägt, was rechts in Abbildung 26 gezeigt wird.

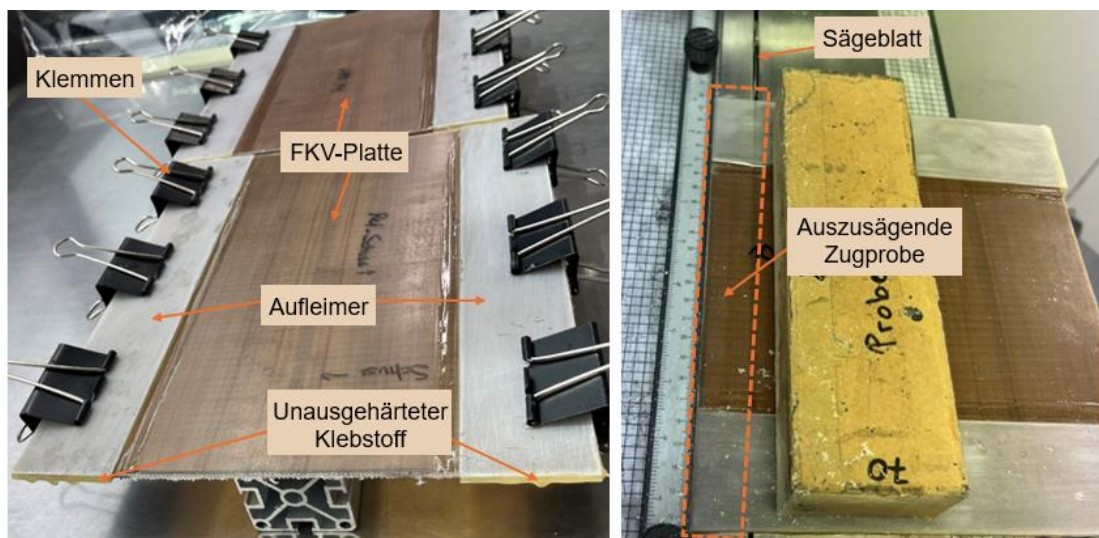


Abbildung 26: FKV-Platten mit aufgeklebten Aufleimern (links) und Zusägen der Zugproben (rechts)

6.1.4.3 Zugversuch

Der Zugversuch wird in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4 mit einer Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min durchgeführt. Die fertiggestellten Zugproben des Probenkörpertyps 3 werden vor der Durchführung des Zugversuches in Anlehnung an der DIN EN ISO 291 bei $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ und $(50 \pm 10) \%$ relative Feuchte für mindestens 88 h konditioniert. Die Prüfung findet ebenfalls in diesem Normklima statt.

Für die Zugprüfung wird die Universalprüfmaschine der Firma ZWICKROELL GMBH & Co.KG des Types BZ2-MM100TL.ZW01 mit einer Kraftmessdose von 100 kN verwendet. Die Aufnahme der Messwerte sowie die Auswertung erfolgt mit Hilfe des Programmes *testXpert II*. Vor der Prüfung erfolgt das manuelle Eintragen von Breite und Dicke der jeweiligen Proben in das Programm. Dafür werden drei Stellen der Proben mit einem Messschieber abgemessen und der Mittelwert gebildet.

Beim Einspannen der Probe wird Schleifpapier zwischen Klemmbacken und Probe platziert, wobei die raue Seite zu den Aufleimern zeigt. Dies soll ein Rutschen der Proben verhindern. Ein genaues Einstellen der Einspannkraft beim Zudrehen der Klemmbacken ist bei der Prüfmaschine nicht möglich. Der Aufbau des Zugversuchs ist in Abbildung 27 dargestellt.

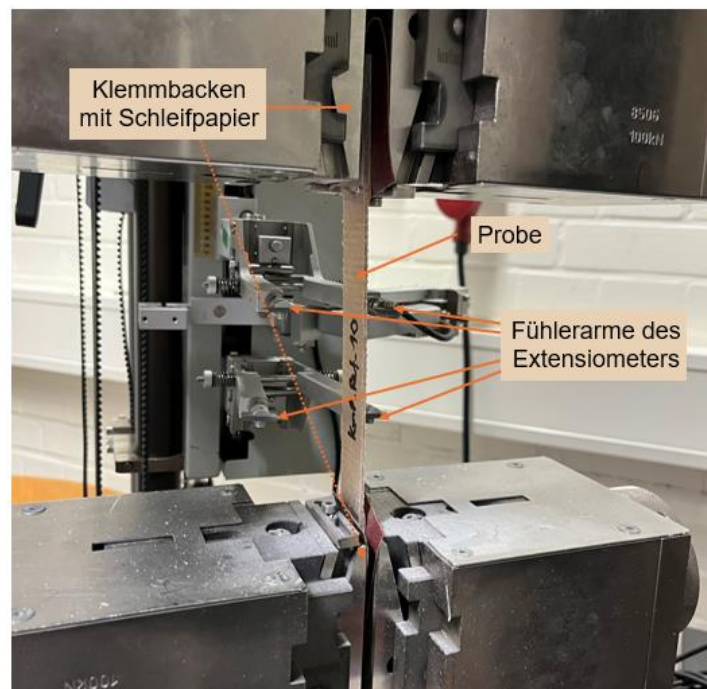


Abbildung 27: Aufbau des Zugversuchs

6.1.4.4 Erstellung von Schliffbilder

Um ein tiefergehendes Verständnis der Vorgänge beim Kompaktieren zu erhalten, werden Schliffbilder erstellt. Die Bilder sollen dabei helfen, die Ergebnisse aus dem Zugversuch zu interpretieren, indem Faseranordnungen und möglicherweise Faserschädigungen angeschaut werden. Die Proben für die Schliffbilder stammen deshalb aus den gleichen FKV-Platten wie die Zugproben der jeweiligen Konfiguration. Pro Konfiguration werden aus der zugehörigen Platte jeweils drei circa 12 mm x 12 mm große Rechtecke zugesägt.

Es folgt die Einbettung der Proben in Epoxidharz. Dafür wird das EpoFix Kit, bestehend aus UN3082 EpoFix Resin und UN2259 EpoFix Hardener der Firma STRUERS, verwendet. Für die Einbettung werden die Proben einer Konfiguration jeweils in einen Probenhalter eingespannt, die Einbettformen mit Vaseline eingetrennt und die Probenhalter mit den Proben in den Formen platziert. Das Harzsystem wird daraufhin auf alle Formen verteilt und zum Aushärten für mindestens 12 h bei Raumtemperatur stehen gelassen. Nach der Aushärtezeit können die eingebetteten Proben aus den Formen entnommen, von der Vaseline gereinigt und mit der richtigen Bezeichnung graviert werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 28 dargestellt.



Abbildung 28: Eingebettete Proben vor dem Schleif- und Polierprozess

Im nächsten Schritt müssen die fertig eingebetteten Proben geschliffen und poliert werden. Dafür wird das Poliergerät STRUERS Tegramin-25 mit der Version 1.19 verwendet. Es wird ein Polierhalter mit sechs Probenhalterungen ausgewählt. Aufgrund der Anzahl von insgesamt acht zu polierenden Proben, wird der Halter jeweils mit vier Schliffproben gefüllt und der Poliervorgang durchgeführt. Dabei wird zunächst Schleifpapier mit pro Schleifgang kleiner werdender Körnung, darauf zwei Diamantsuspensionen und zuletzt eine Silica-Suspension verwendet. Die Schliffproben können nun unter dem Mikroskop angeschaut werden. Für die Aufnahme der Bilder und Abmessungen einzelner Bereiche der Proben wird das Digital Mikroskope VHX-500F der Firma KEYENCE mit der Real Zoom Linse x100-x1000 VH_Z100R verwendet.

6.2 Auswertung

6.2.1 Kompaktierungstemperatur

Die Kompaktierungstemperatur soll mit Hilfe der Ergebnisse der TGA-Messung der Gewebe ausgewählt werden. In Abhängigkeit der Temperatur ist der prozentuale Massenanteil einer repräsentativen Probe in Diagramm 1 dargestellt.

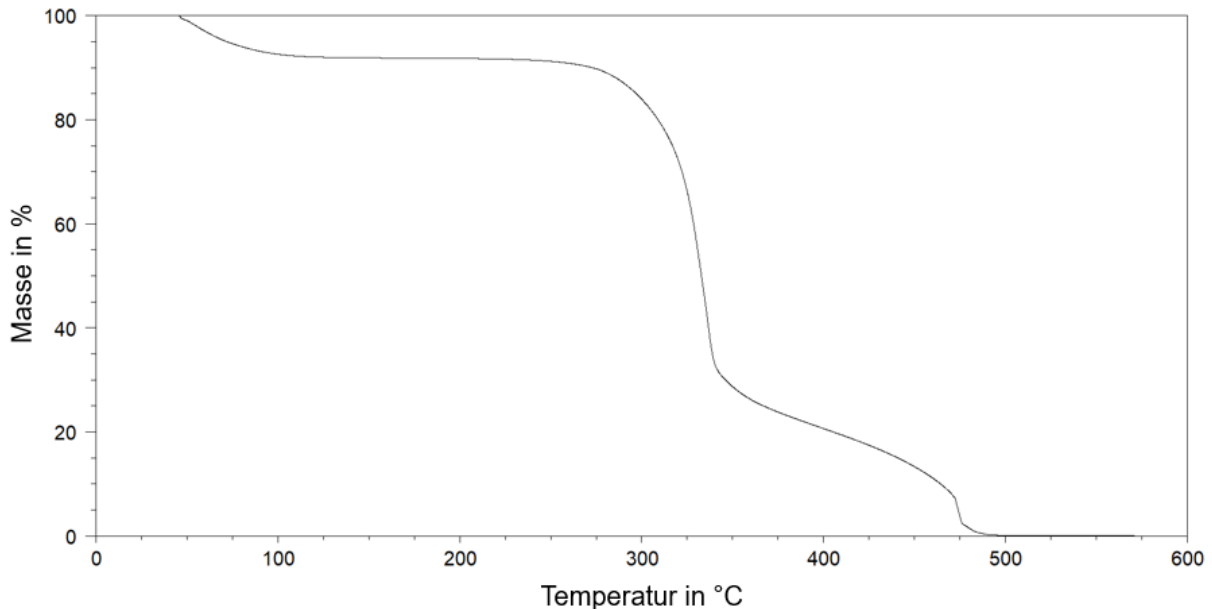


Diagramm 1: Ergebnis der TGA-Messung des Celluloseregenerat-Gewebes

In Diagramm 1 sind mehrere sprunghafte Massenverluste zu erkennen. Der erste Massenabfall ist auf die Feuchtigkeitsabgabe des Materials zurückzuführen. Bei ungefähr 110 °C ist die Feuchtigkeit vollständig abgegeben und die verbleibende Masse liegt bei 92 %. Die Wasseraufnahme der Celluloseregeneratfasern während der Vorkonditionierung bei 23 °C und 50 % relative Luftfeuchte liegt demnach bei 8 %. Die folgenden Massenverluste treten aufgrund der oxidativen Zersetzung des Celluloseregenerats auf. Diese äußert sich in stufenweisen Zersetzungsreaktionen, die sich in den Massensprüngen zeigen. Zwischen 250 °C und 350 °C ist die erneute Abnahme der Masse um 62 % zu beobachten. Es folgt ein relativ linearer Abfall der Kurve bis 470 °C bis zu einer verbleibenden Masse von 7 %. Bei 500 °C findet die letzte Zersetzungsreaktion statt und das Material ist vollständig abgebaut.

Die Kompaktierungstemperatur soll zwischen der kompletten Feuchtigkeitsabgabe und dem Start der Zersetzung des Materials liegen. Eine Restfeuchte im Material beeinflusst die Eigenschaften und soll möglichst verhindert werden, um die negativen Auswirkungen zu vermeiden. Die Kompaktierungstemperatur wird nach Auswertung der TGA-Messung auf 120 °C festgelegt.

Somit liegt diese im ausgewählten Temperaturbereich und wird unter ökonomischer Betrachtung, des Energieverbrauchs und der damit einhergehenden Kosten möglichst gering

gehalten. Als weiterer Vorteil ergibt sich eine Vergleichbarkeit zu anderen durchgeführten Arbeiten [Hei23] [Ken21], die eine Kompaktierungstemperatur von 120 °C für Naturfasern verwenden.

6.2.2 Kompaktierungsdauer, Relaxations- und Rückstellverhalten

In den Kompaktierungsversuchen konnte das Relaxations- und das Rückstellverhalten der Gewebetypen mit den ausgewählten Kompaktierungsparametern von 120 °C, 15 min und 1 mm/min aufgenommen werden. In Diagramm 2 sind die relativen Relaxationswerte dargestellt, die nach Gleichung 6.1 berechnet sind.



Diagramm 2: Darstellung der relativen Relaxation über den Kompaktierungsdruck

Aus dem Diagramm wird deutlich, dass die Relaxation mit steigenden Kompaktierungsdruck sinkt. Dies ist bei beiden Gewebetypen gleichermaßen festzustellen, die sich im Rahmen der Fehlertoleranzen nicht unterscheiden. Werden hohe Drücke auf das Material aufgebracht und damit der Werkzeugabstand verkleinert, wird der zur Verfügung stehende Platz zur Reorganisation geringer. Der Spannungsabbau kann nur bedingt stattfinden und die Relaxation liegt bei niedrigeren Werten. Die dargestellten Messpunkte veranschaulichen ebenfalls, dass der Zusammenhang zwischen Relaxation und Kompaktierungsdruck die Form eines beschränkten Abfalls besitzt, sodass die Kurve in ein Plateau läuft.

Bei der Betrachtung des Relaxationsverhaltens müssen die anderen Kompaktierungsparameter, insbesondere die Kompaktierungsgeschwindigkeit, herangezogen werden. Dies wird bei Veranschaulichung des Kraftverlaufs bei unterschiedlichen

Kompaktierungsgeschwindigkeiten und -drücken über die Zeit eines Kompaktierungsversuches deutlich und ist in Diagramm 3 dargestellt.

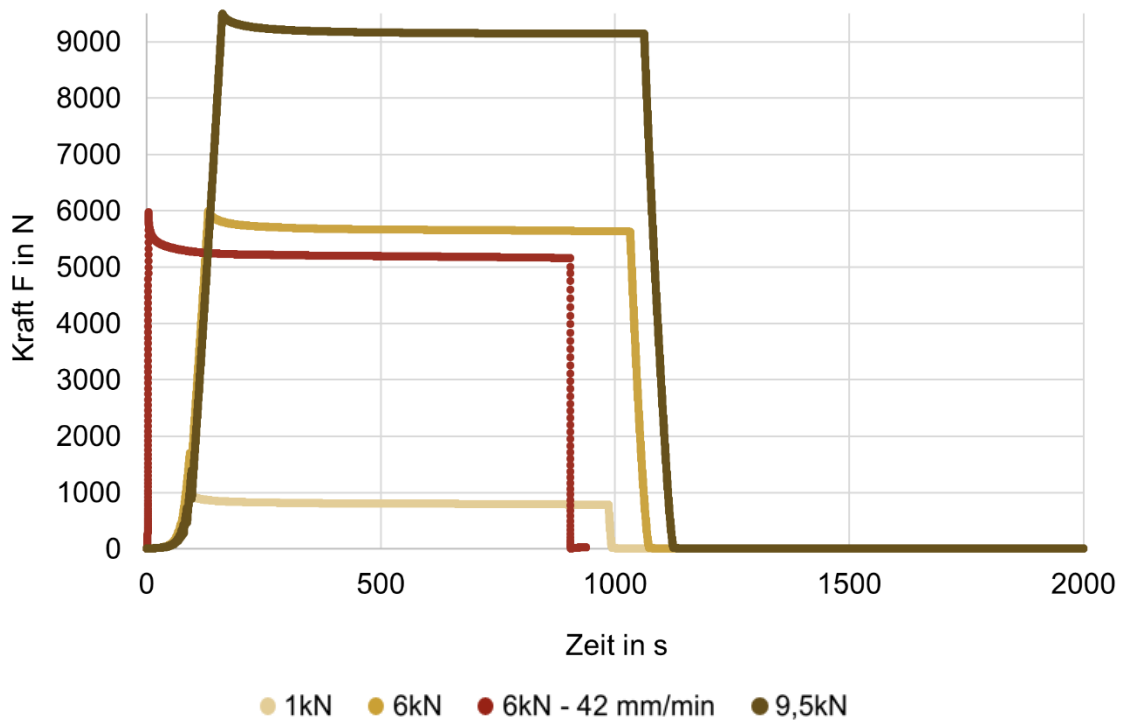


Diagramm 3: Repräsentative Kraftverläufe über die Zeit während des Kompaktierungsversuchs von Proben des Köpergewebes mit Poren

Die Belastung der Proben mit 6 kN auf einen Druck von 24 bar wird mit einer zweiten, höheren Kompaktierungsgeschwindigkeit von 42 mm/min durchgeführt. Bei einem Vergleich der beiden Kraftverläufe, bei denen sich lediglich die Belastungsgeschwindigkeit unterscheidet, wird ein abweichendes Relaxationsverhalten deutlich. Die erhöhte Geschwindigkeit hat eine erhöhte Relaxation zur Folge, die gemittelt bei $12\% \pm 2\%$ liegt. Damit ist diese doppelt so hoch wie mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min. Das liegt daran, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten der Kraft- bzw. der Druckaufbau langsamer ist und währenddessen bereits Relaxationsvorgänge stattfinden. Ein Teil des Spannungsabbaus findet bereits beim Belasten statt und ist nicht in den Kompaktierungsversuchen messbar.

In Diagramm 3 ist zudem zu erkennen, dass die Spannungsrelaxation in ein Plateau läuft. Bei niedrigeren Kompaktierungsgeschwindigkeit hat die Relaxation nach 15 min quasi vollständig stattgefunden und das Plateau ist erreicht. Vor allem bei hohen aufgebrachtten Kräften, wie den 9,5 kN ist dies erkennbar. Die Kompaktierungsdauer von 15 min kann damit festgelegt und bestätigt werden.

Abweichend von den Kompaktierungsversuchen ist die Belastungsgeschwindigkeit bei der Kompaktierung der Gewebelagen in der Thermopresse zur Faserverbundherstellung niedriger. Ein Teil der Relaxation findet demnach schon während des Belastungsvorganges

statt. Damit ist sichergestellt, dass das Plateau der Relaxation innerhalb der 15 min erreicht wird.

Nach der Kompaktierung kommt es zur Entlastung und zum Rückstellen des Materials. Die relativen Rückstellwerte der Konfigurationen sind in Diagramm 4 aufgeführt und nach Gleichung 6.2 berechnet.

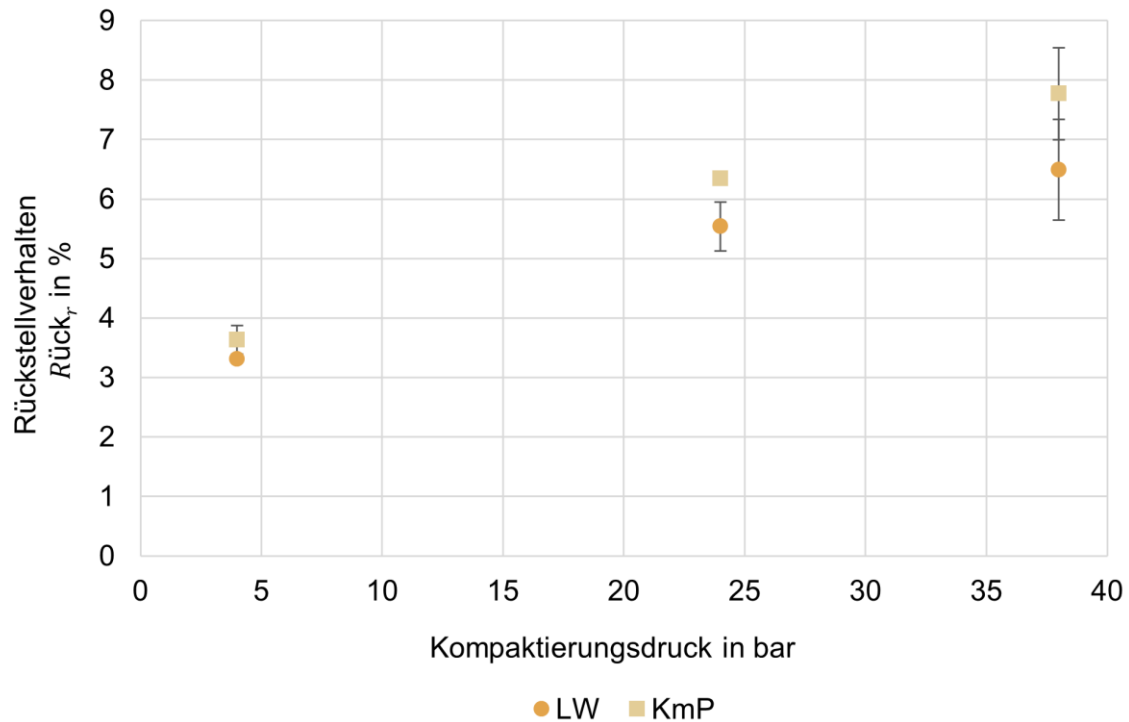


Diagramm 4: Darstellung des relativen Rückstellverhaltens über den Kompaktierungsdruck

Das Diagramm zeigt ein steigendes Rückstellverhalten mit zunehmenden Kompaktierungsdruck. Dies kann mit der sinkenden Relaxation bei steigendem Kompaktierungsdruck erklärt werden. Werden aufgrund des geringeren Platzes zu Reorganisation weniger Spannungen abgebaut, ist das Rückstellen nach der Entlastung höher. Für diese relativen Rückstellwerte gilt es ebenfalls zu beachten, dass die Rückstellung bei Beginn der Entlastung anfängt und hier nur die Werte nach Erreichen der minimalen Belastung von 5 N gemessen werden können.

Es sind kaum Unterschiede zwischen den Gewebetypen zu erkennen. Das Leinwandgewebe scheint gemittelt ein etwas höheres Rückstellverhalten verglichen zum Körpergewebe mit Poren aufzuweisen. Es besitzt eine höhere Flottierung und keine Poren, die als Hohlräume und damit freien Platz fungieren. Die dauerhafte Reorganisation bei dem Körpergewebe mit Poren könnte dadurch nach der Entlastung begünstigt sein, aber auch in diesem Gewebetyp sorgen Flottierung und Verdrillung der Fasern dafür, dass der freie Raum nur begrenzt eingenommen werden kann.

Der Gewebetyp zeigt durch die Flottierung der Textile und der Verdrillung der Fasern keinen maßgeblichen Einfluss auf Relaxations- und Rückstellverhalten.

6.2.3 Kompaktierungsdruck

Zur Ermittlung des optimalen Kompaktierungsdruck werden die Ergebnisse des Zugversuchs herangezogen. Ein ausschlaggebender Faktor für die mechanischen Eigenschaften ist der FVG. Für die Zugprüfung sind die Dicken der Proben an drei Stellen gemessen und gemittelt worden. Über diese Dicken ist mit Gleichung 3.1 der FVG berechnet. Die Ergebnisse des Zugversuchs werden im Folgenden in Abhängigkeit des FVG diskutiert.

In Diagramm 5 ist das Zugmodul in Abhängigkeit des FVG der Konfigurationen mit Köpergewebe mit Poren dargestellt.

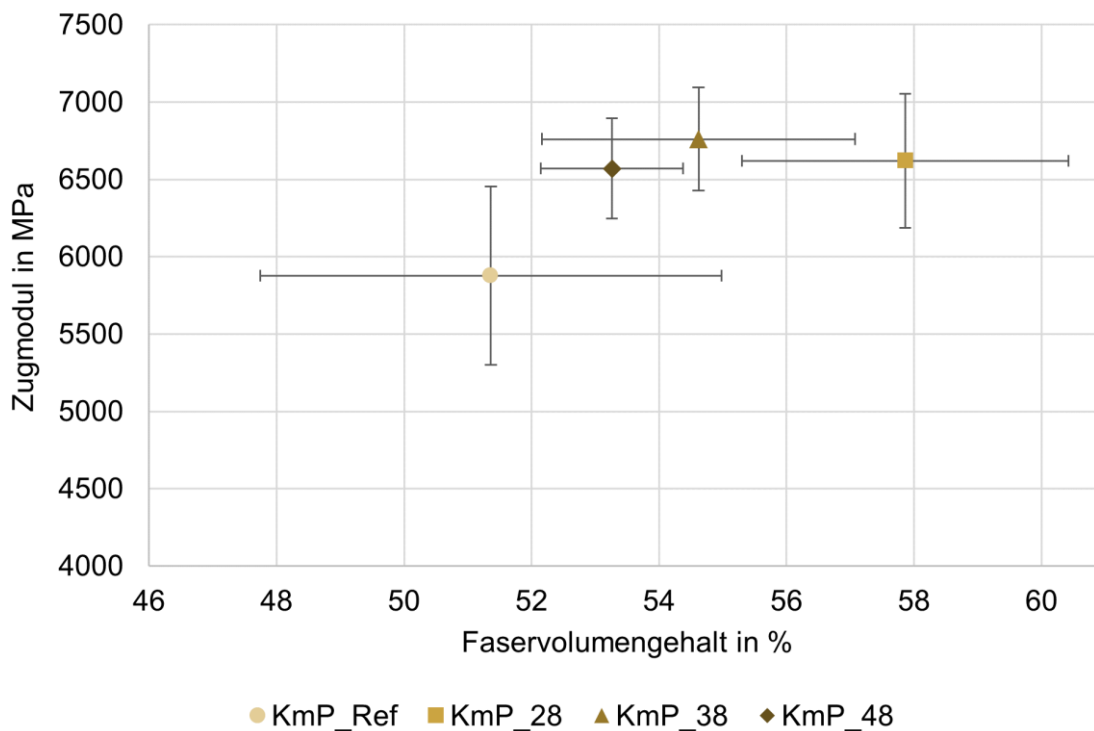


Diagramm 5: Zugmoduln der Konfigurationen des Köpergewebes mit Poren in Abhängigkeit des FVG

Das Köpergewebe mit Poren zeigt den höchsten FVG bei 28 bar Kompaktierung. Unter Berücksichtigung der Standardabweichungen ist dieser knapp höher als bei der Referenz und der mit 48 bar kompaktierten Konfiguration, aber im ähnlichen Bereich wie die 38 bar kompaktierte Konfiguration.

Die Fehlertoleranzen aller Konfigurationen hängen vor allem mit dem Herstellungsprozess über das VARI-Verfahren zusammen. Wie in Kapitel 3.7 in Abbildung 12 beschrieben, ist die Dicke der vollständig infundierten Platte und damit auch der FVG ortsabhängig vom Abstand zum Vakuumanschluss. Somit spricht eine Überlagerung der Fehlertoleranzen dafür, dass der FVG in Teilen der FKV-Platten übereinstimmt und sich in anderen unterscheidet.

Die Werte des Zugmoduls des Köpergewebes sind unter Berücksichtigung der Standardabweichungen aller Konfigurationen im gleichen Bereich. Die Kompaktierung scheint keine Steigerung des Zugmoduls hervorzubringen. Die Faser-Matrix-Haftung der Konfigurationen ist vor allem für die Werte des Zugmoduls ausschlaggebend. Durch die Kompaktierung wird die Faser-Matrix-Haftung, trotz Änderung des FVG, nicht beeinflusst, sondern sollte zwischen unkompaktierten und kompaktierten Konfigurationen gleich sein, sofern eine Faserbenetzung gegeben ist. Dies könnte eine mögliche Erklärung für die gleichbleibenden Werte des Zugmoduls sein.

Die Zugfestigkeiten des Köpergewebes mit Poren sind in Diagramm 6 dargestellt.

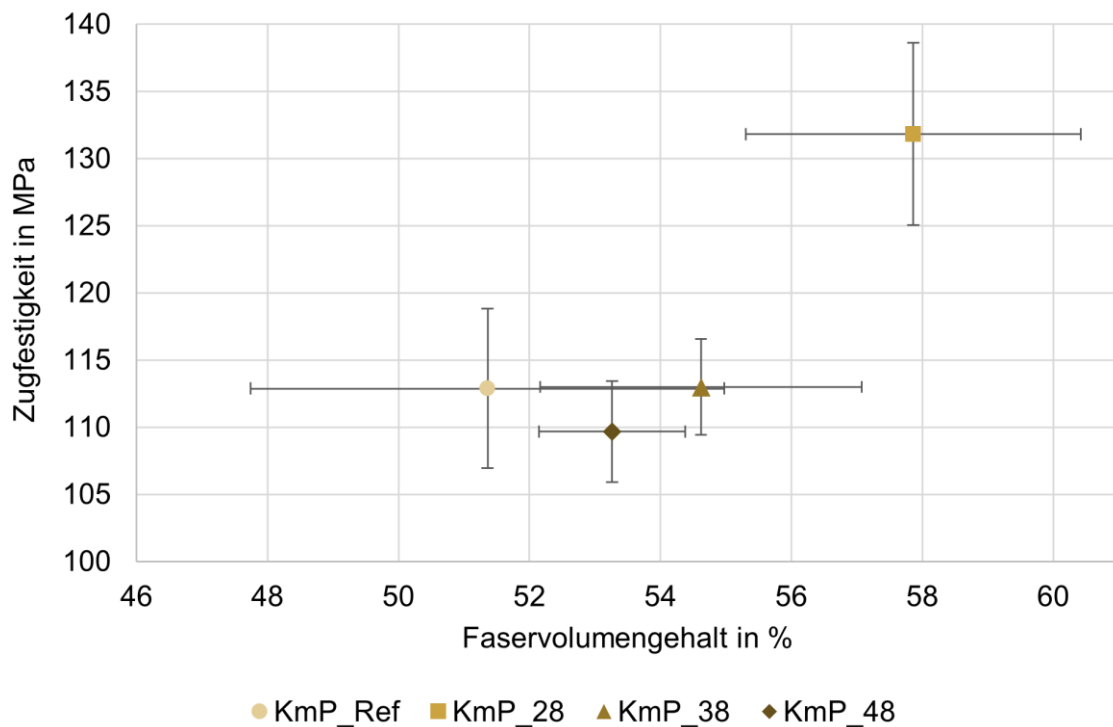


Diagramm 6: Zugfestigkeiten der Konfigurationen des Köpergewebes mit Poren in Abhängigkeit des FVG

Diagramm 6 zeigt eine Verbesserung der Zugfestigkeit der mit 28 bar kompaktierten Konfiguration. Die anderen beiden kompaktierten Konfigurationen liegen im Bereich der Referenz.

Aus Diagramm 6 wird zudem deutlich, dass die Konfiguration mit dem im Mittel höchsten FVG auch die höchste Zugfestigkeit aufweist. Bei einem höheren Faseranteil können die Zugkräfte auf mehr Fasern verteilt werden, sofern die Matrix die Fasern vollständig ummantelt und somit eine Krafteinleitung gewährleistet. Die höhere Zugfestigkeit der mit 28 bar kompaktierten Proben liegt demnach im FVG begründet.

Trotzdem ist nicht eindeutig warum eine Kompaktierung von 28 bar den höchsten FVG erzielt und ein höhere Kompaktierungsdruck zu niedrigeren FVG führt. Es ist davon auszugehen, dass alle in Kapitel 3.8 in Abbildung 14 beschriebenen Kompaktierungsmechanismen auf Garn

und Textilebene stattfinden können. Es gibt mehrere Faktoren, die diese auftretenden Mechanismen und somit den FVG des Verbundes beeinflussen. Aufgrund der Poren des Gewebes sind viele Hohlräume gegeben, die je nach Platzierung der Faserlagen übereinander ihre Auswirkung verändern. Die Poren sind vor allem im Zusammenspiel mit dem Gleitmittel auf den Fasern, welches die Beweglichkeit dieser bzw. der Garne positiv beeinflusst, ein unabsehbarer Faktor.

Zum besseren Verständnis, was auf den verschiedenen Größenskalen passiert, werden Schliffbilder angefertigt. In Abbildung 29 sind vier repräsentative Aufnahmen der Schliffproben des Köpergewebes mit Poren dargestellt. Es gilt zu beachten, dass die teilweise zu erkennenden Risse nachträglich aufgetreten sind und einen anderen Ursprung besitzen, der in Kapitel 6.3 Fehlerdiskussion erläutert wird.

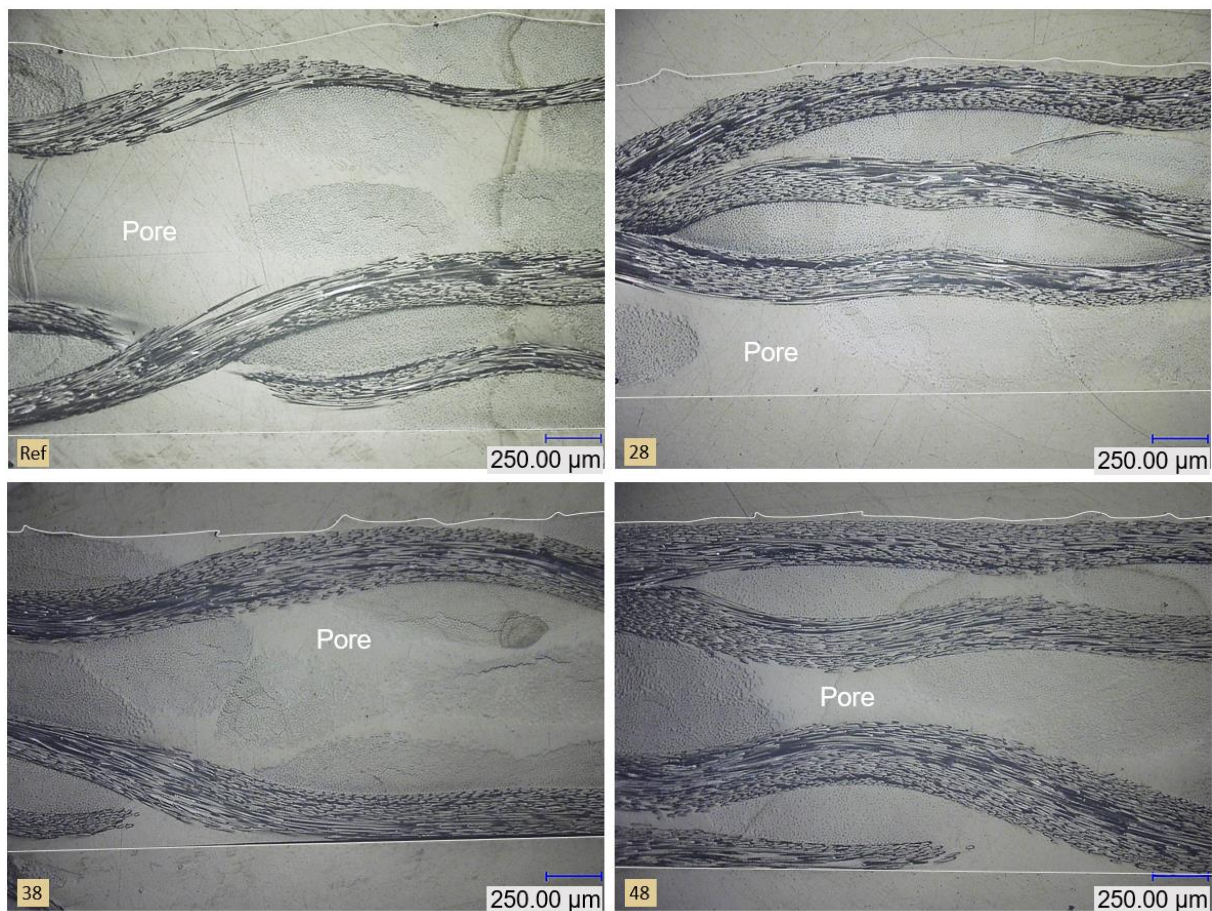


Abbildung 29: Schliffbilder der Konfigurationen des Köpergewebes mit Poren (oben links: Referenz; oben rechts: 28 bar; unten links 38 bar; unten rechts: 48 bar)

Die in Abbildung 29 dargestellten Schliffbilder zeigen das Köpergewebe inklusive der Poren. Bei der Auswahl der hier dargestellten Bilder werden bewusst Aufnahmen mit Poren ausgewählt.

Es gilt zu beachten, dass nur wenige Poren in den gesamten Schliffproben identifiziert werden können. Die gefundene Porenanzahl liegt in den angefertigten Schliffproben pro Konfiguration bei drei bis vier. Dies liegt unter anderem daran, dass nur eine zweidimensionale Aufnahme

in einer durch den Schliff festgelegten Tiefe der Probe möglich ist. Eine Tiefenaufnahme ist hilfreich, um die Kompaktierungsvorgänge generell besser zu verstehen. Dies könnte beispielsweise mit einer Mikro-Computertomographie realisiert werden. Zum anderen werden die Poren bei den kompaktierten Konfigurationen teilweise durch Umstrukturierung aufgrund der Kompaktierungsmechanismen gefüllt bzw. verkleinert. In Abbildung 30 wird bei der Gegenüberstellung der Referenz und der mit 48 bar kompaktierten FKV-Platte deutlich, dass die Kompaktierungsmechanismen zu einer gesteigerten Ungleichmäßigkeit führt, die auch den FVG betrifft.



Abbildung 30: Gegen das Licht gehaltene FKV-Platte der Referenz (links) und der mit 48 bar kompaktierten Konfiguration (rechts) des Körpergewebes mit Poren

Die hellen Bereiche sind hauptsächlich von der Matrix gefüllt und stellen die Poren der Gewebelagen dar. Bei der mit 48 bar kompaktierten Probe wird deutlich, dass die Ausprägung dieser Poren lokal unterschiedlich ist. Die Flottierung des Gewebes scheint die Reorganisation der Lagen nur in Teilbereichen zuzulassen, sodass sich Bereiche mit weitestgehend gefüllten Poren und Bereichen weitestgehend ungefüllter Poren abwechseln. Es zeigt sich eine Interferenz des Kreuzmusters, die sich durch die Verschiebung der Lagen aufgrund der Poren ergibt. Die Abbildung 30 verdeutlicht die hohen lokalen Unterschiede im FVG.

In Diagramm 7 sind die Flächen der Poren der Konfigurationen dargestellt. Es handelt sich um die Mittelwerte der in der Schliffbildern identifizierten Poren. Für die Berechnung werden die Flächen der Poren als Rechteck angenommen und die gemessenen Höhen mit den Längen multipliziert.

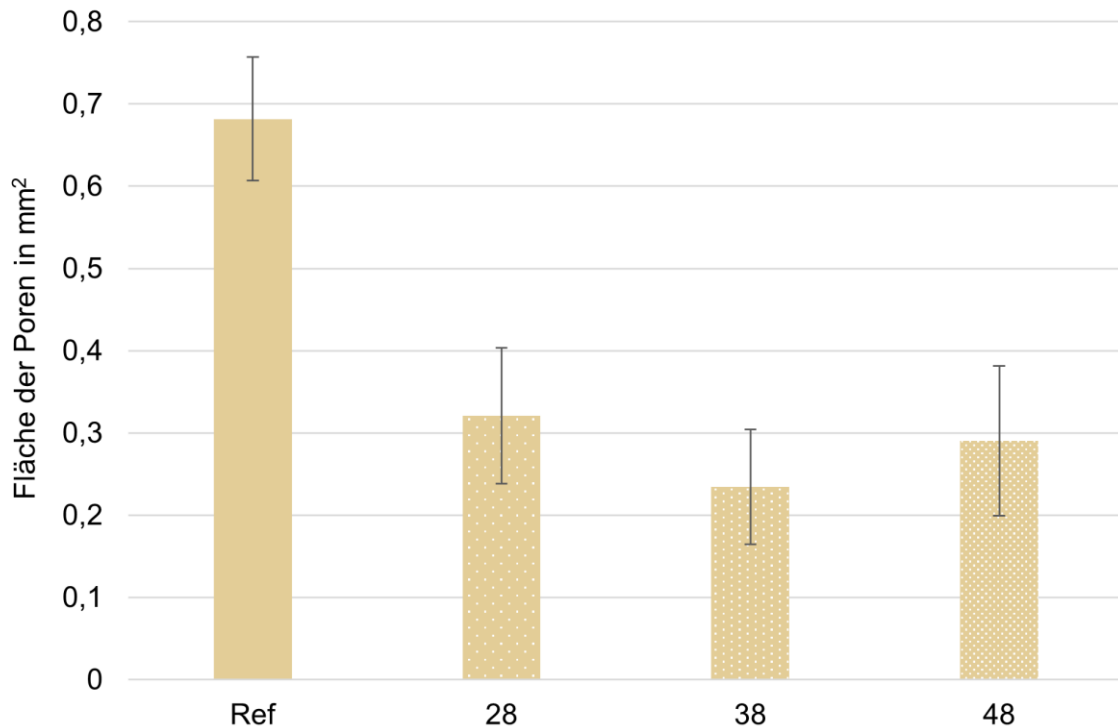


Diagramm 7: Aus den Schliffbildern gemessene Flächen der Poren des Körpergewebes

Aus dem Diagramm wird deutlich, dass die Porengröße bei den kompaktierten Konfigurationen sinkt. Die Verkleinerung liegt, verglichen zur Referenz, bei über 50 %. Es ist jedoch nur ein kleiner lokaler Ausschnitt in den Schliffbildern gegeben. Somit können nur wenig Poren deutlich identifiziert werden, da diese in allen drei Dimensionen auf der Ebene des Schliffes liegen müssen, um vom Mikroskop erfasst zu werden. Hinzu kommt, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass weitestgehend gefüllte Poren nicht mehr als solche identifiziert werden konnten.

Neben den Poren verändert sich auch die Packungsdichte sowie die Garnquerschnitte. In Bereichen abseits der Poren ist eine Erhöhung der Packungsdichte bei gleichzeitiger Deformation des ellipsenförmigen Garnquerschnittes zu einer geringeren Höhe und einer größeren Länge festzustellen. Bei höheren Drücken sind in den Bereichen neben den Poren Garnquerschnitte zu erkennen, die keine Ellipsenform aufweisen. Dies wird vor allem in dem dargestellten Schliffbild der mit 38 bar kompaktierten Konfiguration deutlich, sodass dieser Bereich in Abbildung 31 nochmal vergrößert dargestellt ist.

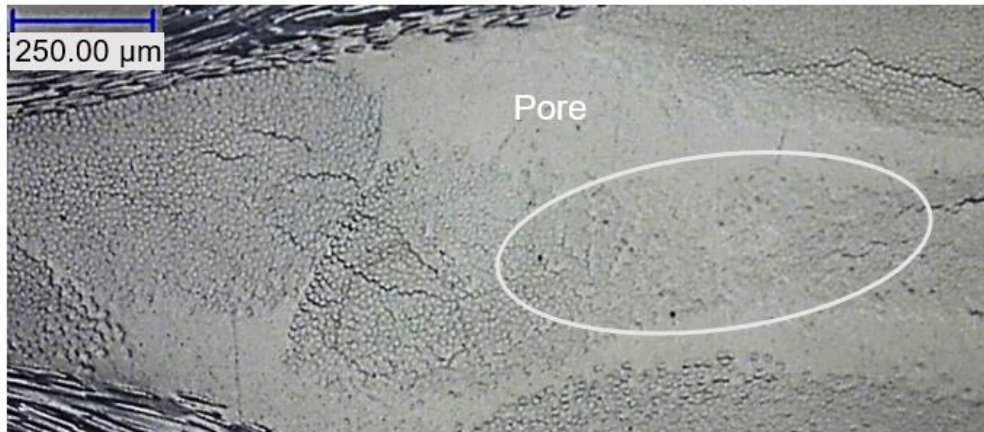


Abbildung 31: Vergrößerter Ausschnitt des Schliffbildes der mit 38bar kompaktierten Probe des Köpergewebes mit Poren

Die Flottierung scheint die Garne daran zu hindern den freien Platz der Poren vollständig auszufüllen. Einzelne Fasern wirken losgelöst von dem Garnquerschnitt, um den freien, in Abbildung 31 eingekreisten Bereich einzunehmen. Die Uneinheitlichkeit wird unter anderem dadurch hervorgerufen, dass die Flottierung des Gewebes die Garnfreiheit einschränkt und, je nach Orientierung der Lagen zueinander der Platz der Poren besser oder schlechter ausgenutzt werden kann.

Eine eindeutige Begründung für den erhöhten FVG der mit 28 bar kompaktierten Proben im Vergleich zu Konfigurationen mit höheren Kompaktierungsdrücken liefern die Schliffbilder nicht. Es ist möglich, dass Reproduzierbarkeit der mit 28 bar kompaktierten Platte nicht gegeben ist. Jede Konfiguration wird nur einmal hergestellt, sodass eine Reproduzierbarkeit bestätigt werden muss. Eine Wiederholung kann zudem zusätzliche Erkenntnisse bezogen auf den FVG und die Kompaktierungsmechanismen der Konfigurationen liefern.

Allgemein wird in allen Ergebnissen die Uneinheitlichkeit des Köpergewebes mit Poren deutlich. Durch die Poren weist das Gewebe einen weiteren Einflussfaktor für Kompaktierungsmechanismen und resultierenden Eigenschaften des Faserverbundes auf. Bereits im trockenen Zustand des Textils zeigen die Poren unterschiedliche Größen und sorgen für eine Uneinheitlichkeit, die sich durch zusätzlich auftretende Interferenzen nach der Kompaktierung verstärkt. Zudem rufen die Poren dadurch, dass sie im Köpergewebe eingebracht sind, hohe lokale Unterschiede im FVG hervor. Es können somit abweichende Spannungszustände und ortsabhängige Eigenschaften auftreten.

Die Uneinheitlichkeit des Gewebematerials behindert die zielführende Optimierung der Kompaktierungsparameter.

Die Werte der Zugfestigkeit im Zusammenhang mit dem FVG des Leinwandgewebes sind im folgenden Diagramm 8 dargestellt.

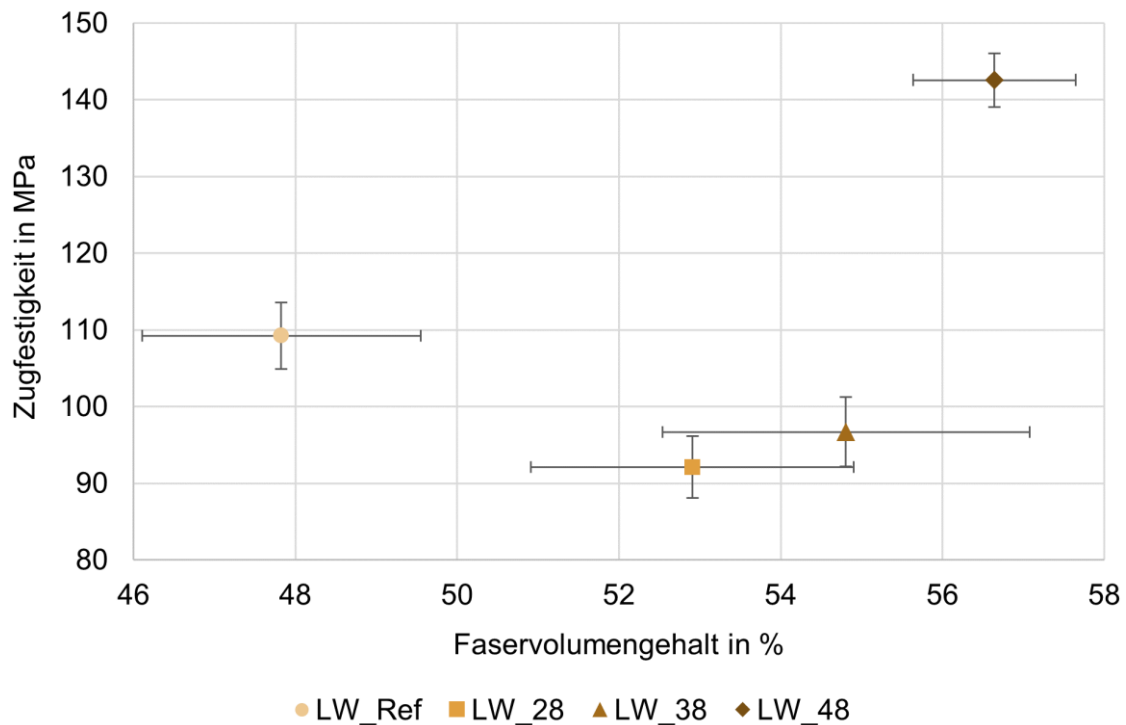


Diagramm 8: Zugfestigkeiten der Konfigurationen des Leinwandgewebes in Abhängigkeit des FVG

Für die Konfigurationen mit Leinwandgewebe ist ein stetiger Anstieg des FVG bei steigendem Kompaktierungsdruck festzustellen. Dies entspricht den Erwartungen, da die Kompaktierung das Gwebematerial zusammendrückt und Abstände zwischen den Fasern verkleinert, die die Matrix nach der FKV-Herstellung ausfüllt. Die Standardabweichungen sind wie bei den Konfigurationen mit Köpergewebe aufgrund der Herstellung im VARI-Verfahren zurückzuführen.

Aus Diagramm 8 wird zudem ersichtlich, dass der Zusammenhang zwischen dem FVG und der Zugfestigkeit nicht entsprechend der Theorie gegeben ist. Die ideale Korrelation ist in Abbildung 8 aus Kapitel 3.5 dargestellt. Die Konfigurationen LW_28 und LW_38 zeigen höhere FVG als die Referenz, aber eine niedrigere Zugfestigkeit. Sie scheinen im Diagramm nach unten verschoben zu sein. Nur die bei 48 bar kompaktierte Probe zeigt den erwarteten Zusammenhang. Verglichen zur Referenz besitzt sie eine Steigerung der Zugfestigkeit von ungefähr 33 MPa bzw. knapp 31 %.

Die ermittelten Zugmoduln zeigen den gleichen Trend. Dies ist in Diagramm 9 dargestellt.

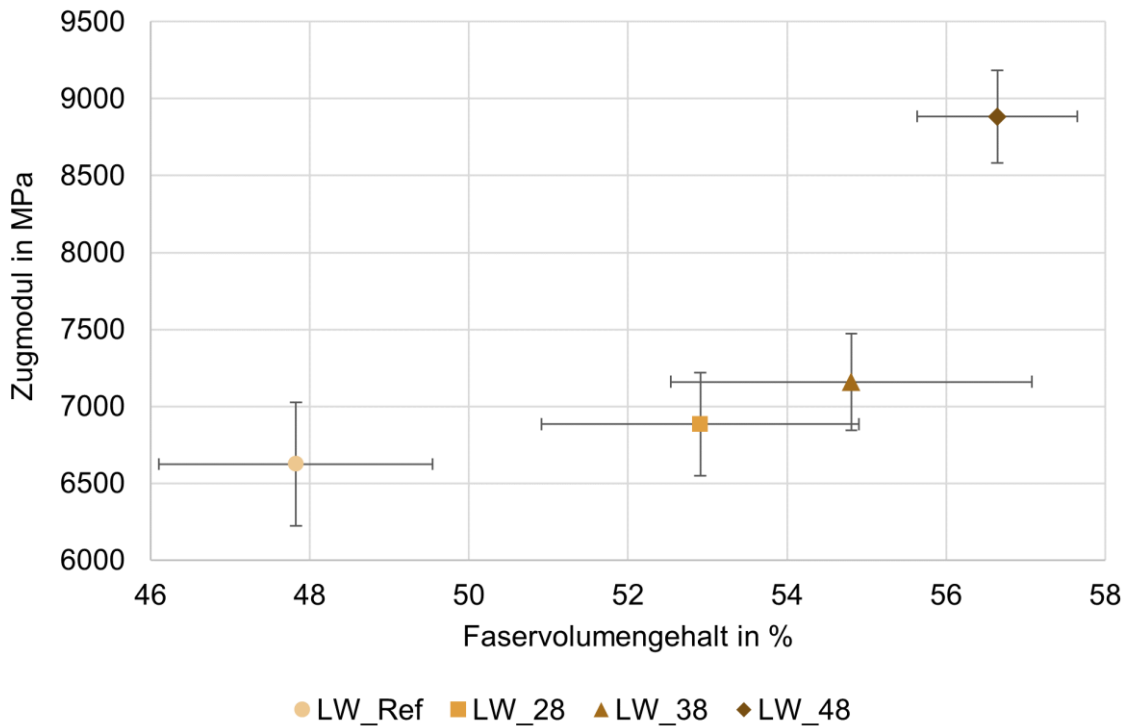


Diagramm 9: Zugmoduln der Konfigurationen des Leinwandgewebes in Abhängigkeit des FVG

Durch die Fehlertoleranzen sind die Zugmoduln der Referenz und der mit 28 bar sowie der mit 38 bar kompaktierten Proben im selben Bereich. Erst bei 48 bar lässt sich eine deutliche Steigerung von ungefähr 2260 MPa, verglichen zur Referenz, feststellen. Das entspricht eine Erhöhung von knapp 35 %.

Entsprechend der Zugfestigkeit scheinen die bei 28 bar und 38 bar kompaktierten Proben ein zu niedrigeren Werten verschobenen Zugmodul zu haben und der erwartete lineare Anstieg ist nicht zu erkennen. Vor allem unter Berücksichtigung der Standardabweichungen sind die FVG der mit 48 bar kompaktierten und der mit 38 bar kompaktierten Proben gleich und trotzdem sind sowohl Zugfestigkeit als auch Zugmodul stark abweichend.

Um diese Ergebnisse zu erklären muss der Aufbau des Gewebes sowie dessen Lagenorientierung betrachtet werden. Das Leinwandgewebe zeigt eine Richtungsabhängigkeit der Fadendichte in Kett- und Schussrichtung. Bei der Versuchsvorbereitung wurde die Lagenorientierung für den Herstellungsprozess nicht berücksichtigt und von einer biaxialen Verstärkungskomponente mit gleichen Verstärkungswirkung in beiden Achsenrichtungen ausgegangen. Durch Dokumentation und Begutachtung der Reststücke der Verbunde, die nicht getestet werden, kann die Lagenorientierung der Gewebe fast vollständig rekonstruiert und die Ergebnisse erläutert werden.

In Tabelle 4 sind die Lagenorientierung der Konfigurationen des Leinwandgewebes veranschaulicht.

Tabelle 4: Lagenorientierung in Zugrichtung der Zugproben mit Leinwandgewebe

Konfiguration	Orientiert in Zugrichtung		
	Erste Lage	Zweite Lage	Dritte Lage
LW_Ref	Kettrichtung	Schussrichtung	Kett- oder Schussrichtung
LW_28	Schussrichtung		
LW_38	Schussrichtung		
LW_48	Kettrichtung		

Der Unterschied zwischen der Fadendichte in Kett- und Schussrichtung liegt bei 40 Fd/10 cm. In Kettrichtung liegen mit 100 Fd/10 cm mehr Fäden als in der Schussrichtung mit 60 Fd/10cm. Die verringerte Anzahl an Fasern in Zugrichtung durch die Ausrichtung der Lagen der bei 28 bar oder 38 bar kompaktierten Proben erklärt die Ergebnisse. Diese Konfigurationen zeigen trotz Anstieg im FVG geringere Werte der Zugfestigkeiten und der Zugmoduln als erwartet. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Zugprüfung der Konfigurationen, mit jeweils ausschließlich Kett- bzw. Schussfäden parallel zur Belastungsrichtung, einen linearen Anstieg der Zugeigenschaften über den FVG zeigt.

Zur besseren Beurteilung der Kompaktierungsmechanismen werden auch vom Leinwandgewebe Schliffbilder angefertigt. Diese sind von der Referenz und der mit 48 bar kompaktierten Konfiguration in Abbildung 32 dargestellt.

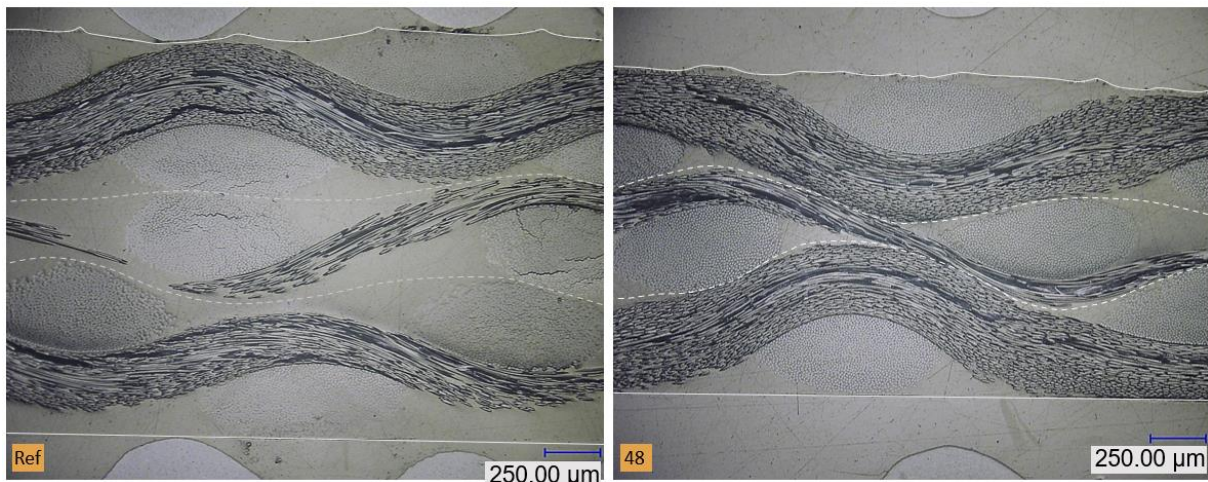


Abbildung 32: Schliffbilder der Referenz (links) und der mit 48 bar kompaktierten Konfiguration (rechts) des Leinwandgewebes

Beim Vergleich der Schliffbilder aus Abbildung 32 wird deutlich, dass bei der Referenz ein niedriger Packungsgrad und teilweise große Abstände zwischen den Garnen vorliegen, die nur von der Matrix gefüllt sind. Bei der mit 48 bar kompaktierten Probe sind die Abstände zwischen den Garnen durch „Nesting“-Effekte geringer. Mit den gestrichelten Linien sind die

Übergänge zwischen den Lagen angedeutet. Bei den Konfigurationen lassen sich durch die Einheitlichkeit des Gewebes die drei Lagen rekonstruieren. Dabei wird bei dem mit 48 bar kompaktierten Verbund deutlich, dass sich die Lagen gegeneinander verschieben, sodass die Packungsdichte ansteigt. Die enge Flottierung sorgt wiederum dafür, dass die einzelnen Garne geringe Freiheitsgrade besitzen und an ihrem Platz in dem Flächengebilde gehalten werden. Entsprechend kommt es hauptsächlich zur Garndeformation. Die Ellipsenform des Querschnittes bleibt, anders als beim Köpergewebe mit Poren, bei der mit 48 bar kompaktierten Probe erhalten. Lediglich die Breite und die Höhe der Ellipsen ändern sich. Diese werden in das Verhältnis gesetzt, um die Garndeformation zu quantifizieren und in Diagramm 10 dargestellt. Insgesamt sind mindestens 16 Garnquerschnitte vermessen worden.

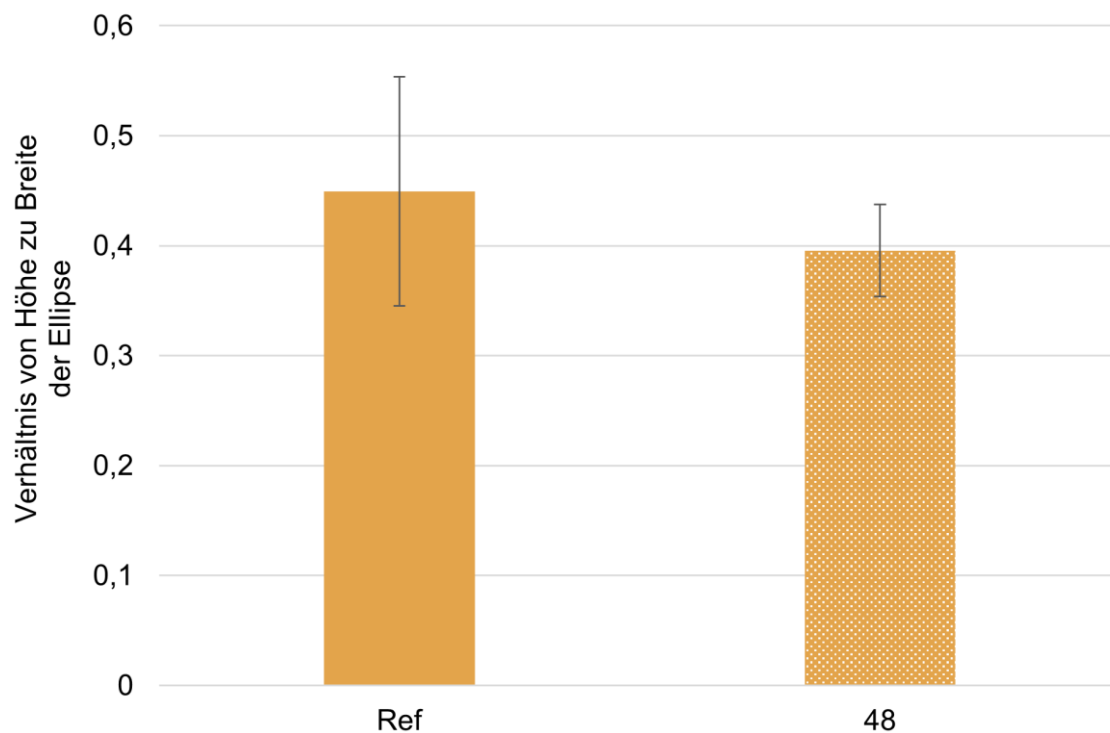


Diagramm 10: Verhältnis Höhe zu Breite der ellipsenförmigen Garnquerschnitte im Leinwandgewebe

Aus Diagramm 10 lässt sich erkennen, dass die Werte unter Einbeziehen der Fehlertoleranzen identisch sind. Die Referenz weist dabei eine weitaus höhere Standardabweichung auf. Sie hat keine Vorkompaktierung erfahren und wurde lediglich durch den VARI-Druck (von ungefähr 0,85 bar) kompaktiert. Dieser Druck scheint nicht ausgereicht zu haben, um die Lagen gegeneinander zu verschieben, wie im Schliffbild der Referenz deutlich wird. Darum erfahren die Garne je Orientierung zu den benachbarten Lagen bzw. des steifen Werkzeuges oder der flexiblen Vakuumfolie unterschiedliche Deformationen. Bei der mit 48 bar kompaktierten Konfiguration sorgt die scheinbar einheitliche Verschiebung der Lagen zu einer ähnlicheren Garndeformation und damit zu einer geringeren Standardabweichung. Der

Unterschied der beiden Mittelwerte liegt ohne Betrachtung der Fehlertoleranzen bei ungefähr 11 %. Es ist zu erwarten, dass eine Kompaktierung mit höherem Druck zu einem größeren Unterschied der Ellipsenverhältnisse führt.

Die Ergebnisse der Zugprüfung können mit Hilfe der Orientierung der Lagen des Leinwandgewebes erklärt werden, allerdings wird der optimale Kompaktierungsdruck nicht gefunden. Die bei 48 bar kompaktierten Proben zeigen die bisher besten Eigenschaften. Allerdings wurden keine höheren Drücke untersucht, sodass eine weitere Optimierung durch Erhöhung des Druckes nicht ausgeschlossen werden kann. Die Schliffbilder bestätigen diese Vermutung, da weiterhin einige nur mit Matrix gefüllte Bereiche zwischen den Garnen der kompaktierten Konfiguration zu erkennen sind.

6.3 Fehlerdiskussion

In den durchgeführten Versuchen zur Festlegung der Kompaktierungsparameter sind verschiedene Fehler oder Ungenauigkeiten zu nennen, die im Folgenden diskutiert und bewertet werden.

Erstens ist die Messreihe zur Bestimmung der Kompaktierungsgeschwindigkeiten aufzuführen. Aufgrund abweichender Angaben von den Be- und Entlastungsgeschwindigkeiten im technischen Datenblatt der Thermopresse werden diese durch Messungen mit einem Messschieber und einer Stoppuhr bestimmt. Der tragende Fehler ist dabei die Reaktionszeit des Menschen. Die Messtoleranz des Messschiebers ist hingegen vernachlässigbar klein. Trotz der Fehlerbehaftung bilden die ermittelten Werte die Realität besser ab als die technischen Angaben der Maschine, die für die Pressgeschwindigkeit 0,7 mm/s und für die Öffnungsgeschwindigkeit 30 mm/s angeben.

Weiter gibt es einige mögliche Fehlerquellen bei den Kompaktierungsversuchen. Dazu zählt vor allem die Temperatur, in welcher die Prüfung stattfinden soll. Auswirkungen der Metallausdehnung von der Prüfapparatur können durch lange Aufheizzeiten verhindert werden. Temperaturschwankungen im Ofen durch Öffnen und Tauschen der Proben zwischen den Messungen können jedoch nicht unterbunden werden.

Mögliche Fehlerquellen in der Herstellung der Faserverbunde wirken sich auf den Zugversuch sowie die Anfertigung der Schliffbilder aus und sind ebenfalls für die weiteren Teile dieser Arbeit relevant, sodass sie im Folgenden detailliert diskutiert werden.

Die Gewebe werden vor der Herstellung vorgetrocknet und erst direkt vor der Weiterverarbeitung aus dem Ofen genommen. Trotzdem liegen 10 min zwischen der Entnahme aus dem Ofen bzw. der Presse und dem vakuumierten VARI-Aufbau, wie in Abbildung 24 dargelegt. Es ist bekannt, dass die Feuchtigkeitsaufnahme einer Sättigungskurve entspricht und in den ersten Minuten am meisten Feuchtigkeit aufgenommen

wird [Rei15]. Darum ist davon auszugehen, dass die Celluloseregeneratfasern innerhalb der kurzen Zeit einen verhältnismäßig hohen Feuchtigkeitsanteil, bezogen auf die Sättigungsmenge, aufgenommen haben.

Der gewünschte Kompaktierungsdruck wird jeweils bezogen auf die Gewebefläche berechnet, da die Druckanzeige der Presse den Druck in Bezug auf die Fläche ihres Presszylinders angibt. Die Gewebelagen liegen nach dem Zuschneiden in den gewünschten Größen vor. Trotzdem kann beim Schneiden und Bewegen der Lagen ein Aufribbeln an den Rändern nicht vollständig verhindert werden. Hinzu kommt, dass die Lagen perfekt übereinander gestapelt und zugeschnitten sein müssen, um die exakte Flächengröße zu erhalten, auf die der Druck wirkt. Dieser Fehler ist jedoch vernachlässigbar klein. Bei einer zu groß angenommenen Verringerung der Fläche von 360 mm x 360 mm auf 356 mm x 356 mm liegt die Abweichung des tatsächlich aufgetragenen Drucks bei allen drei ausgewählten Kompaktierungsdrücken bei ± 1 bar, bezogen auf die Materialfläche. Der auf die Gewebelagen aufgetragene Druck durch das Gewicht des Stempels liegt bei unter 0,1 bar und ist ebenfalls vernachlässigbar. Die Presstoleranz der Presse entspricht ± 5 bar, bezogen auf den Wert der Pressanzeige. Durch die Umrechnung liegt die Toleranz bei dem niedrigsten gewählten Druck von 28 bar bei unter 5 % und sinkt bei höheren Drücken.

Belastungs- und Entlastungsgeschwindigkeiten sowie Kompaktierungstemperatur sind konstant über die Kompaktierungsprozesse. Abweichungen der Geschwindigkeiten von den absolut ermittelten Werten, durch die oben beschriebenen Fehlerquellen, sind als systematischer Fehler bei allen Konfigurationen gleich und damit zu vernachlässigen. Geringe Abweichungen im Rahmen der menschlichen Ungenauigkeit von der Kompaktierungsdauer besitzen keinen merklichen Einfluss.

Der höchste Fehleranfälligkeit liegt beim Transfer der kompaktierten Lagen, die von der unteren heißen Metallplatte in den vorbereiteten VARI-Aufbau gelegt werden müssen. Dabei stellt vor allem das Gleitmittel auf dem Faser material einen Nachteil dar. Eine Verschiebung der Lagen wird durch eine vorsichtige Handhabung möglichst verhindert. Vor allem im Randbereich ist sie aber nicht vollständig auszuschließen. Ein Verrutschen der Gewebelagen gegeneinander hat zur Folge, dass einige Kompaktierungsmechanismen rückgängig gemacht werden. Dazu gehören zum Beispiel „Nesting“-Effekte zur Erhöhung der Packungsdichte. Aufgrund der Fehleranfälligkeit der Randbereiche werden die Zugproben nur aus dem mittleren Teil der FKV-Platten ausgesägt.

Durch die verwendete Variante des VARI-Verfahrens zeigen die hergestellten FKV-Platten eine geringe Anzahl an Fehlstellen. Die Herstellung d.h. der Aufbau und der Prozessablauf des VARI-Verfahrens wird zwischen den Konfigurationen gleich durchgeführt. Lediglich das Aufdrehen des Harz-Zulaufs, der händisch ein wenig geöffnet wird, sorgt für Unterschiede in der Infusionsgeschwindigkeit.

Bei der Zugprüfung ist ein Fehler zu nennen, der aufgrund von fehlerhaftem Einbau der Prüfapparatur zu Stande kommt. Die Klemmbacken für die Einspannung der Zugproben weisen nach dem Schließen eine leichte Versetzung auf, sodass die Probe schief eingespannt ist. Dies ist in Abbildung 33 veranschaulicht.

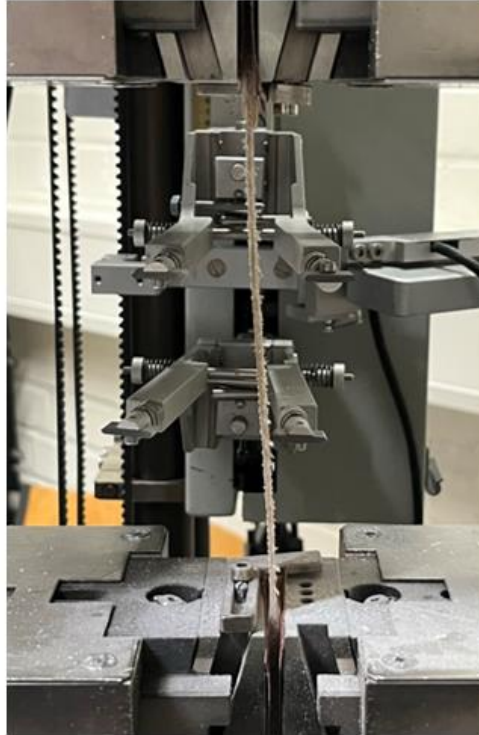


Abbildung 33: Schräge Einspannung der Proben während des Zugversuchs

Untereinander sind die Ergebnisse des Zugversuchs weiterhin vergleichbar. Jedoch sind die absoluten Werte mit Fehlern behaftet. Auf eine Wiederholung des Versuches kann aufgrund des Ziels des Versuches und der erhaltenen Ergebnisse verzichtet werden. Als vernachlässigbare Fehler sind die Toleranzen des Messschiebers und die Schwankungen im Normklima zu nennen.

Ein weiterer, bereits in der Auswertung diskutierter Fehler, ist die fehlende Unterscheidung in Kett- und Schussrichtung des Leinwandgewebes, die eine unterschiedliche Fadendichte besitzen. Die Anisotropie des Gewebes hat maßgebliche Auswirkungen auf die Ergebnisse und muss beachtet werden.

Bei der Auswertung der Schliffbilder ist zu beachten, dass nur kleine Ausschnitte der eingebetteten Proben und nochmals kleinere Ausschnitte der gesamten FKV-Platte betrachtet werden. Bei der Bewertung der Ergebnisse wird von einer Einheitlichkeit ausgegangen, die nicht gewährleistet ist. Für die Abmessungen der Garnquerschnitte und der Poren liegt ein Fehler beim Anklicken der zwei Punkte für die Abstandsmessung. Die Beurteilung der Ränder von Garn- und Porengrößen ist individuell und nicht einheitlich durchzuführen. Bei der Pore wird von einem idealen Rechteck und beim Garnquerschnitt von einer idealen Ellipse

ausgegangen. In der Realität liegen jedoch abweichende Querschnittsformen vor, sodass die Standardabweichungen unter anderem dadurch erklärt werden können. Bei den Verhältnissen der Breite zur Höhe des Garnquerschnittes ist zudem die Fadendichte der Garne nicht mit einbezogen.

In den Aufnahmen der Schliffbilder sind teilweise Risse zwischen den Fasern zu sehen. Bei weiterer Vergrößerung dieser Risse, wie in Abbildung 34 gezeigt, ist dies deutlich zu erkennen. Der Ursprung der Risse liegt vermutlich in der Feuchtigkeitsaufnahme der Schliffproben. Einige Aufnahmen der Schliffe sind nach einer Lagerzeit von ungefähr 6 Monaten bei Raumklima wiederholt worden. Erst nach dieser Zeit sind in allen Proben diese Risse erkennbar, die bei der Untersuchung direkt nach Erstellung der Schliffproben nicht vorhanden waren. Mit hoher Wahrscheinlichkeit haben die Fasern Feuchtigkeit aufgenommen und sind geschrumpft. Während der Arbeiten mit den Celluloseregenerat-Textilien ist ein hohes Schrumpfverhalten bei Wasseraufnahme aufgefallen. Auf dieses Materialverhalten wird in Kapitel 10, dem Ausblick, eingegangen.

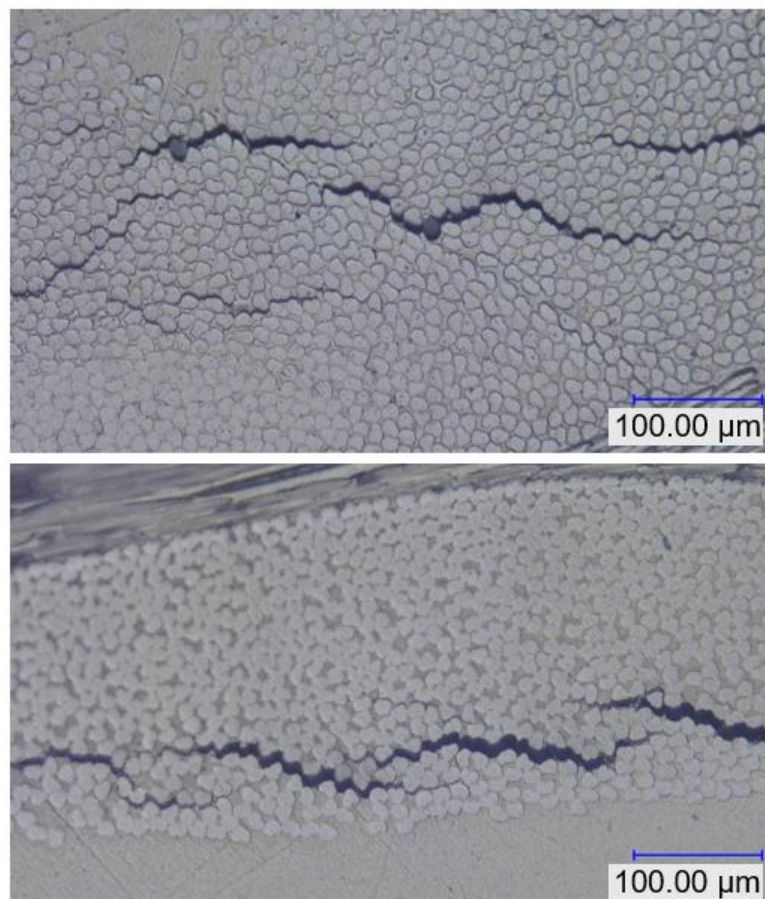


Abbildung 34: Über die Zeit entstanden Risse in den Schliffproben durch feuchtigkeitsinduziertes Schrumpfen der Celluloseregeneratfasern

6.4 Ergebnisse

Das Ziel der Ermittlung optimaler Kompaktierungsparameter ist zum Großteil über die durchgeführten Messungen gelungen.

Die durch die Thermopresse festgelegten Kompaktierungsgeschwindigkeiten können bestimmt werden und liegen bei 0,04 mm/s als Be- und auf 0,05 mm/s als Entlastungsgeschwindigkeit. Als optimale Kompaktierungstemperatur werden 120 °C und als optimale Kompaktierungsdauer 15 min in der TGA-Messung und der Kompaktierungsversuchen bestätigt.

Die Ergebnisse der Zugprüfung und der Schliffbilder zeigen die Uneinheitlichkeit des Köpergewebes mit Poren deutlich auf, welche das Ziel der Arbeit zur Findung optimaler Vorkompaktierungsparameter stark verkompliziert. Darum wird im Folgenden lediglich das Leinwandgewebe untersucht. Für dieses weisen die Ergebnisse daraufhin, dass eine Erhöhung des Kompaktierungsdrucks zu weiteren Steigerungen der Zugeigenschaften führen kann. Zudem zeigen die Ergebnisse die Anisotropie des Gewebes in Kett- und Schussrichtung, die im weiteren Verlauf der Arbeit berücksichtigt werden muss.

7 Teil II: Weitere Optimierung des Kompaktierungsdrucks

Dieses Kapitel befasst sich mit der Bestimmung des optimalen Kompaktierungsdrucks für das Leinwandgewebe bei ansonsten konstanten, in Kapitel 6 ermittelten Kompaktierungsparametern.

Aus dem ersten Teil der Arbeit können bereits erste Erkenntnisse über den Kompaktierungsdruck gewonnen werden, die allerdings nicht ausreichen, um einen optimalen Druck festzulegen. Es ist davon auszugehen, dass höhere Drücke die mechanischen Eigenschaften weiter erhöhen. Zudem ist der Unterschied der Fadendichte des Leinwandgewebes in Kett- und Schussrichtung in Kapitel 6 deutlich geworden, sodass eine Unterscheidung zwischen den beiden Richtungen erfolgen muss.

In diesem zweiten Teil der Arbeit soll der Zusammenhang zwischen mechanischen Kennwerten und FVG genutzt werden. Anstelle der Messdaten aus einem Zugversuch wird der FVG als entscheidender Kennwert zur Ermittlung des optimalen Kompaktierungsdrucks verwendet. Bei ansonsten konstanten Parametern zeigt dieser eine Abhängigkeit vom Kompaktierungsdruck.

Die Korrelation zwischen FVG und mechanischen Eigenschaften ist jedoch nur gegeben, sofern keine Faserschädigungen durch die hohen Kompaktierungsdrücke entstehen. Diese Faserschädigungen sollen im ersten Schritt anhand eines Garnzugversuchs ermittelt bzw. ausgeschlossen werden. Dabei werden Garne aus den Kett- und Schussrichtungen untersucht.

Es folgt eine Eingrenzung des optimalen Druckbereiches. Hierfür wird der Vorkompaktierungs- sowie Herstellungsprozess der FKV mithilfe einer Universalprüfmaschine bestmöglich nachgestellt bzw. simuliert. Als Ergebnis soll die Abhängigkeit des FVG vom Kompaktierungsdruck durch die Messwerte abgebildet werden.

Der aus der Simulation erhaltende Kompaktierungsdruckbereich wird wiederum durch Herstellung von FKV-Platten und Bestimmung deren FVG mit Dickenmessungen überprüft. Dies soll zur Ermittlung des optimalen Kompaktierungsdrucks führen.

7.1 Methodik

7.1.1 Garnzugversuch

Für den Garnzugversuch werden drei Lagen des Leinwandgewebes mit einer Größe von jeweils 450 mm x 45 mm mit den bereits festgelegten Kompaktierungsparametern und dem maximalen möglichen Druck der Presse kompaktiert. Dieser liegt bei der gewählten Textilgröße bei 428 bar. Die kompaktierten Lagen werden mit drei unkompaktierten Zuschnitten im Garnzugversuch verglichen. Aus der maximal erreichten Kraft der Garne, die

in diesem Fall dem Garnversagen entspricht, wird die Garnfestigkeit bestimmt. Diese entspricht üblicherweise der Bruchkraft pro Garnfeinheit und wird in cN/dtex angegeben [Che11]. Ist die Garnfestigkeit der Referenz höher als bei den kompaktierten Garnen, kann von einer Faserschädigung ausgegangen werden.

Die Lagen des Gewebes werden vorgetrocknet und direkt vor dem Versuch aus dem Ofen bzw. der Presse geholt. Es werden mindestens fünf äußere Garne verworfen und keine benachbarten Garne getestet. Pro Konfiguration werden 18 Garne getestet. In Tabelle 5 sind die vier Konfigurationen aufgeführt.

Tabelle 5: Konfigurationen im Garnzugversuch

Konfiguration	Gewebe- richtung	Vorkompaktierungsparameter			
		Temperatur in °C	Dauer in min	Geschwindigkeit in mm/s	Druck in bar
Ref_K	Kett				
Ref_S	Schuss				
428bar_K	Kett	120	15	0,04 (Belastung) und 0,05 (Entlastung)	428
428bar_S	Schuss				

Der Aufbau des Garnzugversuch ist an die DIN EN ISO 2062 angelehnt und in Abbildung 35 dargestellt. Der Versuch wird mit der Universalprüfmaschine der Firma ZWICKROELL GMBH & CO.KG des Types BZ1-MM 14450.ZW05 mit einer Kraftmessdose von 10 kN durchgeführt. Die Aufnahme der Messwerte sowie die Auswertung erfolgt mit Hilfe des Programmes *testXpert II*.

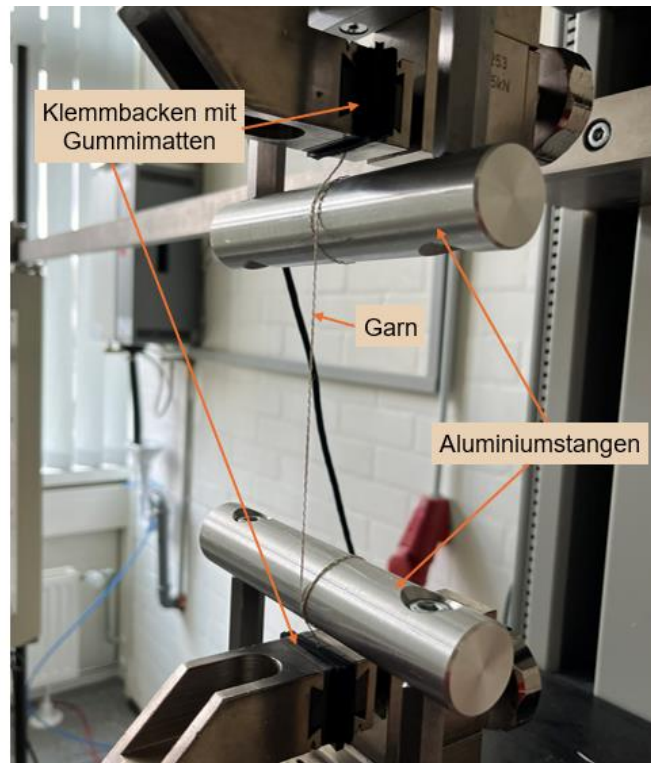


Abbildung 35: Aufbau des Garnzugversuches

Oben und unten befinden sich Klemmbacken, in die das Garn zwischen Gummimatten eingespannt wird. Zwischen den Klemmbacken befinden sich zwei Aluminiumstangen mit einem Durchmesser von 30 mm. Das Garn wird mindestens einmal um beide Stangen gewickelt. Diese Umwicklungen sorgen, durch die entstehende Reibung während der Prüfung, für eine verringerte Wahrscheinlichkeit des Rutsches des Garnes aus den Einspannungen. Der Bereich zwischen den Aluminiumstangen ist der aktive Messbereich.

Bei diesen Messungen wird nur eine Wicklung pro Stange durchgeführt und der aktive Messbereich auf 140 mm eingestellt. Die Vorkraft beträgt 2 N und die Prüfgeschwindigkeit liegt bei 100 mm/min.

7.1.2 Simulation von Vorkompaktierung und Herstellungsprozess des Faserverbundes in der Universalprüfmaschine

Zur Eingrenzung des Kompaktierungsdrucks für optimale mechanische Eigenschaften soll der FVG als ausschlaggebender Indikator genutzt werden. In Abbildung 8 (Kapitel 3.5) ist der Zusammenhang zwischen FVG und mechanischen Eigenschaften eines Faserverbundes dargestellt. Allgemein gilt, dass höhere FVG (ab Erreichen des kritischen FVG) zu höheren mechanischen Eigenschaften führen, sofern die Fasern vollständig von der Matrix umgeben sind und somit eine Krafteinleitung gewährleistet werden kann [May20].

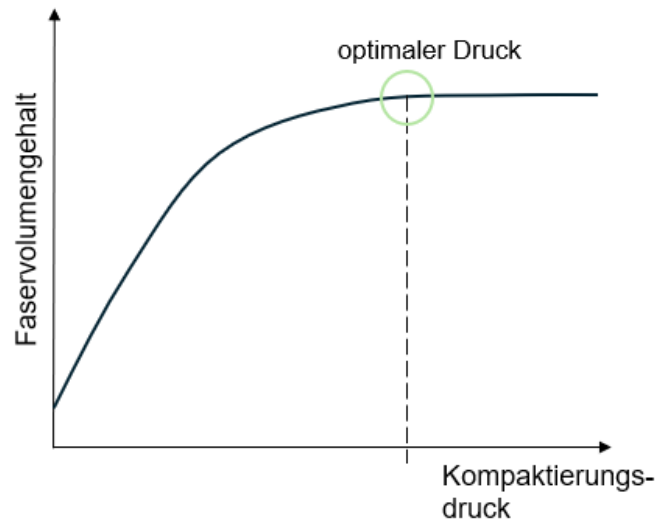


Abbildung 36: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen FVG und Kompaktierungsdruck

Zwischen dem FVG und dem Kompaktierungsdruck gibt es wiederum eine Abhängigkeit, die in Abbildung 36 beschrieben ist. Wird nur der Kompaktierungsdruck erhöht und alle anderen Kompaktierungsparameter konstant gehalten, steigt der FVG und erreicht ein Plateau, es handelt sich um ein nach oben beschränktes Wachstum. Eine weitere Druckerhöhung führt zu keinem verbesserten FVG, da die maximale Packungsdichte der Fasern erreicht ist, und mehr Energie und Zeit für die Druckaufbringung erfordert.

Der Kompaktierungsdruck beim Erreichen des Plateaus entspricht dem optimalen Kompaktierungsdruck und soll über eine Simulation in der Universalprüfmaschine gefunden werden. Der Zusammenhang aus Abbildung 36 gilt durch die Korrelation von FVG und mechanischen Eigenschaften ebenfalls für die resultierenden Eigenschaften des Faserverbands. Zu hohe Drücke können dafür sorgen, dass die Fasern nicht ausreichend von der Matrix umschlossen sind, was sich in einem Abfall der mechanischen Eigenschaften äußert. Im Faserverband müssten zudem trockene Stellen zu erkennen sein. Zudem dürfen die Fasern durch hohe Drücke nicht beschädigt werden, da sich dies ebenfalls negativ auswirkt.

Die Simulation erfolgt in der Universalprüfmaschine der Firma ZWICKROELL GMBH & Co.KG des Types BZ2-MM100TL.ZW01 mit einer Kraftmessdose von 100 kN und dem Programm *testXpert II*.

Der Aufbau entspricht der schematischen Darstellung links in Abbildung 22 aus Kapitel 6.1.3. Zwischen zwei Druckplatten werden drei Gewebezuschnitte einer Größe von 80 mm x 80 mm übereinander gelegt, sodass die Kett- bzw. Schussfäden der Lagen in eine Richtung zeigen. Zur Simulation wird zudem ein Stempel mit den Maßen 50 mm x 50 mm verwendet, welcher die eigentliche Probenfläche festlegt.

Für die Simulation wird die Prüfvorschrift der Kompaktierungsversuche über die Funktion „freie Versuchsdefinition“ angepasst. Es laufen drei Phasen ab, die die Vorkompaktierung bis hin zum vakuumierten VARI-Aufbau nachbilden. Der VARI-Prozess wird dabei nur bis zum Vakuumieren simuliert, da eine Dickenerhöhung durch die Matrix nicht nachgestellt werden kann. Neben dieser Abweichung können auch alle Kompaktierungsparameter nicht im Simulationsprozess abgebildet werden. Die Kompaktierungstemperatur liegt bei 23 °C anstatt bei 120 °C, da für die verwendete Prüfmaschine keine Heizvorrichtung vorhanden ist.

Der Kompaktierungsdruck wird je nach Messpunkt variiert, sodass am Ende eine Abhängigkeit zwischen dem Druck und der Dicke des Materials deutlich wird. Um die Abweichungen zu den Dicken eines real hergestellten FKV abschätzen zu können, werden die Drücke 28 bar, 38 bar und 48 bar untersucht, deren FVG aus dem ersten Teil der Arbeit bekannt sind. Für einen Zwischenversuch, der zum Verständnis der Funktionsweise, der für diese Arbeit verwendeten Thermopresse beiträgt, wird zudem eine bei 67 bar vorkompaktierte FKV-Platte hergestellt. Von dieser wird der FVG nach einer Dickenmessung berechnet und kann nun ebenfalls für den Vergleich zu realen Werten genutzt werden.

Am Ende der Simulation wird der Werkzeugabstand in mm ausgegeben, welcher der Dicke der Lagen entspricht. Mit dieser kann der FVG über die Gleichung 3.1 berechnet werden.

Der Ablauf der Simulation ist in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Phasen des Simulationsversuches

Nr.	Phase	Standardkraft in N	Geschwindigkeit in mm/s	Dauer in min
1	Vorkompaktierung	Variiert je nach Messpunkt	0,04 (Belastung)	15
2	Entlastung und Fertigstellung VARI-Aufbau	5	0,05 (Entlastung)	10
3	Vakuumieren im VARI-Aufbau	212,5	1	0,083

Die Standardkraft aus Phase 1 spiegelt den Kompaktierungsdruck wieder und stellt damit die variable Messgröße dar. Mit der gleichbleibenden Fläche werden die gewählten Drücke in die Standardkraft umgerechnet.

Die zweite Phase entspricht der Zeit von der Entnahme aus der Presse bis hin zum fertigen VARI-Aufbau, die ungefähr bei 10 min liegt. In dieser Zeit kommt es zur Rückstellung des Materials. Die 5 N Kraft ist wie bei den Kompaktierungsversuchen aus Kapitel 6.1.3 gewählt, um mit der Prüfmaschine das Rückstellverhalten aufzeichnen zu können.

In der letzten Phase wird das Material auf den Vakuumdruck kompaktiert und nach 5 s der Werkzeugabstand als Ergebnis ausgegeben.

7.1.3 Dickenmessung von Faserverbundplatten

Die Eingrenzung des optimalen Kompaktierungsdrucks, auf Basis der Ergebnisse der Simulation (vgl. Kapitel 7.2.2), soll durch Herstellung von FKV und Bestimmung der realen FVG überprüft werden. Aufgrund der Abweichungen zwischen Realität und Simulation wird nicht nur der ermittelte Druck, sondern auch ein höherer und ein niedriger Druck ausgewählt. Mit diesen Drücken sollen FKV hergestellt und der FVG bestimmt werden.

Die Kompaktierung der Gewebe findet weiterhin mit der Thermopresse KV214 der Firma RUCKS MASCHINENBAU GMBH statt. Aufgrund des maximalen hydraulischen Drucks der Presse von 320 bar (entsprechend der Druckanzeige der Presse bezogen auf die Fläche des Presszylinders) muss die Fläche der Proben verkleinert werden, um die ausgewählten Drücke zu realisieren. Es werden drei Faserverbundplatten der Größe 240 mm x 240 mm im VARI-Verfahren, entsprechend dem Vorgehen beschrieben in Kapitel 6.1.4.1, hergestellt. Die Konfigurationen sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Konfigurationen zur Messung der Dicke zur Bestimmung des FVG an hergestellten FKV-Platten

Konfiguration	Kompaktierungsparameter			
	Temperatur in °C	Dauer in min	Geschwindigkeit in mm/s	Druck in bar
67bar	120	15	0,04 (Belastung) und 0,05 (Entlastung)	67
100bar				100
150bar				150

Mit Hilfe einer Universalprüfmaschine der Firma ZWICKROELL GMBH & Co.KG des Types BZ1-MM 14450.ZW05 mit einer Kraftmessdose von 10 kN wird die Dicke der FKV-Platten gemessen. Der Aufbau ist in Abbildung 37 dargestellt.

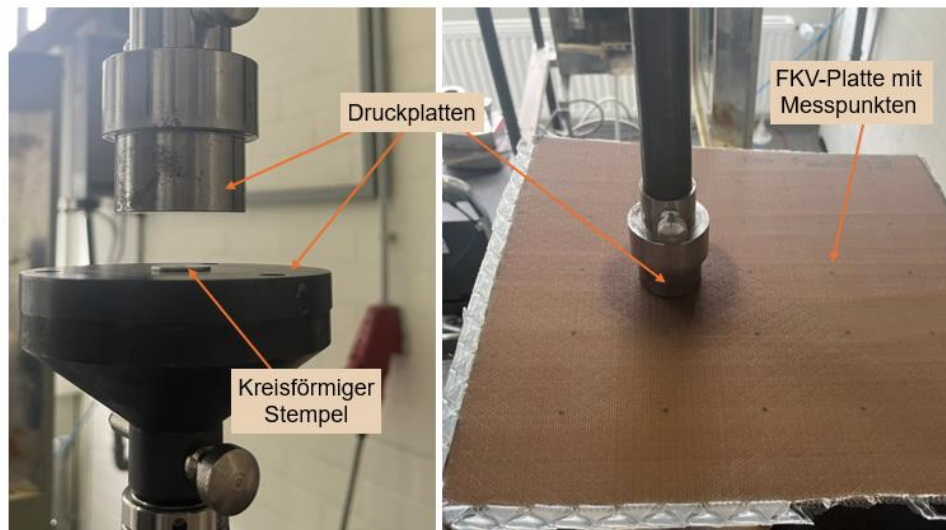


Abbildung 37: Aufbau der Dickenmessung von FKV-Platten

Die FKV-Platte wird zwischen zwei Druckplatten gelegt und die Dicke beim Erreichen einer Kraft von 30 N gemessen, indem der Werkzeugabstand als Ergebnis ausgegeben wird. Eine Scheibe mit einem Durchmesser von 20 mm fungiert als Stempel und minimiert die Fläche der Druckplatten. Die Dickenmessung erfolgt in der Realität jedoch in einem kleineren Bereich als der Stempelfläche. Aufgrund der Dickenvarianz der VARI-Platte wird der FKV nur an der dicksten Stelle im Bereich der Stempelfläche gemessen.

Auf den Platten wird ein Raster aufgezeichnet, sodass hinterher nachvollzogen werden kann, an welchen Positionen die jeweilige Dicke gemessen wird. Nach jeder Messung erfolgt das Verschieben der Platte zum nächsten Punkt des Rasters. Daraufhin wird das Messprogramm gestartet. Die Prüfgeschwindigkeit liegt bei 1 mm/min.

7.2 Auswertung

7.2.1 Garnzugversuch

In Diagramm 11 sind die Ergebnisse des Garnzugversuchs dargestellt. Es ist die Garnfestigkeit berechnet über die Bruchkraft pro Garnfeinheit zu sehen.

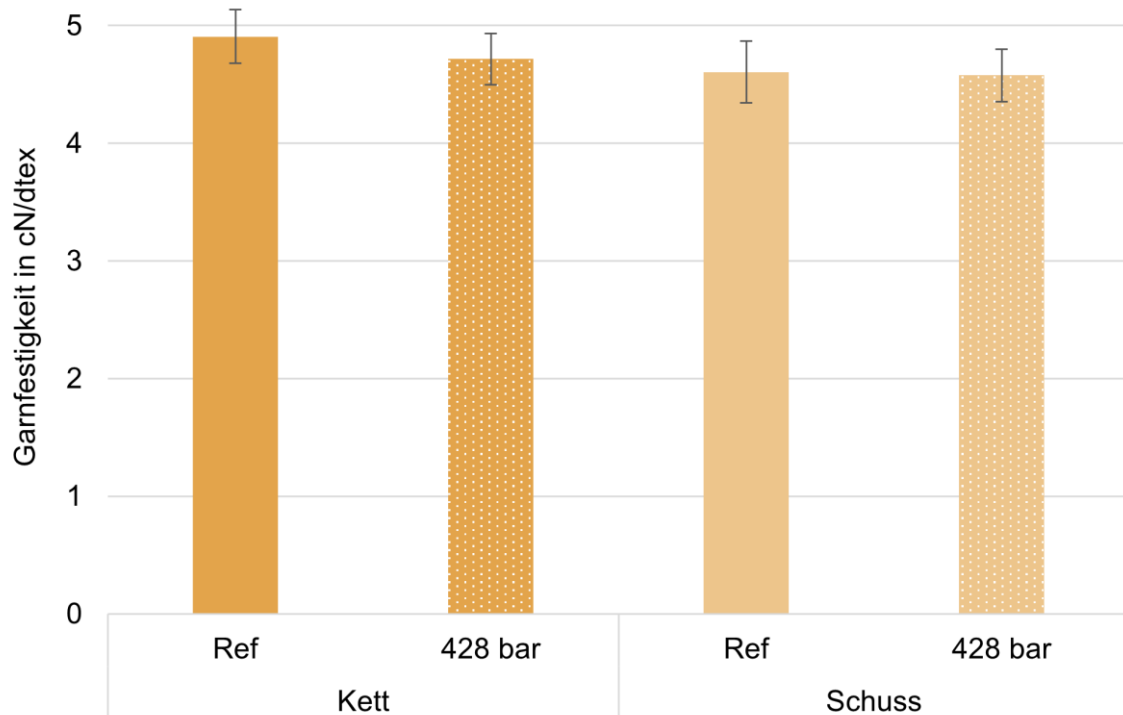


Diagramm 11: Festigkeiten der Garne des Leinwandgewebes ohne (Referenz) und nach Kompaktierung mit 428 bar

Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass die Garnfestigkeit zwischen Kett- und Schussrichtung sowie den unkompaktierten und kompaktierten Garnen unter Berücksichtigung der Standardabweichungen identisch ist.

Zwischen den Garnen aus Kett- und Schussrichtung zeigt sich nach der Entnahme aus dem Textil eine unterschiedliche Welligkeit, wie in Abbildung 38 zu sehen.



Abbildung 38: Welligkeit der ungeprüften Garne aus Schussrichtung (oben) und aus Kettrichtung (unten)

Diese ist bei den Schussfäden stärker. Dies liegt daran, dass die Fadendichte in Kettrichtung höher ist und die Schussfäden somit häufiger umgelenkt werden, was sich auf die Welligkeit auswirkt. Der Garnzugversuch zeigt, dass die Welligkeit keine gemessenen Auswirkungen auf die Garnfestigkeit besitzt, unabhängig davon, ob eine Vorkompaktierung stattgefunden hat oder nicht.

Außerdem kann durch die Prüfung eine Faserschädigung der Garne durch den hohen Kompaktierungsdruck von 428 bar auf den Textilizuschnitt ausgeschlossen werden. Die Werte der Garnfestigkeit der vorkompaktierten Garne liegt im gleichen Bereich wie der von den

Referenzen. Das bedeutet für die weiteren Versuche, dass auch der maximale Druck der Thermopresse keine Faserschädigung des Gewebes hervorrufen kann.

7.2.2 Simulation von Vorkompaktierung und Herstellungsprozess des Faserverbundes in der Universalprüfmaschine

Die angepassten Kompaktierungsversuche in der Prüfmaschine zeigen den in Diagramm 12 dargestellten Zusammenhang zwischen FVG und Kompaktierungsdruck. Bei dem Diagramm gilt es zu beachten, dass die y-Achse erst ab einem FVG von 45 % beginnt. Zudem handelt es sich bei den Messpunkten der Kompaktierungsdrücke 10 bar, 20 bar, 48 bar und 256 bar um jeweils einen Messwert, während die anderen Datenpunkte die Mittelwerte von drei bis sechs Messungen bilden.

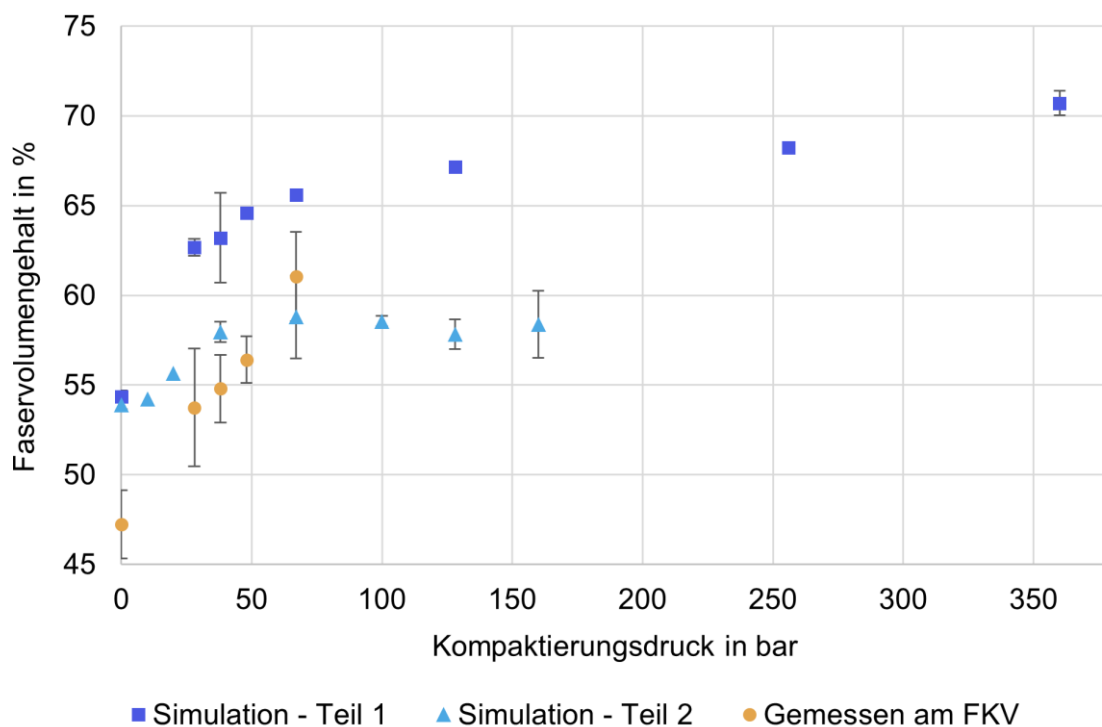


Diagramm 12: Darstellung der simulierten und gemessenen Werte des Faservolumengehalts in Abhängigkeit des Kompaktierungsdrucks

In Diagramm 12 sind drei Datenreihen zu erkennen. Dabei handelt es sich zum einen um die Werte aus der Simulation, die in zwei Teile separiert sind, und zum anderen um die Werte, die an real hergestellten FKV über Dickenmessungen berechnet werden. Die Separation erfolgt auf Basis der Abhängigkeiten des FVG von dem Kompaktierungsdruck. Die zwei Kurven aus der Simulation zeigen separat im Rahmen der Fehlertoleranzen den erwarteten Verlauf aus Abbildung 36 in Kapitel 7.1.2. Ohne die Separation der Messdaten in Teil 1 und Teil 2 passen diese nicht als eine Messkurve zusammen. Zwischen den beiden Teilen der Simulation werden allerdings keine Änderungen in Vorbereitung, Aufbau oder Vorgehensweise vorgenommen.

Die Simulationskurve Teil 2 scheint nach unten verschoben zu sein. Der Grund für dieses Verhalten kann nicht ermittelt werden.

In Simulation Teil 1 wird das Plateau scheinbar zwischen den Messpunkten bei 67 bar und 128 bar Kompaktierungsdruck erreicht. Allerdings weist das, in der Messung aufgenommene Plateau der Simulation Teil 1 auch oberhalb der 128 bar einen weiteren minimalen Anstieg auf. Anders als in der Annahme zur Korrelation zwischen FVG und Kompaktierungsdruck dargestellt (vgl. Abbildung 36), ist die Steigung im Plateau nicht bei Null. Die Definition des Starts des Plateaus wird darum erweitert. Der Beginn des Plateaus wird in dieser Arbeit bei einer Steigung von $\leq 0,05 \text{ \%}/\text{bar}$ zwischen zwei Messpunkten festgelegt. Dies erfolgt zum einen auf Grundlage der Messwerte. Zwischen den mit 128 bar und mit 360 bar kompaktierten Konfigurationen zeigt eine Druckerhöhung von über 230 bar lediglich eine Steigerung des FVG von ungefähr 3,5 %. In diesem Bereich liegt die Steigung des Plateaus bei $0,015 \text{ \%}/\text{bar}$. Zum anderen kann die, für die Herstellung der FKV-Platten verwendete Presse diese hohen Drücke auf die benötigte Materialgröße nicht aufbringen. Unter diesen Kriterien liegt der optimale Kompaktierungsdruck der Simulation Teil 1 zwischen 67 bar und 128 bar.

Bei Simulation Teil 2 scheint das Plateau zwischen 38 bar und 100 bar erreicht zu sein. Es wird deutlich, dass die Messwerte das Plateau nur im Rahmen der Standardabweichungen bilden, womit der Start dessen schwerer zu identifizieren ist. Die Fehlertoleranzen verhindern außerdem die eindeutige Bestimmung der Steigung zwischen den Messpunkten des Plateaus. Werden die oberen und unteren Fehlertoleranzgrenzen mit einbezogen liegt die Steigung zwischen den Daten der mit 100 bar und der mit 160 bar kompaktierten Konfigurationen maximal bei $0,03 \text{ \%}/\text{bar}$. Damit ist der Beginn des Plateaus der Simulation Teil 2 nach der festgelegten Definition zwischen 38 bar und 100 bar erreicht.

Die real ermittelten FVG zeigen in Diagramm 12 ebenfalls hohe Standardabweichungen, die aufgrund der Dickenvarianz der im VARI-Verfahren hergestellten Platten zu erklären sind.

Zudem sind im Diagramm Unterschiede der realen FVG zu den Werten der Simulationen zu erkennen. Verglichen zu der Simulation Teil 1 nimmt die Abweichung der Kurven zwischen den mit 28 bar bis hin zu den mit 67 bar kompaktierten Konfigurationen von ungefähr 9 % auf 4,5 % ab. Somit wäre zu erwarten, dass sich die Kurven bei höheren Drücken weiter annähern. Bei Simulation Teil 2 kommt es ebenfalls zu einer Annäherung der beiden Kurven. Die mit 67 bar kompaktierten Proben liegen aufgrund der hohen Standardabweichung im gleichen Bereich.

Eine Erklärung für die Unterschiede zwischen den Kurven der Simulationen zu der Kurve real gemessener FVG sind die Abweichungen in der Durchführung, da die Simulation die Realität nicht vollständig abbilden kann. Dies bezieht sich auf die Kompaktierungstemperatur und auf die Auswirkungen der Infusion mit der Matrix.

Aus anderen Arbeiten ist bekannt, dass eine niedrigere Kompaktierungstemperatur zu geringeren FVG führt [Ara16]. Andererseits sorgt die fehlende Matrix für einen Anstieg des FVG. Beide Faktoren wirken gegeneinander, wobei der Einfluss der Matrix höher bewertet wird. Dies belegen die Ergebnisse dadurch, dass die realen Werte generell unter den Simulationen liegen.

Für die Eingrenzung des optimalen Kompaktierungsdrucks werden die Ergebnisse beider Simulationen benötigt. Der optimale Druck wird bei einem Wert von ungefähr 100 bar vermutet. Aufgrund der fehlenden Reproduzierbarkeit zwischen den Simulationsteilen und den Abweichungen zur Realität, ist der Wert in den folgenden Untersuchungen zu belegen. Dabei sollen Kompaktierungsdrücke ober- und unterhalb der 100 bar ebenfalls betrachtet werden und über die Steigung zwischen den Messpunkten, nach der festgelegten Definition zum Plateau, der optimale Kompaktierungsdruck ermittelt werden.

Neben dem Ziel den optimalen Kompaktierungsdruck einzugrenzen konnte in dem Kompaktierungsversuch das Relaxations- und Rückstellverhalten aufgenommen werden. In Diagramm 13 ist das Relaxationsverhalten, verglichen zu den Werten aus den ersten Kompaktierungsversuchen aus Kapitel 6.2.2 gezeigt. Dabei wird auf die Darstellung des relativen Relaxationswertes bei einem Kompaktierungsdruck von 4 bar aus dem ersten Versuch verzichtet, da dieser mit einem Rückstellverhalten von ungefähr 25 % die anschauliche Darstellung der restlichen Werte verhindert.

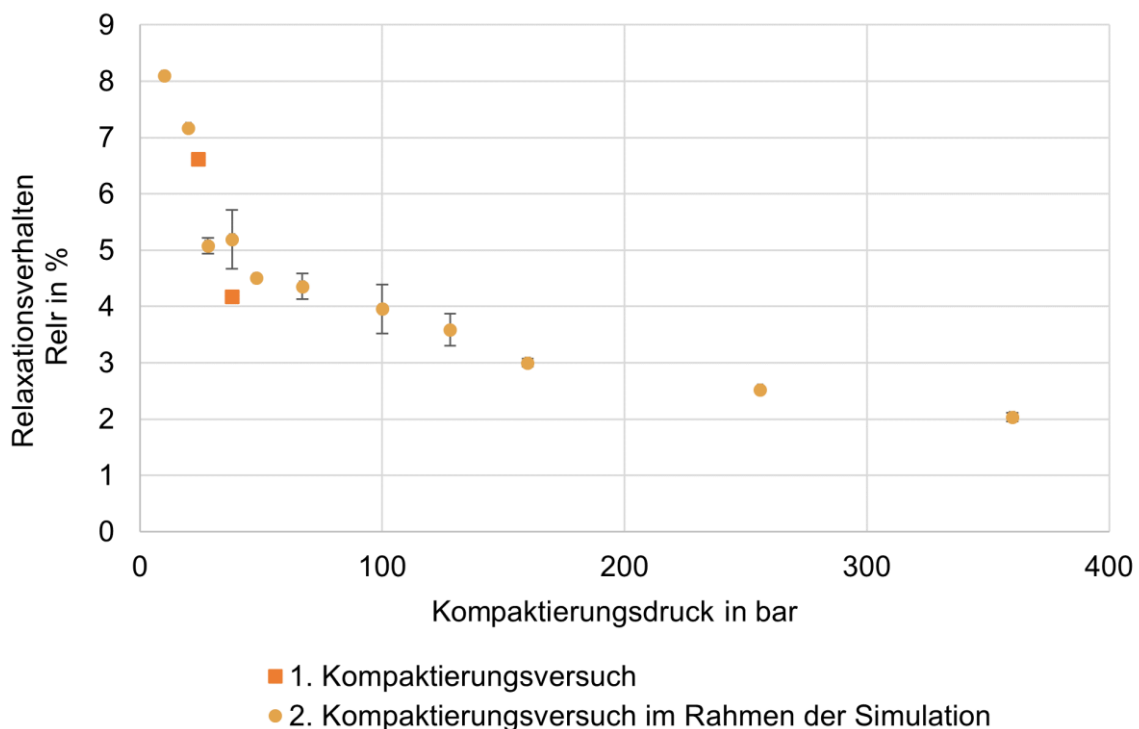


Diagramm 13: Vergleich der Relaxation des Leinwandgewebes im ersten und zweiten Kompaktierungsversuch bei unterschiedlichen Parametern

Die Parameter der beiden Kompaktierungsversuche unterscheiden sich in der Kompaktierungstemperatur und in der Prüfmaschine inklusive Kraftmessdose. Im zweiten Versuch liegt die Kompaktierungstemperatur mit 23 °C deutlich unter den 120 °C vom ersten Versuch. Trotzdem sind die Relaxationswerte ähnlich, doch eine eindeutige Aussage kann nur mit mehr Messpunkten des ersten Versuchs getroffen werden.

Entsprechend der Auswertung des ersten Kompaktierungsversuches zeigt auch der zweite Versuch eine Abnahme der Relaxation bei steigendem Druck, da die Reorganisation durch den verringerten Platz geschwächt wird. Durch die Kraftmessdose von 100 kN kann ein größerer Bereich betrachtet werden, in dem der Trend fortlaufend zu erkennen ist.

Im Diagramm 14 ist das Rückstellverhalten, aufgenommen in den beiden Kompaktierungsversuchen, dargestellt.

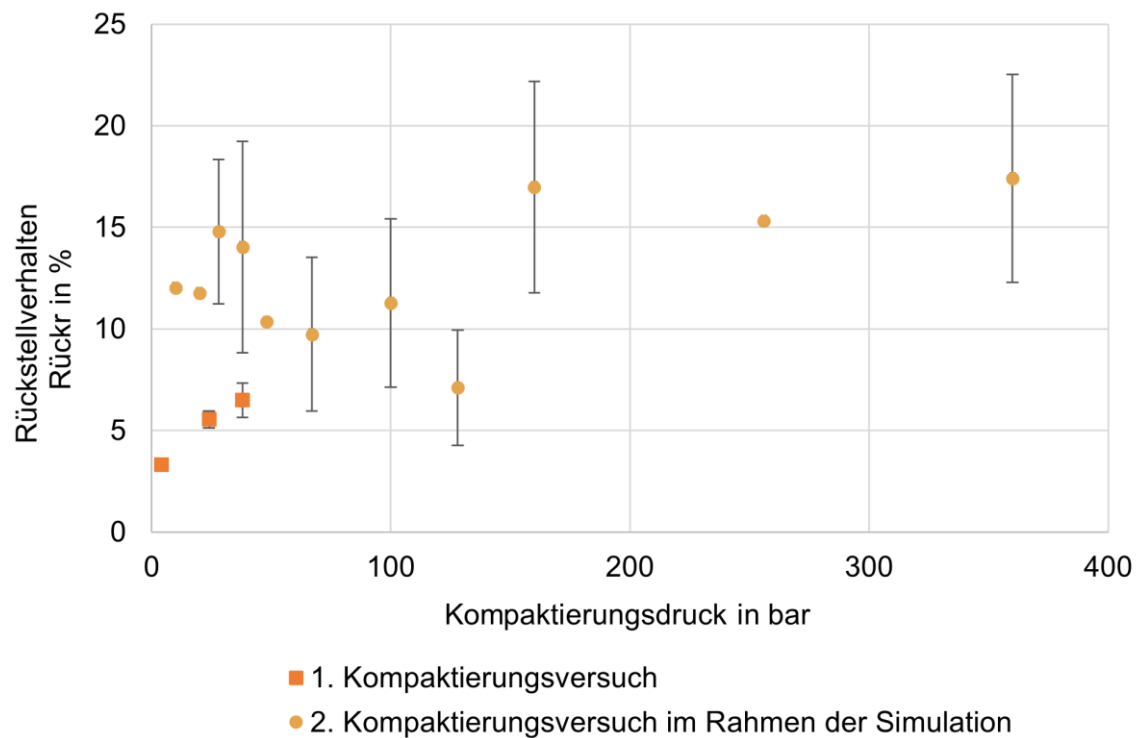


Diagramm 14: Vergleich des Rückstellverhaltens des Leinwandgewebes im ersten und zweiten Kompaktierungsversuch bei unterschiedlichen Parametern

Das Diagramm 14 zeigt im Gegensatz zum Relaxationsverhalten auffällige Unterschiede zwischen den Versuchen. Der zu erwartende Verlauf, der im ersten Kompaktierungsversuch nachgewiesen wurde, ist im zweiten durch die hohen Standardabweichungen nicht zu erkennen. Der ausschlaggebende Einflussfaktor auf diese Messwerte ist nicht die Temperatur, sondern die benutzte Kraftmessdose von 100 kN.

Die Verwendung dieser ist notwendig um die hohen Drücke zu simulieren. Allerdings muss für die kraftgesteuerte Aufnahme des Rückstellverhalten konstant eine, verglichen zur maximalen Kraft von 100 kN, sehr kleine Kraft von 5 N aufgebracht werden. Die verwendeten 5 N liegen jedoch bei 0,005 % der maximalen Kraft der Messdose. Diese Kraft scheint damit außerhalb

des Genauigkeitsbereich der Kraftmessdose zu liegen und die hohen Abweichungen hervorzurufen. Eine Erhöhung der 5 N ist ebenfalls nicht zielführend, da das Rückstellen bestenfalls bei einer Kraft von null stattfinden soll und höhere Kräfte die Werte ebenfalls verfälschen.

7.2.3 Dickenmessung von Faserverbundplatten

Aus den ermittelten Werten der Dickenmessung an den drei FKV-Platten können über Gleichung 3.1 die FVG der Konfigurationen ermittelt werden. Diese sind in Diagramm 15 dargestellt. Dabei gilt es zu beachten, dass die Achsen zur Übersichtlichkeit des Diagramms nicht bei Null beginnen.

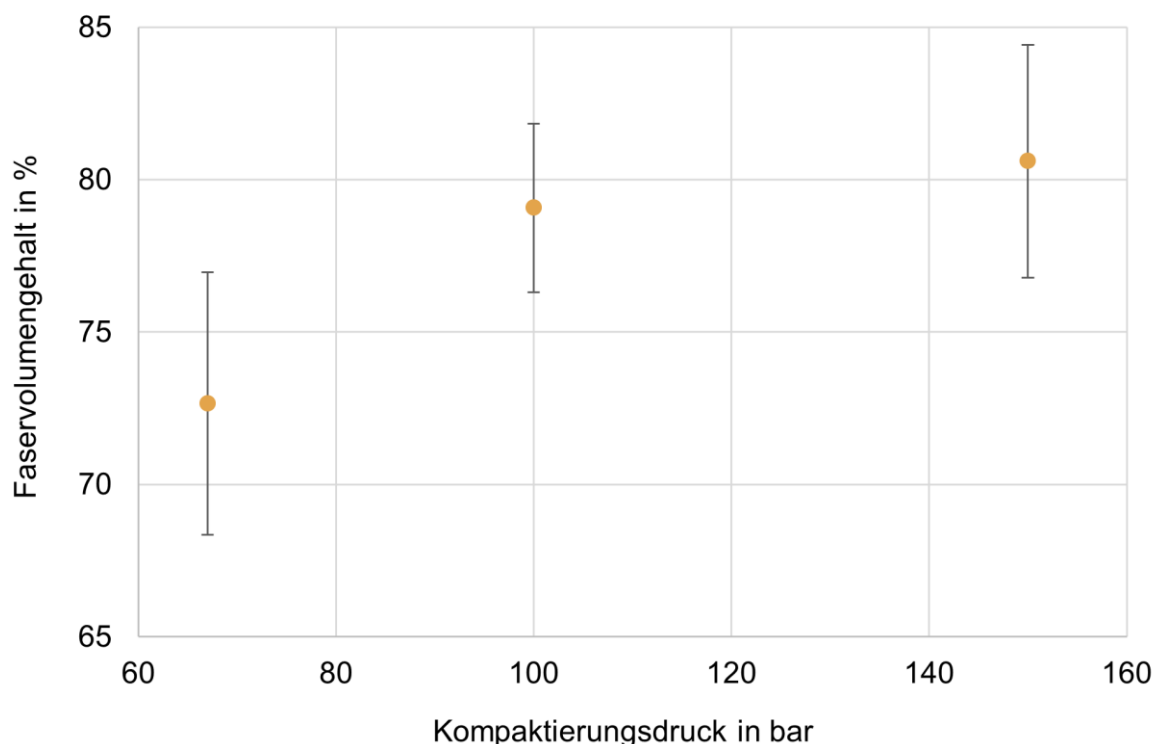


Diagramm 15: Faservolumengehalt der FKV-Platten in Abhängigkeit des Kompaktierungsdrucks

Die mit 100 bar und 150 bar kompaktierten Konfigurationen zeigen einen ähnlichen Wert von ungefähr 80 % FVG. Eine Vorkompaktierung von 67 bar führt zu einem FVG von knapp 73 %. Die Steigung zwischen dem gemittelten Wert des FVG der mit 67 bar und der mit 100 bar kompaktierten Konfiguration liegt bei knapp $0,2 \text{ \%}/_{\text{bar}}$. Hingegen ist sie zwischen den gemittelten FVG der Konfigurationen mit 100 bar und 150 bar Kompaktierungsdruck bei ungefähr $0,03 \text{ \%}/_{\text{bar}}$. Entsprechend der Definition des Plateaus, dessen Steigung $\leq 0,05 \text{ \%}/_{\text{bar}}$ betragen soll, liegt dessen Beginn und damit der optimale Kompaktierungsdruck bei einem Wert von etwa 100 bar.

Allerdings müssen die Standardabweichungen berücksichtigt werden, die auf die Dickenverteilung aufgrund des Herstellungsverfahrens zurückzuführen sind. Das VARI-Verfahren führt zur Variation der Dickenwerten einer ausgehärteten Faserverbundplatte und ist in Kapitel 3.7 in Abbildung 12 erläutert.

Die Fehlertoleranzen der, bei 67 bar kompaktierten FKV-Platte liegt im gleichen Bereich der beiden anderen Konfigurationen. Die Dickenvariation sorgt dafür, dass die dünnen Bereiche des mit 67 bar kompaktierten Verbundes den gleichen FVG aufweist wie die dickeren Bereiche der bei höheren Drücken kompaktierten Konfigurationen. Dies bestätigt, die in Abbildung 39 dargestellte Dickenverteilung der mit 67 bar und der mit 100 bar kompaktierten FKV-Platten.

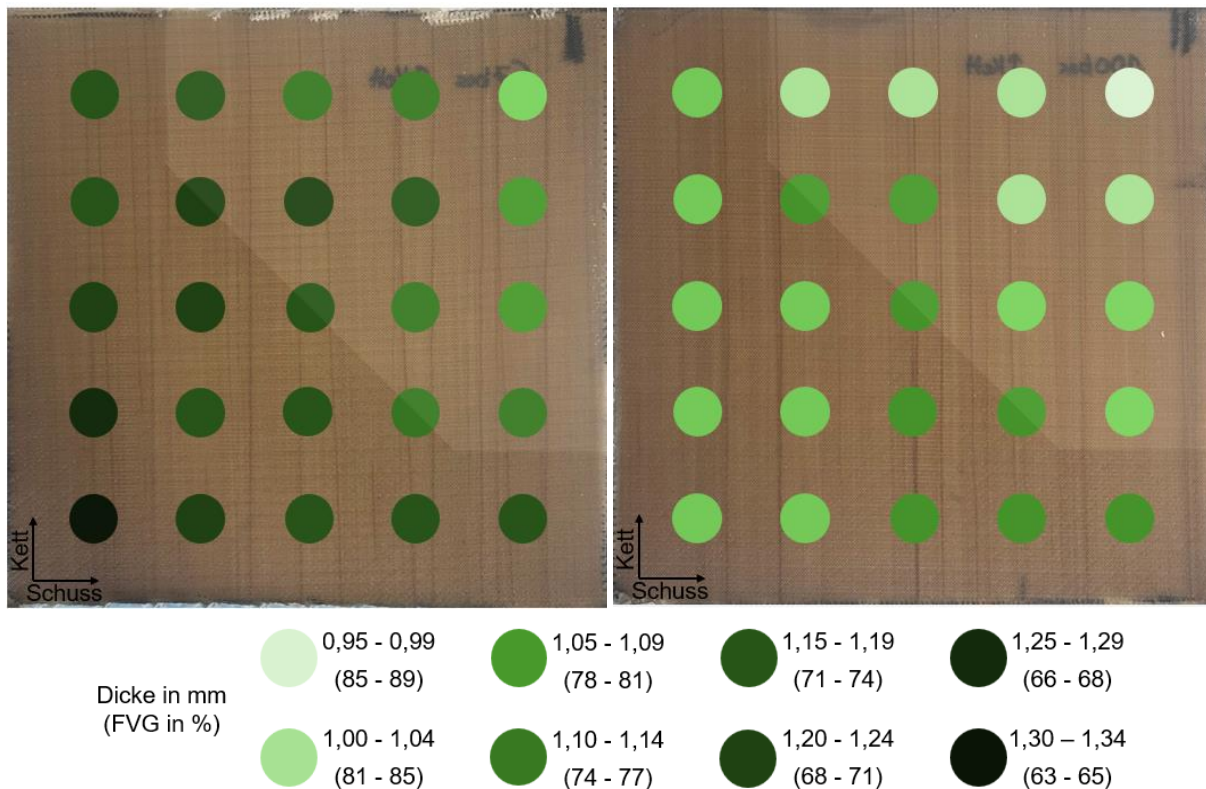


Abbildung 39: Dickenverteilung in mm der FKV der mit 67 bar kompaktierten Platte (links) und der mit 100 bar kompaktierten Platte (rechts)

Auf den Platten sind die Messpunkte durch die Kreise symbolisiert. Die Farben sollen zur schnelleren Einordnung der Dicken und Übersichtlichkeit der Verteilung dienen. Die Bedeutung der Farbskala und die zugehörigen Werte sind in der unten stehenden Legende nachzulesen. Der graue Schatten auf den Platten symbolisiert die Position der Fließhilfe während der Herstellung im VARI-Verfahren, die ebenfalls Einfluss auf die Dickenverteilung nehmen kann. Zudem gibt sie eine Orientierung für die Positionen des Harz-Zulaufs und des Vakuumanschlusses.

Über die Farbverteilung sind die Unterschiede zwischen den Dicken und damit auch den FVG der Platten deutlich zu erkennen. Zudem wird ersichtlich, dass sich Bereiche mit den gleichen

FVG in beiden Konfigurationen finden lassen. Bei der mit 67 bar kompaktierten Platte liegen diese in Richtung des Vakuuman schlusses. Dort sind die dünneren Bereiche zu finden, die einen höheren FVG aufweisen, da der Kompaktierungsdruck durch die Nähe zum Vakuuman schluss dort am höchsten ist. Bei der mit 100 bar kompaktierten Platte finden sich Bereiche mit ähnlicher Dicke und FVG auf Seiten der Harz-Zuläufe, wo der niedrigere Kompaktierungsdruck für höhere Dicken sorgt.

Abbildung 39 verdeutlicht, dass die Überschneidung der Fehlertoleranzen zwischen der mit 67 bar und mit 100 bar kompaktierten Platten in Diagramm 15 lediglich für einen kleinen Teilbereich sorgen, indem die FVG der Platten übereinstimmen.

Die gemessenen Dicken der Konfigurationen sowie die daraus berechneten FVG bestätigen den Beginn des Plateaus und damit den optimalen Kompaktierungsdruck bei 100 bar. Eine weitere Erhöhung führt zu keiner nennenswerten Steigerung im FVG des Verbundes (vgl. Diagramm 15).

7.3 Fehlerdiskussion

Im Garnzugversuch sollen Garne maximal kompaktierter Gewebezuschnitte mit unkompaktierten Garnen verglichen werden. Maximal bedeutet in dem Fall, dass der, von der verwendeten Thermopresse maximale Druck bezüglich der ausgewählten Fläche der Textilien aufgebracht wird. Die Bedienung der Presse zeigt nach dem Versuch, dass eine Druckerhöhung von 428 bar auf der Textilfläche von 450 mm x 45 mm zu 490 bar möglich gewesen wäre und nicht der maximale Druck der Presse genutzt wird. Dies stellt keine Fehler für die Ergebnisse dar, sondern bietet einen Vorteil für die weiteren Versuchsreihen.

Eine mögliche Fehlerquelle im Garnzugversuch ist die Feuchtigkeitsaufnahme der Garne. Durch Entnahme eines einzelnen Gewebequerschnittes aus der Presse bzw. dem Ofen wird die Feuchtigkeitsaufnahme möglichst unterbunden. Aus einem Zuschnitt werden sechs Garne getestet, wobei die Zeit für die Feuchtigkeitsaufnahme bis zur Prüfung zwischen dem ersten und dem letzten Garn variiert. Die Ergebnisse der getesteten Garne eines Gewebezuschchnittes zeigen keinen Zusammenhang mit der Feuchtigkeitsaufnahme, sodass diese zu vernachlässigen ist.

Das Garnversagen während des Versuches erfolgt häufig nahe der Wicklungen um die Aluminiumstangen und nur selten eindeutig im Bereich der freien Messlänge. Dies ist kein ideales Bruchverhalten, aber aufgrund der geringen Standardabweichungen der ermittelten Garnfestigkeiten zu vernachlässigen.

Die Abweichungen der Simulation vom realen Kompaktierungs- und VARI-Prozess ist in der Versuchsplanung und der Auswertung berücksichtigt. Durch vorherige Arbeiten können die Auswirkungen im Rahmen des Ziels der Simulation interpretiert werden.

Die Veränderungen in den Ergebnissen zwischen Simulation Teil 1 und 2 unterliegen einer unbekannten Fehlerquelle. Da sowohl an der Vorbereitung, am Aufbau und am Vorgehen nichts verändert wird, kann der nach unten verschobene Verlauf der zweiten aufgenommenen Kurve nicht erklärt werden. Trotzdem ist die Eingrenzung des optimalen Kompaktierungsdrucks aus dem ermittelten Zusammenhang zum FVG erfolgreich und das Ziel der Simulation wird erreicht.

Die Aufnahme der Relaxation bei dem simulierten Kompaktierungsprozess zeigt den erwarteten Verlauf der Messwert, während die ermittelten Daten des Rückstellverhalten aufgrund zu hoher Standardabweichungen nicht zu interpretieren sind. Die benötigte Kraft von 5 N, die während der Aufnahme des Rückstellens auf das Materials wirken soll, scheint außerhalb des Genauigkeitsbereichs der Kraftmessdose der Prüfmaschine zu liegen.

Bei der Dickenmessung ist die Fehlertoleranz der Kraftmessdose vernachlässigbar klein. Hingegen kann das auf die FKV-Platten aufgezeichnete Punkteraster der Messpunkte nur mit einer Toleranz eines 10 mm Radius eingehalten werden. Aufgrund der Größe der gesamten FKV-Platte, verglichen zu dem Radius der Toleranz, kann trotzdem ein Überblick über die Dickenverteilung der Platten gewonnen werden. Die gesamte Platte wird vermessen und die Auswirkungen auf die gemittelten Werte des FVG sind vernachlässigbar klein.

Die Fehlerdiskussion verdeutlicht, dass die Fehlerquellen lediglich zu vernachlässigende Einflüsse auf die Ergebnisse besitzen, die zum Erreichen des Ziels der Arbeit beitragen.

7.4 Ergebnisse

Der Garnzugversuch zeigt, dass die Garnfestigkeiten zwischen Garnen aus Kett- und Schussrichtung im gleichen Bereich liegen, obwohl die Garne eine unterschiedliche Welligkeit aufgrund der Fadendichten aufweisen. Die Garnfestigkeiten der Garne aus den 428 bar kompaktierten Gewebelagen sind ebenfalls identisch zu den unkompaktierten Referenzen. Somit kann eine Faserschädigung bis zu einem Kompaktierungsdruck von 428 bar ausgeschlossen werden.

Aus der Simulation des Kompaktierungs- und Herstellungsprozesses bis hin zum Start der Infusion ergibt sich ein Zusammenhang zwischen dem FVG und dem Kompaktierungsdruck, der dem angenommenen Verlauf aus Abbildung 36 ähnelt. Eine Abweichung findet sich in der Steigung des Plateaus, die nicht Null beträgt. Entsprechend der aufgenommenen Messwerte wird der Start des Plateaus, der den optimalen Kompaktierungsdruck symbolisiert, bei einer Steigung von $\leq 0,05 \text{ \%}/_{bar}$ zwischen den Messpunkten definiert. Auf Grundlage dieses Kriteriums liegt der optimale Kompaktierungsdruck gemittelt zwischen den beiden Simulationskurven bei ungefähr 100 bar.

Trotz der Abweichungen zur Realität, aufgrund fehlender Temperatur und Matrix, wird der optimale Druck von 100 bar nach Dickenmessungen der mit 67 bar, 100 bar und 150 bar

kompakterter Konfigurationen bestätigt. Die FVG der mit 100 bar und 150 bar kompaktierten Platten liegen beide innerhalb des definierten Plateaus. Obwohl sich die Standardabweichungen der 67 bar- und 100 bar-Konfigurationen überschneiden, zeigt die mit 100 bar kompaktierte Konfiguration über die gesamte Platte gemittelt einen Anstieg im FVG. Zudem ist eine Steigung von knapp $0,2 \text{ \%}/_{\text{bar}}$ zwischen den Messpunkten festzustellen. Somit ist das definierte Plateau bei 67 bar noch nicht erreicht und der optimale Druck wird auf 100 bar festgelegt.

Es ist nicht auszuschließen, dass ein Druck zwischen 67 bar und 100 bar den Start des Plateaus präziser abbildet. Eine weitere Eingrenzung wird jedoch unter Abwägung von Aufwand und Nutzen im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

8 Teil III: Beurteilung der Optimierung

Zur Einordnung der ermittelten Parameter für einen optimalen Kompaktierungsprozess wird ein Vergleich zwischen un- und vorkompaktierten Geweben in Kett- und Schussrichtung vorgenommen. Im Rahmen der Arbeit werden dafür Zugprüfungen und Permeabilitätsmessungen durchgeführt.

Der FVG der hergestellten FKV-Platten wird als wichtiger Kennwert zur Beurteilung der Ergebnisse nach einer Dickenmessung berechnet.

Die Zugprüfung soll einen ersten Überblick über die tatsächliche Veränderung der Zugeigenschaften der vorkompaktierten Faserverbunde gegenüber der Referenz zeigen. Zur vollständigen Betrachtung der mechanischen Eigenschaften müssen weitere Prüfungen durchgeführt werden, auf die in Kapitel 10 eingegangen wird.

Die Permeabilitätsmessung gibt durch den Permeabilitätswert eine Aussage über den Herstellungsprozess an sich. Er ist ein entscheidender Materialkennwert, um Veränderungen in den Prozesszeiten ableiten zu können.

Im praktischen Anwendungsfall muss zwischen der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und dem erhöhten Aufwand bei der Herstellung durch den zusätzlichen Schritt der Vorkompaktierung sowie der längeren Herstellungszeit im VARI-Verfahren abgewogen werden.

8.1 Methodik

8.1.1 Dickenmessung und Zugversuch

Zur Durchführung des Zugversuches werden zunächst FKV-Platten im VARI-Verfahren mit und ohne Vorkompaktierung hergestellt. Dies erfolgt entsprechend dem in Kapitel 6.1.4.1 beschriebenen Verfahren. Lediglich die Größe der Platten wird auf 315 mm x 315 mm minimiert, um den für die Konfiguration benötigten Druck mit der Thermopresse KV214 der Firma RUCKS MASCHINENBAU GMBH realisieren zu können. Der Kompaktierungsprozess erfolgt nach der gleichen Vorgehensweise wie in den vorherigen Teilen beschrieben. Bei der Orientierung der Faserlagen wird entsprechend der Konfiguration darauf geachtet, dass Kett- und Schussfäden der drei Lagen jeweils in dieselbe Richtung zeigen. Die jeweils angegebene Lagenorientierung (K oder S) der Konfigurationsbezeichnung in Tabelle 8 bezieht sich auf die spätere Zugrichtung. Entsprechend liegen z.B. bei der Konfiguration Ref_K die Kettfäden parallel und die Schussfäden senkrecht zur Zugrichtung.

Tabelle 8: Konfigurationen des Zugversuchs zum Vergleich un- und optimal vorkompakter FKV

Konfiguration	Geweberichtung	Kompaktierungsparameter			
		Temperatur in °C	Dauer in min	Geschwindigkeit in mm/s	Druck in bar
Ref_K	Kett				
Ref_S	Schuss				
100bar_K	Kett	120	15	0,04 (Belastung) und 0,05 (Entlastung)	100
100bar_S	Schuss				

Zur Ermittlung des FVG werden die FKV-Platten vor der Weiterverarbeitung für die Zugprüfung in ihrer Dicke vermessen. Dies geschieht nach der Vorgehensweise in Kapitel 7.1.3.

Die Herstellung der Zugproben und die Durchführung des Zugversuchs erfolgen, wie in Kapitel 6.1.4.2 und 6.1.4.3 beschrieben. Es werden insgesamt 11 Proben je Konfiguration getestet.

8.1.2 Permeabilitätsmessung

In dieser Arbeit werden 2D-Ebenpermeabilitätsmessungen durchgeführt. Es werden zwei Konfigurationen gemessen, die in Tabelle 9 aufgelistet sind. In den 2D-Messungen werden die Permeabilitäten in Kett- und Schussrichtung gleichzeitig aufgenommen, sodass keine Unterteilung der Konfigurationen erforderlich ist.

Tabelle 9: Konfigurationen für die Permeabilitätsmessung zum Vergleich un- und optimal vorkompakter FKV

Konfiguration	Kompaktierungsparameter			
	Temperatur in °C	Dauer in min	Geschwindigkeit in mm/s	Druck in bar
Ref				
100bar	120	15	0,04 (Belastung) und 0,05 (Entlastung)	100

Entsprechend der zur Verfügung stehenden Arbeitsfläche des Messstandes werden die Gewebezuschneide in der Größe 250 mm x 250 mm zugeschnitten und bei 105 °C für mindestens 2 h vorgetrocknet. Der verwendete Messstand besitzt einen mittigen Anguss mit einem Durchmesser von 10 mm, sodass in den Gewebelagen ein gleichgroßes Loch eingebracht werden muss. Dafür werden die drei Lagen zunächst mit jeweils Kett- und Schussfäden in gleicher Richtung übereinander gestapelt und das Loch für den Anguss mit einem Stanzwerkzeuges in einer hydraulische Handpresse eingebracht. Der Vorgang ist in

Abbildung 40 dargestellt. Das Stanzen der Referenz erfolgt direkt nach Entnahme aus dem Ofen und bei den anderen Konfiguration direkt nach der Kompaktierung.

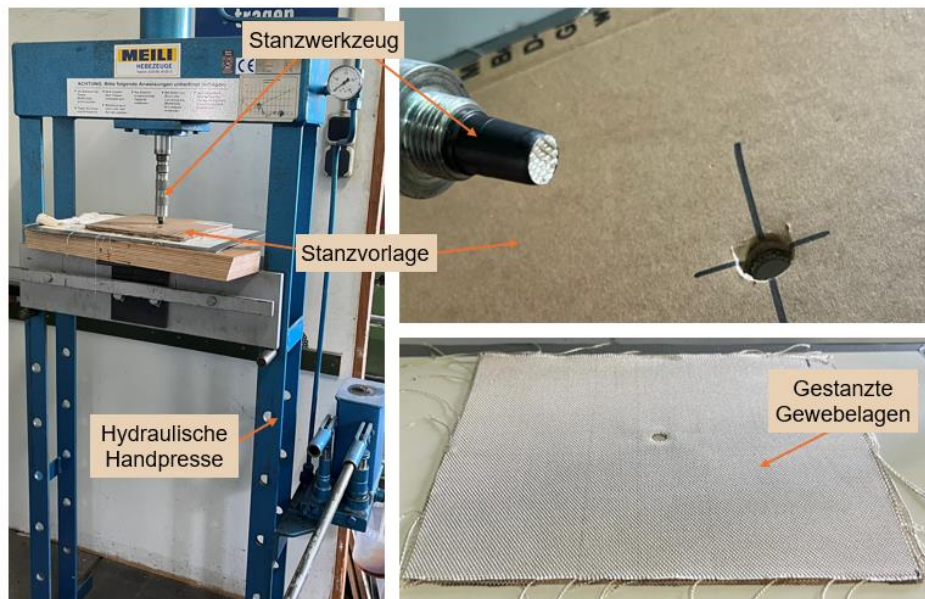


Abbildung 40: Darstellung des Stanzprozesses mit der hydraulischen Handpresse

Die Vorkompaktierung erfolgt mit den in Tabelle 9 beschriebenen Parametern. Die Fläche der Gewebelagen wird durch zusätzliche Zuschnitte von 250 mm x 250 mm auf 315 mm x 315 mm entsprechend der Größe der Gewebelagen des Zugversuches erhöht. Dafür werden für einen Vorkompaktierungsvorgang sechs Zuschnitte der Größe 330 mm x 55,6 mm benötigt, von denen jeweils drei Lagen gestapelt links und rechts, neben den für die Messung benötigten Zuschnitten, platziert werden. Der Aufbau in der Presse ist in Abbildung 41 zu sehen.

Dieses Vorgehen ist aufgrund einer Fehlerquelle notwendig, die in Kapitel 8.3 detailliert erläutert wird.

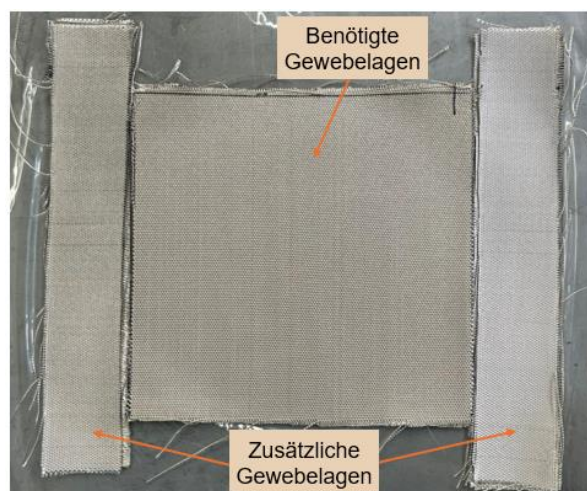


Abbildung 41: Gewebelagen nach dem Pressvorgang für den Permeabilitätsversuch

Zur Messung der Permeabilität wird ein Messstand verwendet, der durch Verknüpfung mit Kamera und Computer über ein Matlab-Skript die Fließfronten aufnimmt und auswertet. Er ermöglicht ungesättigte 1D- und 2D-Ebenenpermeabilitätsmessungen. In dieser Arbeit wird eine 2D-Messung durchgeführt, deren Aufbau in der folgenden Abbildung 42 dargestellt ist.

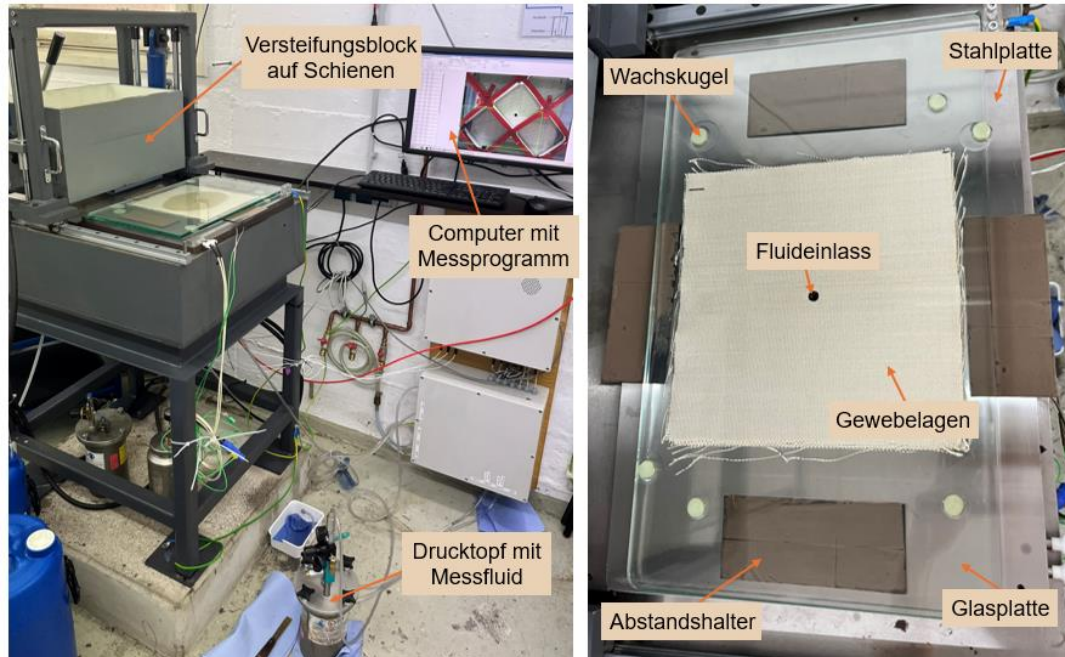


Abbildung 42: Aufbau des Permeabilitätsmesstands

In dem Messstand liegt das Textil zwischen einer Stahl- und einer Glasplatte. Die Stahlplatte bildet die untere Werkzeughälfte. Sie besitzt eine zentral gesetzte Bohrung zum Fluideinlass. Die gestanzten und gestapelten Gewebelagen werden vorsichtig in den Messstand gelegt, ohne dass sich diese gegeneinander verschieben. Dabei wird das gestanzte Loch mit dem Fluideinlass deckungsgleich gelegt. Neben dem Gewebeaufbau werden Abstandshalter platziert. Diese sind nach den gemittelten Dicken der FKV-Platten, entsprechend den Ergebnissen aus Kapitel 8.2.1, ausgewählt. Bei der Referenz beträgt die Höhe 1,6 mm und bei der vorkompaktierten Konfiguration 1,2 mm.

Zur Kontrolle der tatsächlichen Kavitätshöhe wird Wachs erwärmt, zu kleinen Kugeln geformt und neben dem Textil platziert. Nach der Messung werden sie in ihrer Dicke vermessen. Um die Wachskugeln für die Dickenbestimmung besser vom Aufbau lösen zu können, werden einige Tropfen des Messfluids als Trennmittel verwendet. Nun wird die Glasplatte, als obere Werkzeughälfte, aufgelegt und ein Versteifungsblock mit Hilfe eines Schienensystems über die Glasplatte geschoben. Mit einer Handpumpe wird er auf den Aufbau abgelassen und ungefähr 100 bar Druck auf diesen aufgebracht. Der Versteifungsblock ist mit Verstrebungen aufgebaut, um eine hohe Steifigkeit für den Druckaufbau zu gewährleisten, und gleichzeitig den Aufbau für die Fließfrontaufnahme mit der Kamera nicht zu verdecken.

Beim Start der Messung wird das Fluid aus dem Drucktopf über den zentralen Einlass in die Kavität gedrückt. Am Einlass befindet sich dabei ein Drucksensor, der den dort ankommenden Druck aufnimmt. Bei dem Messfluid handelt es sich um das Silikonöl AK 100 der Firma WACKER CHEMIA AG aus München. Zur genauen Bestimmung der Viskosität des Fluids befindet sich ein Temperatursensor im Raum des Messstandes, da die Viskosität temperaturabhängig ist. Diese Abhängigkeit ist im Matlab-Skript hinterlegt, sodass entsprechend der vorliegenden Raumtemperatur der passende Viskositätswert in den Berechnungen der Permeabilitäten mit einfließt.

Das Intervall zur Aufnahme der Fließfronten, d.h. die Aufnahme eines Bildes durch die Kamera, während der Messung kann je nach Dauer der Messung und Fließgeschwindigkeit des Fluids im Textil angepasst werden. Für alle Messungen ist ein Intervall von 1 s ausgesucht worden. Während der Messung wird ein Live-Bild der Kamera auf dem Computer gezeigt, sodass der Fließfortschritt beobachtet und die Messung beendet werden kann, wenn die Fließfront den Rand des Textils erreicht.

Nach Beendigung einer Messung werden zunächst die Wachskugeln in ihrer Dicke vermessen und die Werte in das Matlab-Auswerteskript eingetragen. Ebenso wird das Flächengewicht des Textils, die Lagenanzahl und die Dichte der Fasern in das Programm eingegeben. Die Position des Einlasses und eine Hauptrichtung des Textils werden im Programm entsprechend der Lage des Textils angepasst und die automatische Auswertung des Programms kann gestartet werden. Für diese werden verschiedene Linien und Bereiche von dem Programm über die aufgenommenen Bilder gelegt, die in Abbildung 43 zu sehen sind.

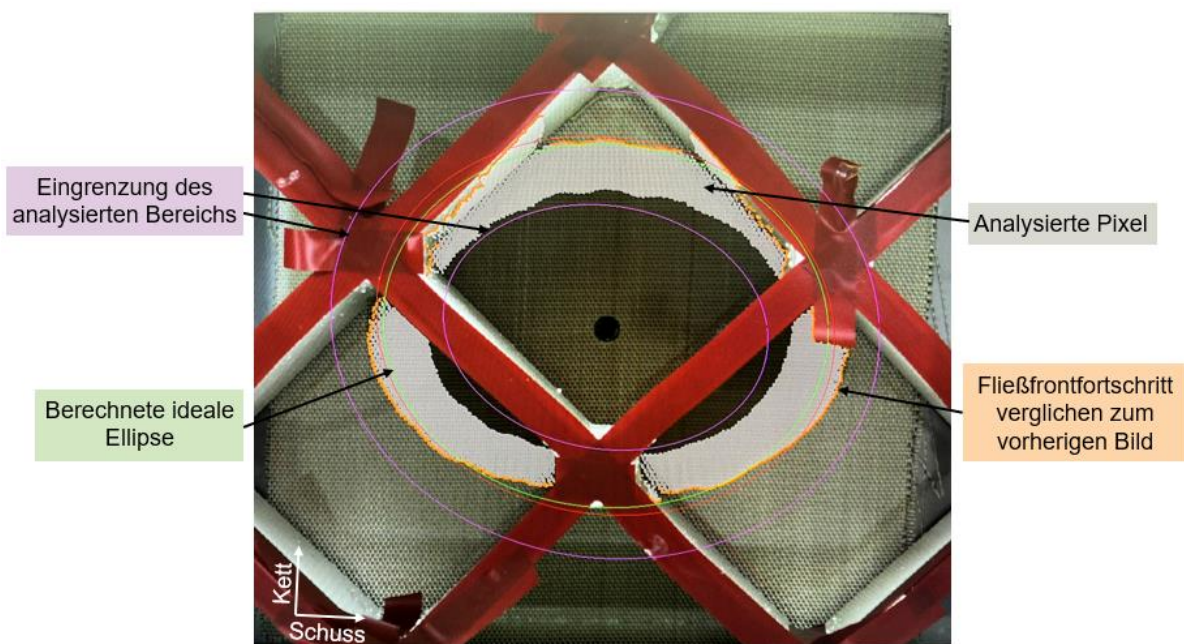


Abbildung 43: Darstellung der Auswertung der Permeabilitäten vom Messprogramm

Das Programm vergleicht bei der Auswertung die Veränderungen zwischen nacheinander aufgenommenen Fotos. Der Bereich, in dem das Programm sucht, ist dabei mit zwei lila Ellipsen umrandet. In orange sind die Pixel dargestellt, die eine Veränderung in der Fließfront zum vorherigen Bild darstellen. In hellgrün ist die ideal berechnete Ellipse der Fließfront auf dem vorliegenden Foto markiert.

Über die aufgenommenen Daten werden die Permeabilitäten in den beiden Hauptrichtungen über die Zeit von dem Matlab-Auswerteskript bestimmt. Die Berechnung erfolgt nach dem Prinzip der Gleichung 3.5. Die genaue Formel, deren Herleitung über Annahmen bezogen auf den verwendeten Messstand erfolgt, kann in [Dic15] nachgelesen werden.

8.2 Auswertung

8.2.1 Faservolumengehalt

Die über die Dicke berechneten FVG sind in Diagramm 16 dargestellt. Eine Unterscheidung je nach Orientierung der Kett- und Schussfäden, d.h. des Lagenaufbaus, ist nicht notwendig. Der VARI-Aufbau besitzt eine Symmetrie entlang der Diagonalen ausgehend von Vakuumanschluss, sodass die Orientierung der Kett- und Schussfäden aller Lagen keinen Einfluss auf den, über die FKV-Platte gemittelten FVG hat.

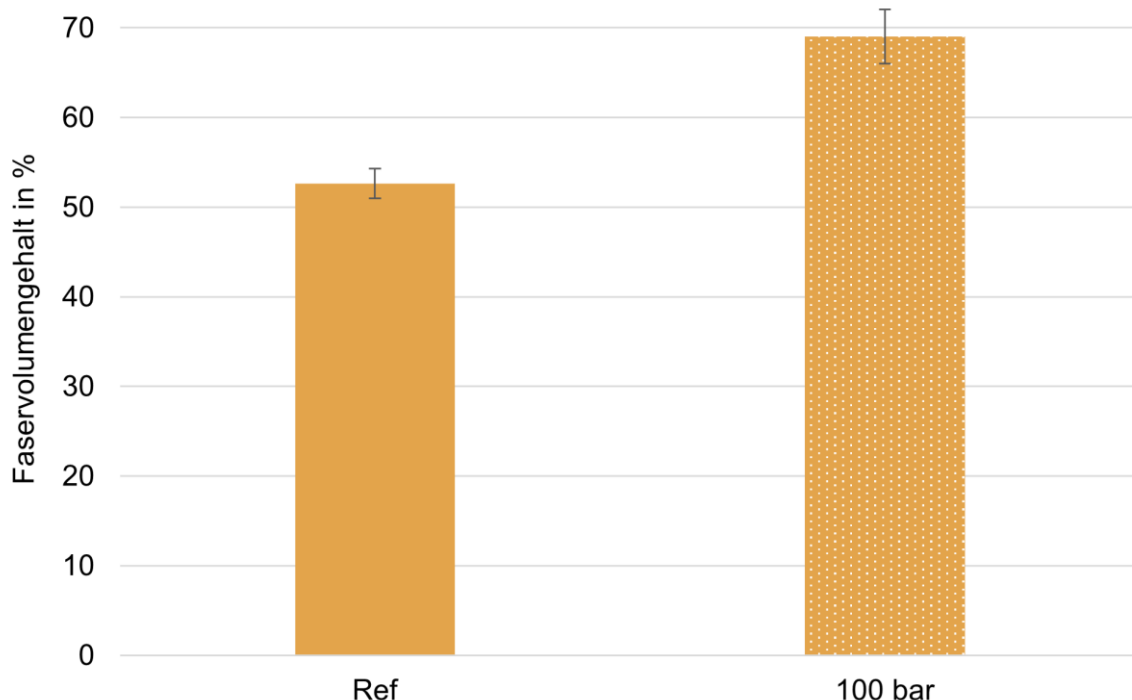


Diagramm 16: Faservolumengehalt der unkompaktierten Referenz und der mit 100 bar kompaktierten FKV

Das Diagramm 16 zeigt einen deutlichen Anstieg des FVG durch den Vorkompaktierungsprozess. Absolut liegt die Steigerung bei ungefähr 16 %. Der FVG der mit 100 bar kompaktierten Platten ist für eine Faserverstärkung mit einem Gewebe sehr hoch.

Üblicherweise liegen die FVG bei Gewebeverstärkungen zwischen 50 % und 60 % [May20]. Die gewebte Faseranordnung lässt oftmals einen höheren FVG nicht zu. Von einer Faserschädigung ist aufgrund der Ergebnisse des Garnzugversuchs aus Kapitel 7.2.1 nicht auszugehen.

Die Unterschiede zwischen den zwei Referenzen bzw. den mit 100 bar kompaktierten Platten liegen relativ bei unter 2 %, sodass von einer Reproduzierbarkeit auszugehen ist. Die Standardabweichungen im Diagramm sind vor allem aufgrund der Dickenvariationen innerhalb der FKV-Platten durch das VARI-Verfahren zu erklären.

Diese Dickenverteilung der FKV-Platten ist in Abbildung 44 am Beispiel einer der mit 100 bar kompaktierten FKV-Platten zu sehen.

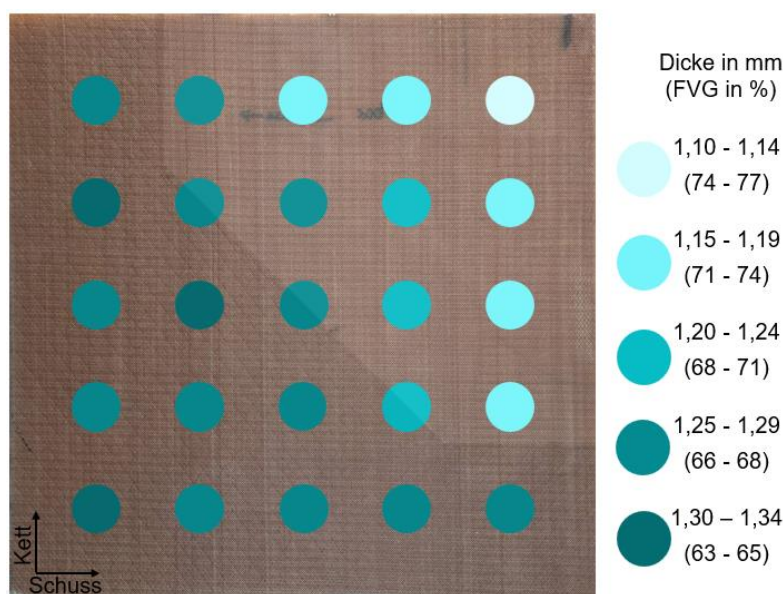


Abbildung 44: Verteilung der Dicke bzw. des FVG über die mit 100 bar kompaktierte Platte

Anhand der Farbgebung der einzelnen Messpunkte wird deutlich, dass die Dicke vom Harzzulauf zum Vakuumanschluss abnimmt. In dem Bereich nahe des Vakuumanschlusses ist der Kompaktierungsdruck, der durch den Unterschied zum Umgebungsdruck im VARI-Verfahren entsteht, am höchsten. Die niedrigere Schussfadendichte sorgt für ein schnelleres Fließen in Schussrichtung. Dies ist nur minimal und nicht bei allen FKV-Platten zu beobachten, da das Harzzulaufsystem und Abweichungen vom symmetrischen Aufbau stärkere Einflüsse auf die Fließfrontausbreitung und damit den Kompaktierungsdruck haben.

Der Harz-Zulauf erfolgt über zwei Kanten der Gewebelagen (vgl. Abbildung 25). Dabei fließt das Harzsystem teilweise schneller in einem, der beiden an den Kanten platzierten, Spiralschläuchen. Dies hat Auswirkungen auf die Fließfrontausbreitung, die entsprechend in Kett- oder Schussrichtung geringfügig schneller verläuft, was in der Dickenverteilung über die Platten zu erkennen ist. Umgekehrt kann rückwirkend über die gemessene Dickenvarianz die Fließfrontausbreitung weitgehend rekonstruiert werden.

Obwohl die Verteilung der Dicken zwischen den verschiedenen FKV-Platten, aufgrund der abweichenden Fließfrontausbreitung, abweichen, zeigt sich kein Einfluss auf die gemittelten Werte der Dicke und des FVG. Die Dickenvarianz der FKV erklärt lediglich die Standardabweichungen aus Diagramm 16.

8.2.2 Zugversuch

Im Zugversuch werden vier Konfigurationen getestet, um Zugmodul und Zugfestigkeit zu bestimmen. Die dafür aufgezeichnete Standardkraft über die Dehnung ist in Diagramm 17 von jeweils einer repräsentativen Probe der jeweiligen Konfiguration dargestellt.

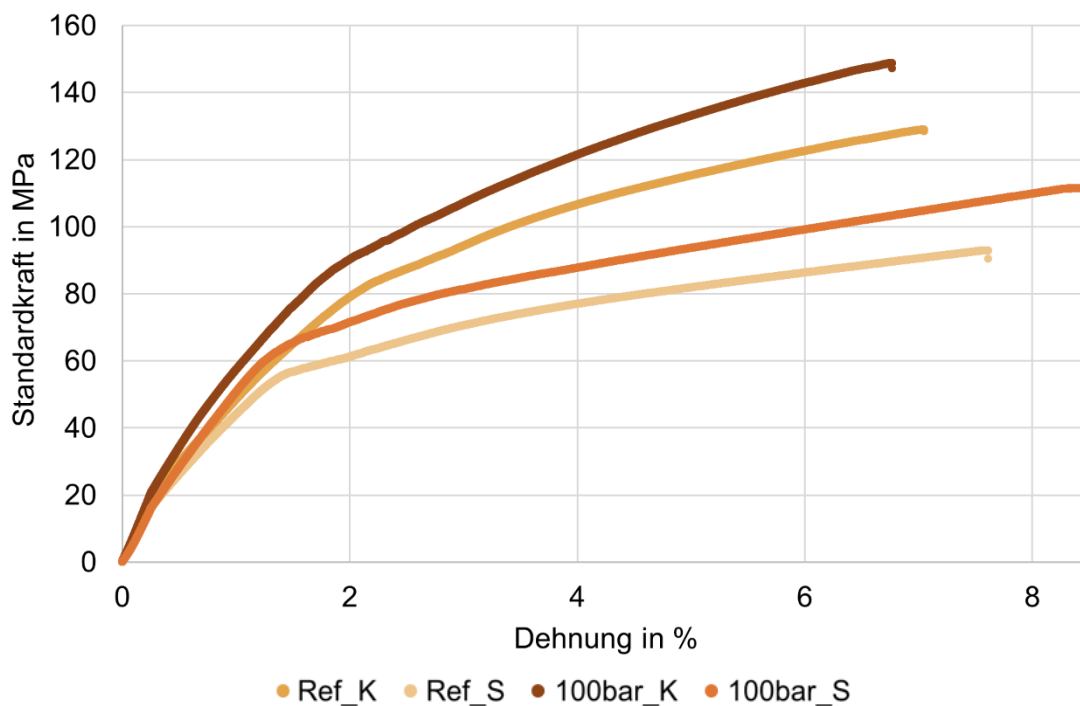


Diagramm 17: Repräsentative Kurvenverläufe der vier Konfigurationen im Standardkraft-Dehnungs-Diagramm

Die Verläufe im Diagramm 17 zeigen auf dem ersten Blick ein ähnliches Verhalten. Es handelt sich nicht um einen konstanten Anstieg von Kraft über Dehnung, stattdessen lassen sich drei Bereiche mit unterschiedlicher Steigung erkennen. Die Bereiche werden durch „Knicke“ in der Kurve voneinander getrennt. Der erste Knick bzw. Änderung der Steigung ist durch die Prüfapparatur zu erklären. Bei Vergrößerung des Bereiches fällt auf, dass der Knick genau bei einer Dehnung von 0,25 % auftritt. Dies liegt genau nach der Messung des Zugmoduls, der in einem Dehnungsbereich von 0,05 % und 0,25 % bestimmt wird. Die verwendete Prüfmaschine besitzt Extensiomter (siehe Abbildung 27), welche die Dehnungsänderung zur Bestimmung des Zugmoduls aufnehmen. Es handelt sich dabei um Fühl aufnehmen, dessen Messschneiden über Fühlerarme direkt an der Probe ansetzen und die Dehnung über Winkel- oder Wegänderung der Fühlerarme bestimmen [Zwi24]. Aufgrund des direkten Probenkontaktes werden die Extensiomter nach der Ermittlung des Moduls zur Seite gefahren, um eine

Beschädigung dieser im weiteren Prüfverlauf, vor allem beim Bruch der Probe, zu vermeiden. Nach der Dehnung von 0,25 % wird diese über den Traversenweg aufgezeichnet. Aufgrund der unterschiedlichen Genauigkeiten der beiden Messsysteme wird dies sichtbar durch eine geringe Änderung in der Steigung.

Die zweite Änderung der Steigung hat ihren Ursprung in der Faserorientierung. Bei Gewebeverstärkungen oder Laminaten mit $0^\circ/90^\circ$ orientierten Faserverstärkungen kommt es zur Überlagerung der Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Fasern parallel und senkrecht zur Zugrichtung. Fasern senkrecht zur Belastungsrichtung versagen vorzeitig, während parallellaufende Fasern weitere Kräfte aufnehmen können. Der Knick ist ein Steifigkeitsverlust, der als „Knie“ oder „Knistergrenze“ bezeichnet wird. Ab diesem bilden sich Zwischenfaserbrüche bei den senkrecht zur Belastung orientierten Fasern. Diese sind durch ein Knistern der Proben zu hören, deshalb der Name Knistergrenze. Die Bezeichnung Knie kommt aufgrund der Rundung des Knicks zustande. Mit jedem Querriss nimmt die Steifigkeit ab, sodass eine Rundung im Kurvenverlauf aufgrund der hohen Rissanzahl auftritt. Mit der Rissättigung ist das Versagen der Probe nicht erreicht, da die in Belastungsrichtung orientierten Fasern weiterhin Kräfte aufnehmen können. Das Ende der Rundung des Knies ist erreicht und die Spannung nimmt mit geänderter Steigung weiter zu [Ehr06] [Sch07].

Das biaxiale Gewebe zeigt für die Proben in Diagramm 17 ein deutlich sichtbares Knie. Zudem ist während der Prüfung, sobald sich das Knie im Kurvenverlauf abbildet, ein Knistern von den Proben zu vernehmen. Die Ausprägung des Knies ist bei den in Schussrichtung orientierten Proben stärker, d.h. der Steigungsunterschied ist höher. Das liegt daran, dass die Schussfäden durch ihre Ausrichtung in Zugrichtung zwar dominieren, in Kettrichtung allerdings die höhere Faserdichte zu finden ist. Versagen diese, ist dies deutlich in der Steifigkeit wahrzunehmen.

Im Anwendungsfall bildet die Knistergrenze oftmals die nutzbare Spannungshöhe, sodass nur ein geringer Teil des Potenzials der Faserverstärkung genutzt werden kann. Dies liegt neben dem Abfall in den mechanischen Eigenschaften an chemische Anfälligkeiten aufgrund der Rissbildung [Ehr06] [Sch07]. Für FKV mit Celluloseregenerat bedeutet dies zudem das Feuchtigkeit aufgenommen werden kann. Die Fasern schrumpfen aufgrund des Wassers, welches vermutlich zu weiteren Rissen im Verbund führt. Dieses Verhalten sollte für den Anwendungsfall genauer untersucht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit ist dies nicht relevant, da der Fokus auf die Auswirkungen des Vorkompaktierungsschrittes gesetzt werden soll. Der Kurvenverlauf ist typisch für ein biaxiales Gewebe mit der gewählten Lagenorientierung und entspricht den Erwartungen.

In der Auswertung des Zugversuchs aus dem ersten Teil in Kapitel 6.2.3 ist in den Kurvenverläufen ebenfalls das „Knie“ bzw. die „Knistergrenze“ zu erkennen. Dies ist für die Ergebnisse des ersten Zugversuchs im Hinblick der Ermittlung des optimalen

Kompaktierungsdrucks irrelevant und hier der Vollständigkeit halber für das Materialverständnis erwähnt.

Das diskutierte Diagramm 17 verdeutlicht, dass lediglich das Gewebe und die Lagenorientierung Auswirkungen auf die Form der Kurvenverläufe haben, nicht aber die Vorkompaktierung. Diese verschiebt die Kurve lediglich nach oben. Diese Verschiebung ist in den Kennwerten des Zugmoduls und der Zugfestigkeit ebenfalls erkennbar und durch die absoluten Zahlenwerte besser zum Vergleich geeignet.

In Diagramm 18 ist der Zugmodul der Konfigurationen dargestellt. Entsprechend der vorherigen Ausführungen steht „Kett“ für eine Belastung der Kettfäden aller drei Lagen parallel zur Zugrichtung. Gleiches gilt für die mit „Schuss“ betitelten Konfigurationen, wo die Schussfäden in Zugrichtung orientiert sind.

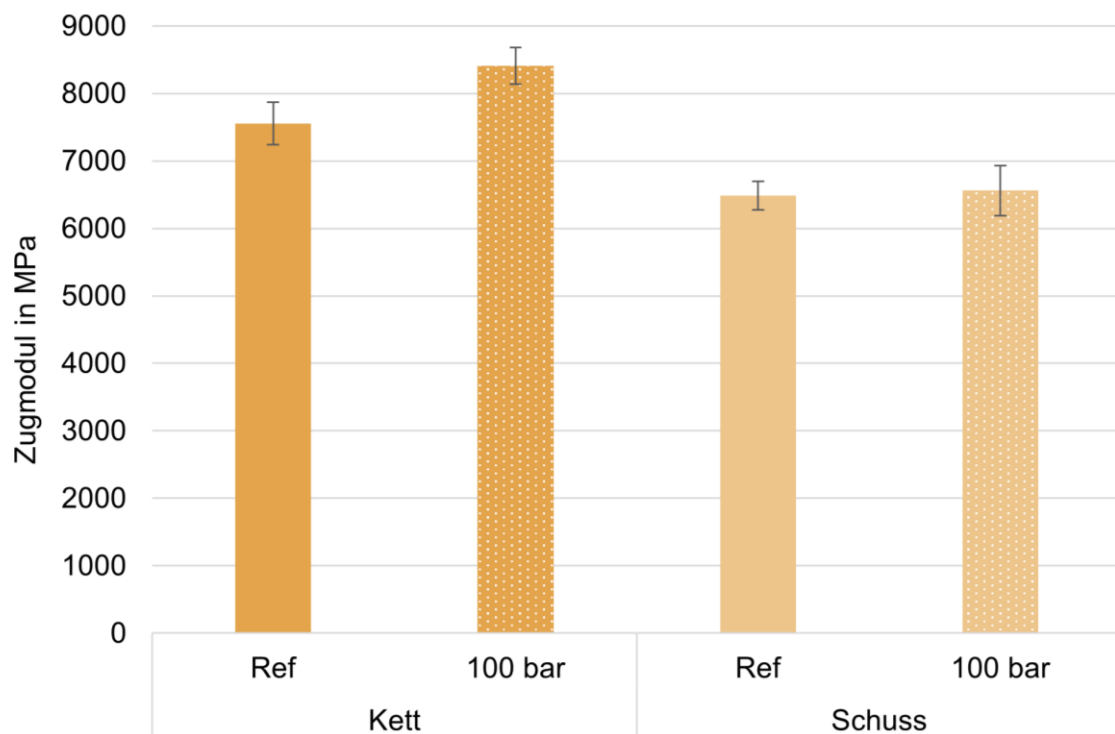


Diagramm 18: Darstellung des Zugmoduls der unkompaktierten Referenzen und der mit 100 bar kompaktierten Konfigurationen mit jeweils Kett- oder Schussrichtung, parallel zur Zugbelastung

In Diagramm 18 ist zu erkennen, dass die in Kettrichtung getesteten Konfigurationen höhere Werte, als die in Schussrichtung getesteten, aufweisen. Dies liegt an der höheren Faserdichte, die in Schussrichtung 40 % niedriger ist als in Kettrichtung.

Die Kompaktierung zeigt zudem, vermutlich aufgrund der unterschiedlichen Faserdichten, eine stärkere Auswirkung auf das Zugmodul in Kettrichtung. Der erhöhte FVG der mit 100 bar kompaktierten Konfigurationen sorgt für einen Anstieg des Zugmoduls der 100 bar_K verglichen zur Ref_K von ungefähr 11 %, während die Werte der in Schussrichtung geprüften Konfigurationen gleich sind.

Im nächsten Diagramm 19 sind die gemittelten Zugfestigkeiten der Proben dargestellt.

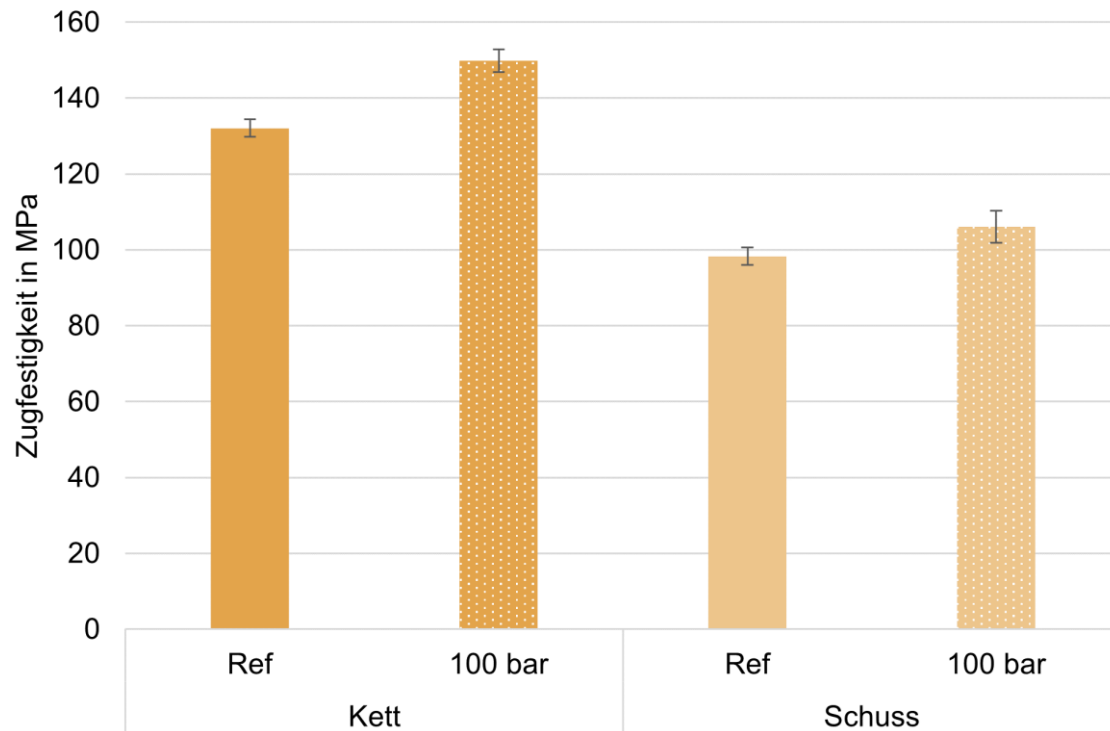


Diagramm 19: Darstellung der Zugfestigkeit der unkompaktierten Referenzen und der mit 100 bar kompaktierten Konfigurationen mit jeweils Kett- oder Schussrichtung, parallel zur Zugbelastung

Begründet in der niedrigen Fadendichte in Schussrichtung, liegen die parallel zu den Schussfäden getesteten Konfigurationen bei niedrigeren Zugfestigkeiten als in Kettrichtung. Dies entspricht dem Trend des Zugmoduls aus Diagramm 18.

Die Zugfestigkeit der mit 100 bar kompaktierten Proben ist zudem höher als die Referenz der jeweiligen Richtungen, da der FVG größer ist (siehe Kapitel 8.2.1). Bei den in Kettrichtung getesteten Proben führt die Vorkompaktierung zu einem Anstieg von 13 %, verglichen zur Referenz. Ist die Schussrichtung parallel zur Belastung orientiert, liegt die gemittelte Zugfestigkeit der mit 100 bar kompaktierten Proben 8 % über dem Wert der Referenz.

Die Steigerung durch die Vorkompaktierung ist in Kett- höher als in Schussrichtung. Dies liegt an der erhöhten Faserdichte der Kettrichtung. Sind mehr Fasern in der Zugrichtung orientiert, welche die Werte der Zugfestigkeit dominieren, zeigt die Kompaktierung stärkere Auswirkungen.

Insgesamt ist der erreichte Anstieg durch die Kompaktierung verhältnismäßig gering. Um die Werte besser einschätzen zu können, werden die ermittelten Kennwerte aus dem Zugversuch gegen den FVG aufgetragen. Zudem sind die Werte aus dem ersten, in Kapitel 6.2.3 ausgewerteten Zugversuch zum Vergleich mit dargestellt. Dabei erfolgt dieser nur zwischen Konfigurationen mit gleicher Lagenorientierung zur Belastungsrichtung. Die mit 48 bar kompaktierten Proben gehören zu den in Kettrichtung getesteten Konfigurationen. Hingegen werden die mit 28 bar und 38 bar kompakteren Proben mit den in Schussrichtung getesteten

Konfigurationen verglichen. Die Referenz aus dem ersten Zugversuch kann aufgrund ihrer Lagenorientierung nicht mit in die Gegenüberstellung aufgenommen werden.

Es gilt zu beachten, dass die Proben des ersten Zugversuchs in einem geringen Winkel geprüft und somit nicht rein auf Zug belastet wurden. Diese Messwerte sind darum unter Vorbehalt zu betrachten. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass eine reine Zugbelastung zu ähnlichen oder höheren Messwerten führt.

In Diagramm 20 ist das Zugmodul der Konfigurationen über den FVG aufgetragen. Die Konfigurationen aus dem ersten Zugversuch aus Kapitel 6 sind in Grüntönen dargestellt. Zudem sind die Werte, der in Kettrichtung getesteten Proben, durch Quadrate in dunkleren Farben und die in Schussrichtung belasteten Proben mit Kreisen und helleren Farben veranschaulicht.

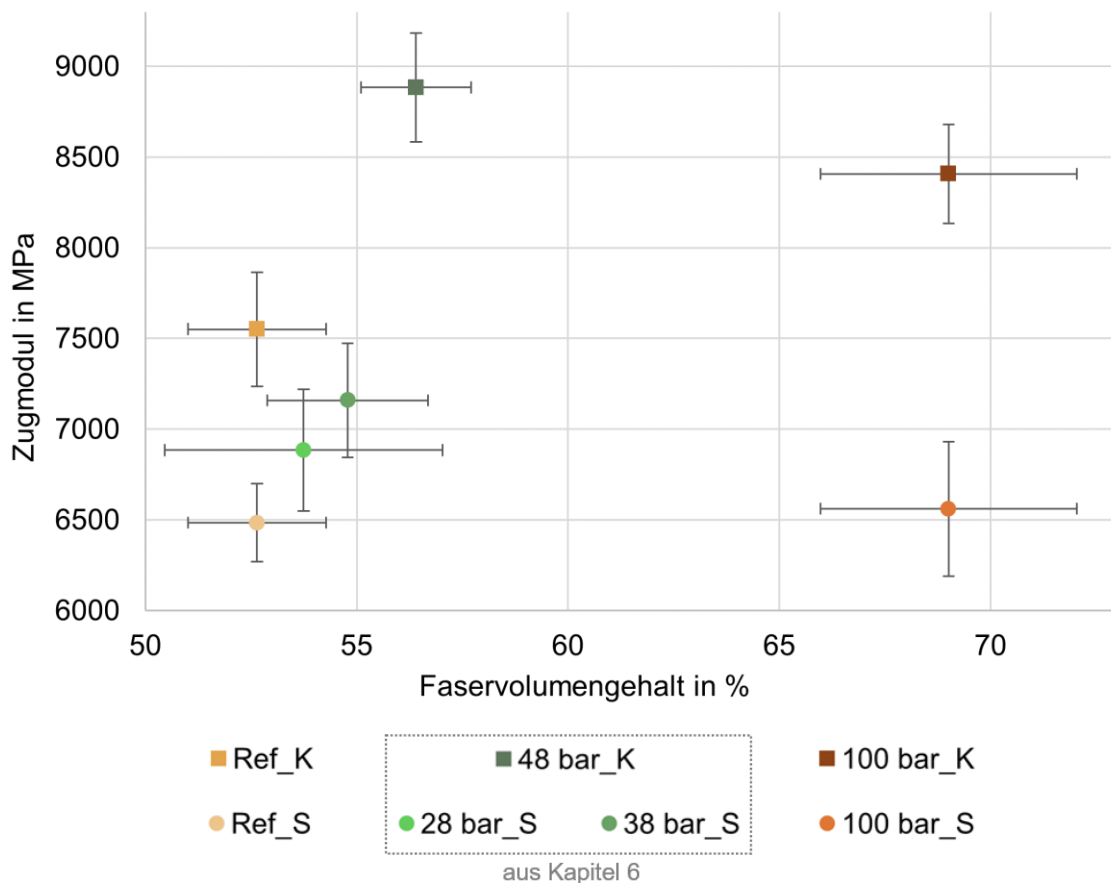


Diagramm 20: Zugmoduln in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes der untersuchten Konfigurationen

Entsprechend der Ausführungen zuvor wird im Diagramm 20 deutlich, dass die in Kettrichtung belasteten Konfigurationen aufgrund der höheren Fadendichte oberhalb der in Schussrichtung getesteten liegen.

Die Überschneidungen der Standardabweichungen des FVG sind auf die genannten Dickenvarianzen aufgrund des VARI-Verfahrens zurückzuführen. Gewisse Bereiche der FKV-Platten besitzen die gleichen FVG, während die gemittelten Werte abweichen.

Aus den drei Konfigurationen, deren Kettfäden parallel zur Belastungsrichtung orientiert sind, zeigt die mit 48 bar kompaktierte Konfiguration das höchste gemittelte Zugmodul. Verglichen zur Referenz ist eine eindeutige Steigerung festzustellen, während sich die Fehlertoleranzen mit der bei 100 bar kompaktierten Probe knapp überschneiden. Trotz der signifikanten Erhöhung des FVG der mit 100 bar kompaktierten, verglichen zur bei 48 bar kompaktierten FKV-Platte liegen die Zugmodule unter Berücksichtigung der Fehlertoleranzen im selben Bereich.

Ein sehr ähnliches Verhalten ist zwischen der mit 38 bar kompaktierten und der bei 100 bar kompaktierten Konfiguration zu erkennen, die beide in Schussrichtung getestet werden. Verglichen zur Referenz liegt das Zugmodul der mit 38 bar kompaktierten Probe ebenfalls höher, während sich die Fehlertoleranzen der FVG überschneiden.

Abweichend von der Annahme, dass die Werte des Zugmoduls der ersten Zugprüfung aus Kapitel 6 durch die schräge Einspannung niedriger sind, scheinen diese im Diagramm nach oben verschoben zu sein.

Die mit 100 bar kompaktierten Konfigurationen liegen hingegen bei niedrigeren Werten als erwartet.

Der in Diagramm 20 zu sehende Zusammenhang zwischen FVG und Zugmodul der Konfigurationen kann ohne weitere Messungen nicht erklärt werden. Ein Grund für die geringen gemittelten Zugmoduln bei 100 bar Kompaktierung könnte die Faser-Matrix-Haftung sein. Durch den hohen FVG kann die vollständige Ummantelung der Fasern durch die Matrix möglicherweise nicht gewährleistet werden, was sich wiederum auf die Krafteinleitung und damit die mechanischen Eigenschaften auswirkt.

Im folgenden Diagramm 21 sind die Zugfestigkeiten der verschiedenen Konfigurationen in Abhängigkeit des FVG dargestellt. Die Darstellung der Konfigurationen folgt dem gleichen Schema wie im vorherigen Diagramm 20.

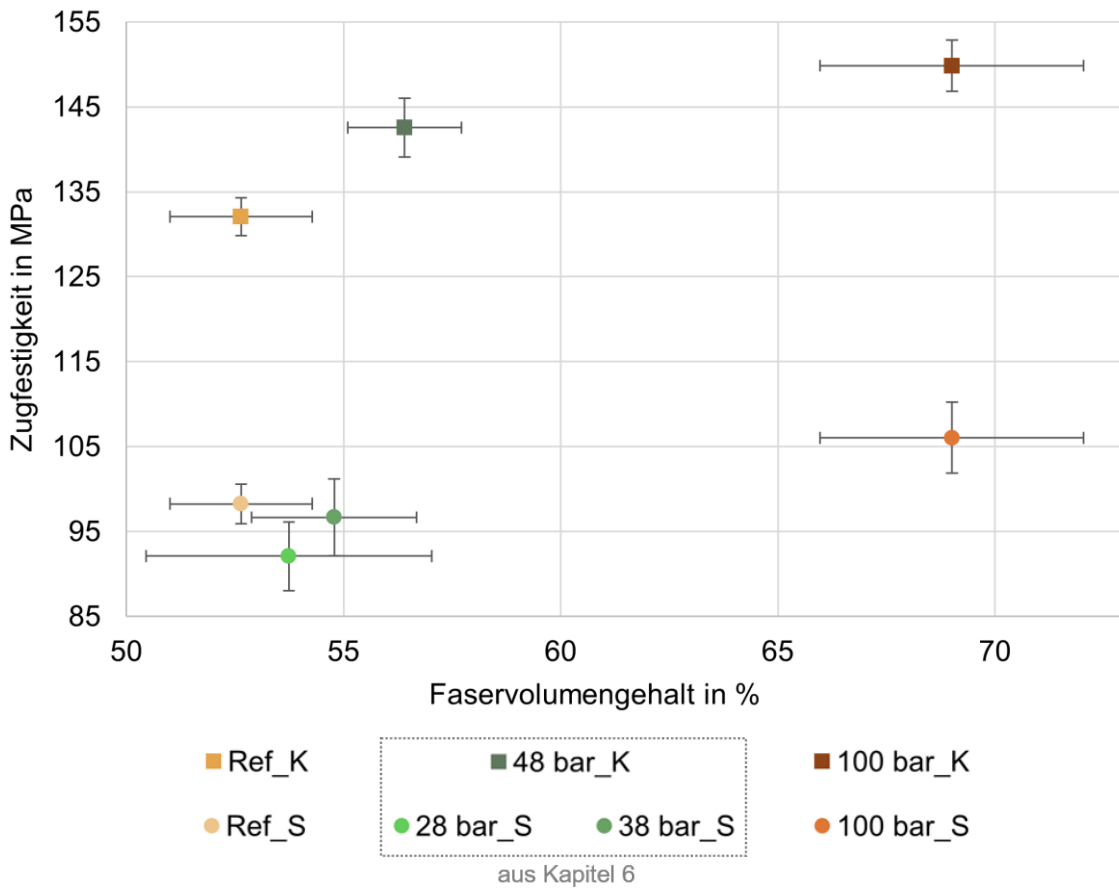


Diagramm 21: Zugfestigkeiten in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes der untersuchten Konfigurationen

Die im Diagramm 21 zu erkennenden Zusammenhänge der in Kettrichtung belasteten Konfigurationen entsprechen den Erwartungen. Eine Steigerung im FVG führt zu höheren Zugfestigkeiten der Konfiguration. Es gibt keine Überschneidung der Standardabweichungen und der in Abbildung 8 idealisierte Zusammenhang zwischen Festigkeit und FVG kann erkannt werden.

Bei den Konfigurationen mit Schussfäden parallel zur Zugrichtung ist dieser Zusammenhang kaum zu erkennen. Die gemittelten Werte der mit 28 bar und bei 38 bar kompaktierten Proben liegen niedriger als die der Referenz. Dies kann zum einen auf die schräge Einspannung zurückzuführen zu sein, was jedoch bedeutet, dass dies ebenfalls für die mit 48 bar kompaktierte in Kettrichtung getestete Konfiguration gilt. Zum anderen müssen die Fehlertoleranzen sowohl in Bezug auf den FVG als auch der Zugfestigkeit der mit 28 bar und mit 38 bar kompaktierten Konfigurationen berücksichtigt werden. Der FVG der Konfigurationen liegt im gleichen Bereich wie der der Referenz, womit die FVG in Teilbereichen der FKV identisch sind.

Die Interpretation der Ergebnisse wird durch die Fehlerbehaftung der Werte aus dem ersten Zugversuch erschwert. Für die Interpretation der Ergebnisse gibt es zwei mögliche Herangehensweisen.

Die erste Möglichkeit ist die Auswertung unter der Annahme, dass die gemittelten Werte der mit 28 bar, 38 bar und 48 bar kompaktierten Konfigurationen bei korrekter Einspannung höher sind. Damit liegen die Zugfestigkeiten der mit 48 bar und der mit 38 bar kompaktierten Konfigurationen im gleichen Bereich wie die der jeweils mit 100 bar kompaktierten Konfigurationen der entsprechenden Richtung. Der erhöhte FVG durch 100 bar Kompaktierung zeigt demnach, ähnlich wie beim Zugmodul, keine Auswirkungen auf die Zugfestigkeit, was möglicherweise auf die Faser-Matrix-Haftung zurückzuführen ist.

Die zweite Möglichkeit nimmt zur Erklärung der Ergebnisse an, dass die Werte im Diagramm korrekt sind. Unter dieser Annahme zeigen die in Kettrichtung geprüften Konfigurationen den erwarteten Verlauf. In Schussrichtung besitzt die Kompaktierung generell eine geringere Auswirkung. Die Drücke 28 bar und 38 bar führen zwar zu einer kleinen Steigerung des gemittelten FVG, aber scheinen zu niedrig zu sein, um einen Einfluss auf die Zugfestigkeiten zu besitzen. Darum liegen die Zugfestigkeitswerte im gleichen Bereich wie die der unkompaktierten Referenz.

Um die Ergebnisse der Zugversuche vollständig zu erläutern ist eine Wiederholung erforderlich. Trotz erhöhten Arbeitsaufwands ist die Erstellung von Konfigurationen mit unterschiedlichen Kompaktierungsdrücken sinnvoll. Dies ist notwendig, um den Zusammenhang zwischen FVG und Zugeigenschaften zu ermitteln und ein Vergleich zu dem erwarteten Verlauf vorzunehmen zu können.

8.2.3 Permeabilitätsmessung

Die Ergebnisse der Permeabilitätsmessung der beiden Konfigurationen sind in Diagramm 22 dargestellt. Da es sich um eine 2D-Ebenpermeabilitätsmessung handelt, werden die Permeabilitäten in zwei Raumrichtungen gemessen. Diese entsprechen der Kett- und der Schussrichtung des Gewebes.

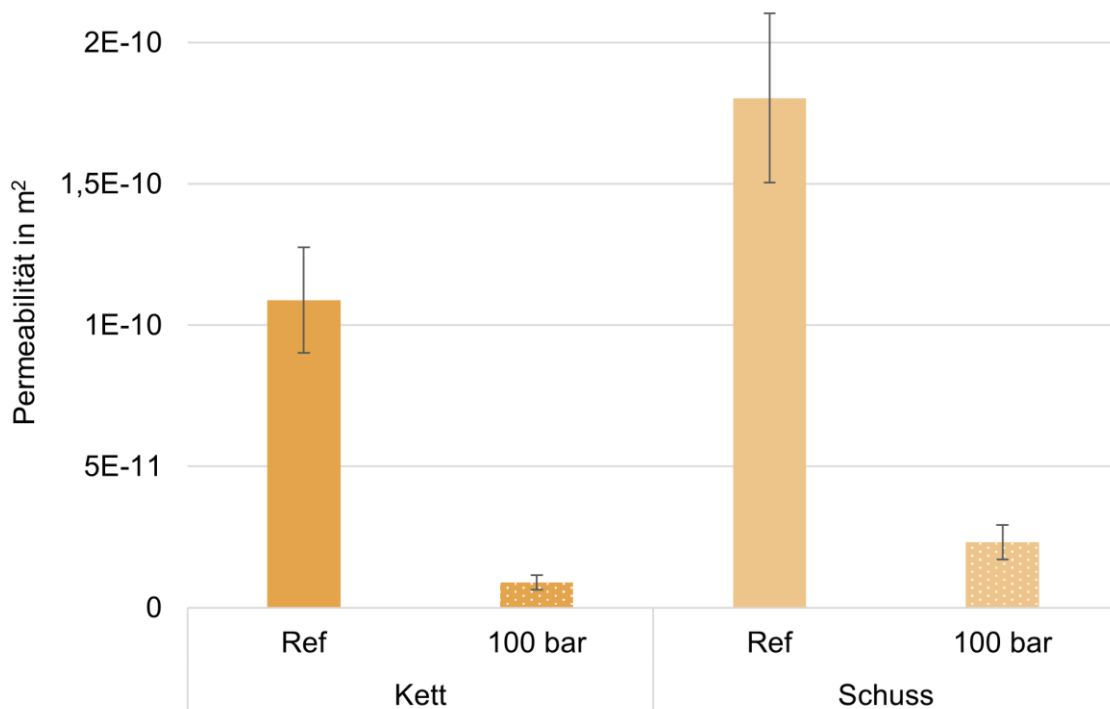


Diagramm 22: Permeabilitäten der unkompaktierten Referenz und der mit 100 bar kompaktierten Konfiguration in Kett- und Schussrichtung

Die Permeabilität der Konfigurationen in Kettrichtung ist geringer als die Werte in Schussrichtung. Dies liegt an der Fadendichte, die in Kettrichtung um 40 % höher ist. Das sorgt für eine Zunahme der Permeabilität in Schuss- verglichen zur Kettrichtung um ungefähr 40 % bei den Referenzen und ungefähr 61 % bei den mit 100 bar kompaktierten Konfigurationen.

Den Erwartungen entsprechend sinkt die Permeabilität durch die Vorkompaktierung. Das freie Volumen wird durch das Zusammendrücken der Lagen gefüllt und der Widerstand gegen die Fließfrontenausbreitung des Fluids wird höher. In Kettrichtung verringert sich die Permeabilität durch die Kompaktierung um ungefähr 92 % verglichen zur Referenz. In Schussrichtung wird sie um 87 % minimiert. Dies geschieht bei einer Steigerung des FVG der kompaktierten Proben um 16 %.

Der hohe Abfall in der Permeabilität verdeutlicht den starken Einfluss des FVG. Die 16 %ige Erhöhung im FVG wirkt sich fast dreimal so stark auf den Permeabilitätswert aus, der für beide Richtungen stark reduziert wird.

Durch die unterschiedlichen Permeabilitäten in Kett- und Schussrichtung bildet sich die Fließfront in Form einer Ellipse aus. Dies ist Abbildung 45 für die beiden Konfigurationen dargestellt.

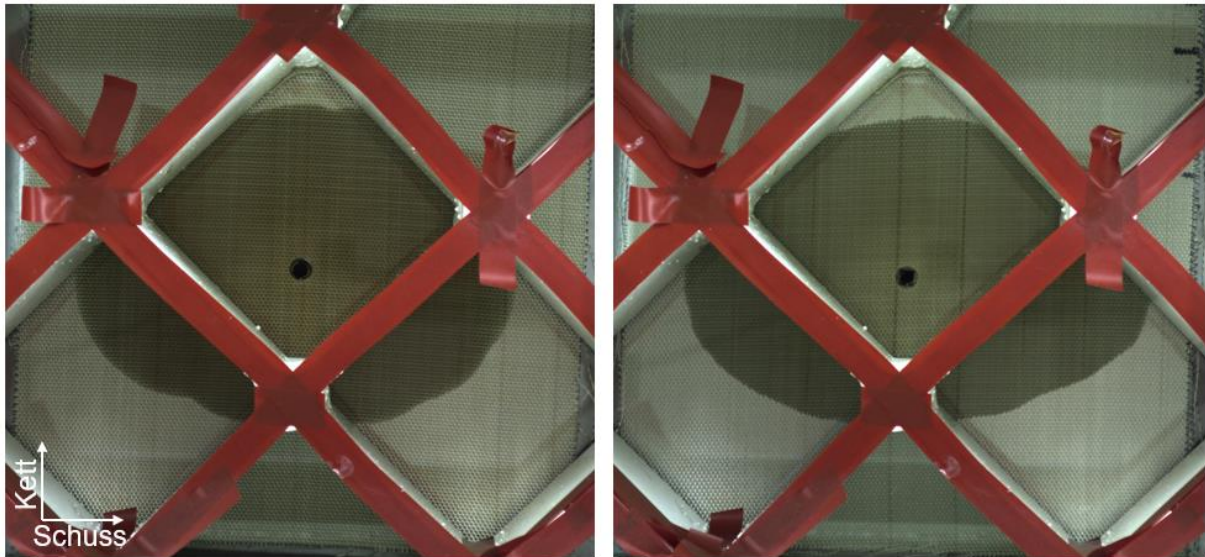


Abbildung 45: Aufnahmen fortgeschrittener Fließfronten der unkomprimierten Referenz (links) und der bei 100 bar komprimierten Konfiguration (rechts) während der Messung

In Abbildung 45 kann die Ellipsenform der Fließfront erkannt werden. Es wird zudem ersichtlich, dass sich Länge-zu-Breite-Verhältnis der Fließfront zwischen den Konfigurationen unterscheiden. Dieser Umstand lässt sich im oben dargestellten Diagramm 22 bereits erkennen. Die Kompaktierung hat bei der höheren Fadendichte in Kettrichtung scheinbar einen größeren Einfluss. Mehr Fasern sorgen dafür, dass weniger freies Volumen zur Verfügung steht, sodass die Fließfrontgeschwindigkeit sinkt und somit auch die Permeabilität. Die Anisotropie des Gewebeaufbaus nimmt bezogen auf die Permeabilitäten mit steigendem Kompaktierungsdruck bzw. FVG zu.

Eine Division der Permeabilität in Kett- durch die Permeabilität in Schussrichtung bestätigt dies. Das Verhältnis liegt bei der Referenz bei ungefähr 0,6 und bei der komprimierten Konfiguration bei ungefähr 0,4.

8.3 Fehlerdiskussion

Für den Kompaktierungsprozess und das VARI-Verfahren inklusive der zugehörigen Schritte, wie dem Zuschneiden oder der Vortrocknung, sind die möglichen Fehlerquellen entsprechend in Kapitel 6.3 beschrieben.

Es gilt zu beachten, dass die Zugkennwerte aus Kapitel 6 mit leicht schräg getesteten Proben aufgenommen wurden. Zudem können Unterschiede in der Einrichtung des Prüfstandes oder in der Einlagerung im Normklima und damit der Feuchtigkeitsaufnahme aufgetreten sein.

Zur Bestätigung der Ergebnisse ist eine Wiederholung des Zugversuches mit mehreren Konfigurationen notwendig. Die Proben stammen jeweils aus einer Platte, sodass die Reproduzierbarkeit nicht nachgewiesen ist. Nur der FVG der Referenz und der mit 100 bar komprimierten Platte zeigt zwischen zwei hergestellten FKV die gleichen Werte.

Bei der Permeabilitätsmessung sind die Annahmen als mögliche Fehlerquellen zu nennen, die für die Auswertung der Permeabilitätswerte bezogen auf den verwendeten Messstand getroffen werden. Die Annahmen wirken sich jedoch gleichermaßen auf alle bestimmten Permeabilitätswerte aus, sodass lediglich die absoluten, nicht aber die relativen Werten von dieser Fehlerquelle betroffen sind. Dies ist im Rahmen der Betrachtungen zu vernachlässigen.

Beim Zusammenführen der Ergebnisse aus den verschiedenen Teilen der Arbeit ist eine Unstimmigkeit im Zusammenhang zwischen Kompaktierungsdruck und FVG aufgefallen. Der FVG, als wichtiger Kennwert von Faserverbunden, wird in allen drei Teilen der Arbeit von den hergestellten Konfigurationen nach Ermittlung der Dicke berechnet. Zur Realisierung der gewünschten Kompaktierungsdrücke mit der verwendeten Thermopresse müssen die Größen, der zu kompaktierenden Gewebezuschnitte und damit der hergestellten FKV-Platten, angepasst werden. Die Thermopresse gibt den aufgebrachten Druck bezogen auf die Fläche ihres Presszylinders an, sodass eine Umrechnung auf die jeweilige Gewebegröße durchgeführt wird.

In Diagramm 23 ist der FVG abhängig vom Kompaktierungsdruck der unterschiedlichen großen FKV-Platten dargestellt. Die angegebenen Kompaktierungsdrücke beziehen sich auf den Druck, der auf das Textil wirkt.

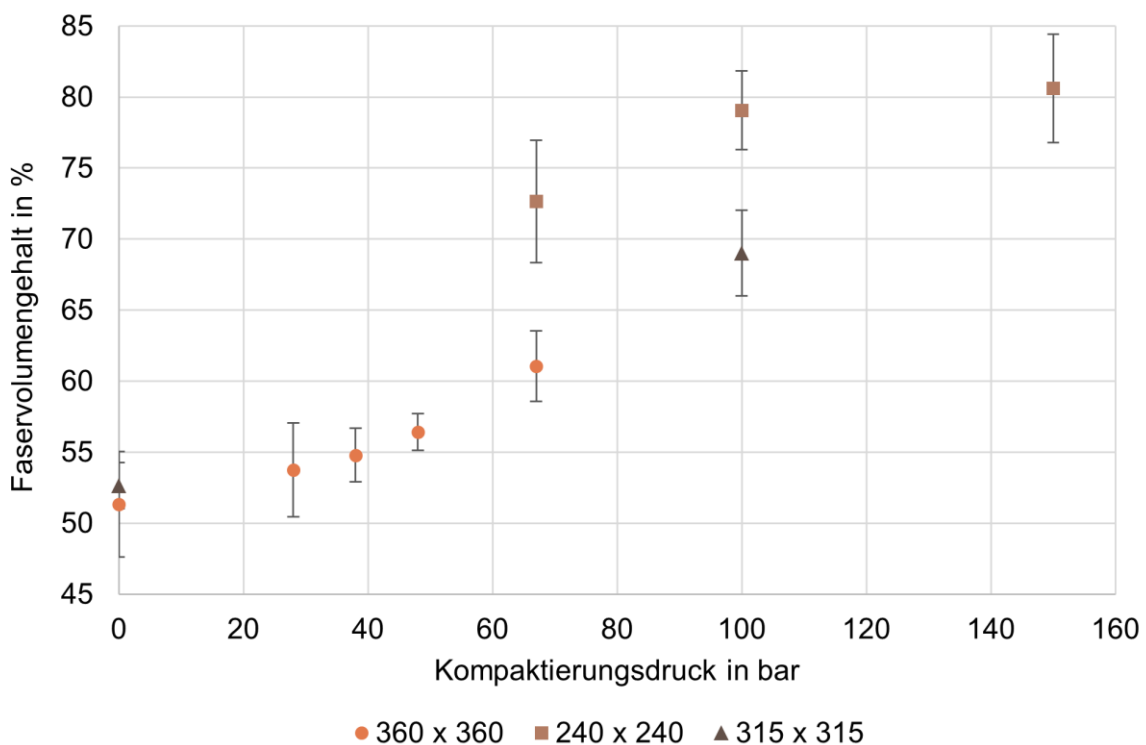


Diagramm 23: Gemessene Abhängigkeit des Faservolumengehalts vom Kompaktierungsdruck bei unterschiedlichen Größen der Platten (angegeben in mm)

In Diagramm 23 sind die drei FKV-Plattengrößen als Konfigurationen eingetragen. Die größten Platten mit 360 mm x 360 mm stammen aus dem ersten Teil der Arbeit, die 240 mm x 240 mm

Platten aus dem zweiten und die 315 mm x 315 mm aus dem dritten Teil. Zur Betrachtung der Unstimmigkeiten zwischen den FVG bei gleichem Kompaktierungsdruck, aber unterschiedlicher Plattengröße sind die bei 0 bar, 67 bar und 100 bar kompaktierten Konfigurationen von Bedeutung.

Die unkompaktierten Konfigurationen zeigen im Rahmen der Standardabweichungen den gleichen FVG. Dies ist der Fall, obwohl die 0 bar kompaktierte 360 mm x 360 mm große FKV-Platte die einzige Konfiguration ist, bei der Kett- und Schussfäden aller Lagen nicht in eine Richtung zeigen, sondern um 90° verdreht liegen. Dies scheint den FVG ohne Kompaktierung nicht zu beeinflussen.

Bei 67 bar und 100 bar Kompaktierung sind deutliche Unterschiede zwischen den gemittelten FVG zu erkennen. Relativ betrachtet liegen die Werte der kleinsten Platten um 19 % bei 67 bar und um 15 % bei 100 bar kompaktierten Konfigurationen höher.

Unter der Berücksichtigung, dass die Herstellung aller Faserverbunde gleich durchgeführt worden ist und die Abweichungen bei unkompaktierten FKV nicht auftreten, ist davon auszugehen, dass das Problem auf den Vorkompaktierungsprozess zurückzuführen ist. Dabei müssen insbesondere die von der Presse abhängigen Parameter betrachtet werden. Die Kompaktierungsdauer wird durch manuelles Öffnen und Schließen der Presse eingehalten. Ebenso sind Abweichungen der Kompaktierungstemperatur, die zu diesen hohen Unstimmigkeiten führen, auszuschließen. Die Kompaktierungsgeschwindigkeit wird vom Hersteller als konstant angegeben. Fehler bezogen auf den Wert der ermittelten Kompaktierungsgeschwindigkeit in der Presse wirken sich demnach auf alle Faserverbunde gleichermaßen aus.

Es bleibt der Kompaktierungsdruck, der nicht überprüft werden kann und einen hohen Einfluss auf den FVG besitzt. Aus Diagramm 23 ist anzunehmen, dass die ausgewählten Kompaktierungsdrücke möglicherweise nicht mit den angenommenen Werten auf das Material aufgebracht werden. In dem Fall ist ein Vergleich zwischen FKV-Platten unterschiedlicher Größe in Hinblick auf den Kompaktierungsdruck nicht möglich. Hingegen ist ein Vergleich auf Basis der FVG der Konfigurationen weiterhin sinnvoll, da dieser über Dickenmessungen nachgewiesen ist.

Auf Grundlage der Ergebnisse vorheriger Arbeiten kann die Planparallelität der Pressplatten als Fehlerquelle ausgeschlossen werden. Eine Abweichung von dieser würde sich unterschiedlich auf verschieden große Materialflächen und andere Positionierungen im Pressraum auswirken.

Für die Arbeit bedeutet diese Fehlerquelle, dass die Zusammenhänge zwischen den Konfigurationen über den FVG weiterhin bestehen bleiben, die absoluten Werte der Kompaktierungsdrücke und die damit verbundenen Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen großen Faserverbunden jedoch fehlerhaft sind. Innerhalb einer FKV-

Plattengröße ist ein direkter Vergleich möglich und die Abstände zwischen den Drücken als korrekt anzunehmen, während die absoluten Werte mit Fehlern behaftet sind und in anderen Größenordnungen liegen können.

Zur Beschreibung, wie sich dieser Fehler auf die Ergebnisse der Arbeit ausübt, werden die Konfigurationen im Folgenden weiterhin mit ihren ausgewählten Drücken bezeichnet, obwohl die Werte absolut nicht stimmen. Dies dient der Übersichtlichkeit.

Die Ergebnisse zum Kompaktierungsdruck aus dem ersten Teil der Arbeit in Kapitel 6 sind weiterhin korrekt, da die Faserverbunde in den gleichen Größen hergestellt werden und somit die Verhältnisse der Kompaktierungsdrücke zueinander stimmen.

Im zweiten Teil sind der Garnzugversuch und die Simulation nicht von dem Problem betroffen, da die Thermopresse für die Versuche nicht verwendet wird. In den Ergebnissen der Simulation ist der Vergleich zu den hergestellten FKV-Platten jedoch mit Vorsicht zu betrachten. Die Einordnung der Messpunkte in Diagramm 12, der Darstellung des FVG über den Kompaktierungsdruck, ist für den FVG korrekt, aber die Einordnung auf der x-Achse fehlerhaft. Bei einem Vergleich müssen bereits die Abweichungen der Simulation zur Realität miteinbezogen werden. Mit der zusätzlichen Fehlerquelle, deren Abweichungen nicht eingeordnet werden können, ergibt der Vergleich keinen Sinn. Auf das reine Simulationsergebnis wirkt es sich nicht aus.

Erst im nachfolgenden Versuch zur Bestätigung des Kompaktierungsdrucks treten, die ersten Hindernisse auf. Der Zusammenhang zwischen den FVG der mit 67 bar, 100 bar und 150 bar kompaktierten Konfigurationen ist weiterhin korrekt und zeigt den optimalen Druck bei 100 bar. Allerdings sind die absoluten Werte der untersuchten Drücke aufgrund der Fehlerbehaftung nicht bekannt. Das Ergebnis des Versuchsteils ist damit, dass der optimale Kompaktierungsdruck bei dem Druck liegt, den die Thermopresse bei den gewünschten 100 bar auf die gewählte Gewebefläche aufbringt. Die Korrelation zur Simulation, bei der die absoluten Druckwerte korrekt sind, kann nicht beurteilt werden. Zudem können die Abweichungen zwischen Simulation und Realität, fehlende Temperatur und Matrix, nicht quantifiziert werden.

In diesem dritten Teil scheint die hergestellte FKV-Platte einen niedrigeren Kompaktierungsdruck als den optimal ermittelten Druck aus Teil II erfahren zu haben, da der FVG geringer ist. Der Zusammenhang ist Diagramm 23 zu entnehmen. Aufgrund der unterschiedlichen Materialgrößen zwischen Teil II und Teil III entsprechen die angenommen 100 bar in beiden Arbeitsteilen einen anderen Kompaktierungsdruck.

Für die Gegenüberstellung der Zugversuche aus Teil I und Teil III sind die Verhältnisse der Kompaktierungsdrücke zueinander anders, als die absoluten Werte annehmen lassen. Entsprechend der Messdaten aus Diagramm 23 sind die Drücke auf kleine FKV-Platten größer als ursprünglich ausgewählt, womit der Abstand des Kompaktierungsdrucks zwischen 48 bar

und 100 bar kompaktierten Konfigurationen aus dem Zugversuch höher sein sollte. Der Vergleich auf Grundlage der FVG ist nicht weiter von der Fehlerquelle betroffen.

Bei der Permeabilitätsmessung ist die Vergleichbarkeit zu den Drücken und FVG aus dem Zugversuch aus Teil III gegeben, da die fehlerhafte Druckaufbringung vor den Messungen aufgefallen ist. Die Flächen der Gewebezuschnitte sind entsprechend nur für den Kompaktierungsprozess auf die Größe der FKV-Platte des Zugversuchs angepasst. Somit kann ein direkter Vergleich zwischen den kompaktierten Konfigurationen des Zugversuchs (aus dem dritten Teil) und der Permeabilitätsmessung erfolgen.

8.4 Ergebnisse

Die Beurteilung der Optimierung ist aufgrund der fehlerhaften absoluten Werte des Kompaktierungsdrucks, der einen maßgeblichen Einfluss auf das Eigenschaftsprofil besitzt, schwierig. Die Vergleichbarkeit zwischen den Versuchsteilen der Arbeit ist nur über den, durch Dickenmessungen bestimmten FVG der Konfigurationen möglich.

Der in Teil II als optimal ermittelte Druck führt zu einem gemittelten FVG von 79 %. In diesem Teil III liegt der FVG der kompaktierten Konfiguration bei 69 %. Das bedeutet eine Verringerung von 10 %, trotz identischer Vorkompaktierung und Herstellung der FKV-Platten. Die Referenz des unkompaktierten Leinwandgewebes besitzt einen FVG von knapp 53 %. Durch eine optimale Vorkompaktierung und anschließende Faserverbundherstellung im VARI-Verfahren ist eine Steigerung, verglichen zur Referenz, von 26 % möglich, wie Teil II der Arbeit beweist. Die Erhöhung des FVG, der in Teil III kompaktierten Konfigurationen, liegt bei 16 %. Es handelt sich damit nur in Teil II, nicht aber in Teil III, um die optimale Kompaktierung, wenn der FVG als bewertender Faktor betrachtet wird.

In der idealen Korrelation bedeutet ein höherer FVG höhere mechanische Eigenschaften. Eine Steigerung des FVG aus Teil III hin zum FVG optimal kompaktierter Konfigurationen sollte sich demnach auf die Ergebnisse der Zugeigenschaften und der Permeabilitäten auswirken. Da es sich um eine theoretische Korrelation unter idealen Bedingungen handelt, können die Änderungen nicht vorausgesagt werden.

Allerdings sprechen die Ergebnisse der Gegenüberstellung der beiden Zugversuche für eine Abweichung vom idealen Verlauf. Die Darstellung der Zugeigenschaften zeigt nicht die erwartete Korrelation zum FVG. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um eine eindeutige Aussage treffen zu können. Dabei sollte der Fokus zunächst auf die Faser-Matrix-Haftung, vor allem unter dem Aspekt der vollständigen Faserbenetzung, der FKV gelegt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Prüfung der Interlaminaren Scherfestigkeit (ILSF) durchgeführt, die bei Schubversagen ein Rückschluss auf die Faser-Matrix-Haftung

ermöglicht. Aufgrund des dreilagigen Aufbaus kommt es allerdings zu keinem Schubversagen und die Ergebnisse sind nicht zu interpretieren.

Obwohl die Ergebnisse aus Teil III nicht zur Beurteilung der optimalen Kompaktierung beitragen, können andere Erkenntnisse aus den Ergebnissen gewonnen werden.

Die Kompaktierung zeigt im Zugversuch und in Permeabilitätsmessungen eine höhere Auswirkung in Kettrichtung, da die Fadendichte dort um 40 % höher ist als in Schussrichtung. Sie verstärkt die Anisotropie des Leinwandgewebes, was in beiden Versuchen deutlich wird. Die Überlagerung der beiden Faserausrichtungen, sowie deren Anteile zur Zugfestigkeit sind im Spannungs-Dehnungs-Diagramm durch das Knie bzw. die Knistergrenze abzuleiten. In den Messungen der Permeabilitäten wird die Anisotropie beim Vergleich der ellipsenförmigen Fließfrontenausbreitung deutlich.

Generell sollte bedacht werden, dass die Kompaktierung bei Geweben begrenzt ist. Anders als bei unidirektionalen Gelegen können durch die Flottierung geringere maximale Packungsdichten erreicht werden. Die Fasern sind verdrillt, sodass die Freiheitsgrade dieser ebenfalls eingeschränkt werden. Celluloseregeneratfasern sind außerdem keine Hohlfasern, wie die meisten pflanzlichen Naturfasern, sodass eine Änderung des Querschnitts der Fasern nicht stattfindet. Um einen stärkeren Einfluss der Vorkompaktierung zu erzielen ist die Verwendung eines unidirektionalen Geleges ohne verdrillte Fasern sinnvoll.

Der Einfluss der Kompaktierung auf die Permeabilität ist durch die Steigerung im FVG massiv. Die starken Verringerungen der Permeabilitäten des kompaktierten Gewebes beeinflusst die Infusion bei der Herstellung im VARI-Verfahren maßgeblich. Die Berechnung der Fließgeschwindigkeit, um die Infusionsdauer ableiten zu können, ist jedoch sehr komplex, da die benötigten Parameter zeit- oder ortsabhängig sind. Die Messung der Infusionsdauer während der Herstellung im VARI-Verfahren ist, aufgrund des unvollständigen Aufdrehens der Klemme des Harz-Zulaufschlauches, nicht zielführend. Der Harzeinlass ist dadurch variabel, was sich wiederum stark auf die Infusion auswirkt. Es ist von einer deutlichen Steigerung der Infusionsdauer bei der kompaktierten verglichen zur unkompaktierten FKV-Herstellung auszugehen. Für die Vorkompaktierung als zusätzlicher Arbeitsschritt addieren sich zudem ungefähr 20 min zu den Prozesszeiten.

Die Ergebnisse stellen, aufgrund der fehlerhaften Druckaufbringung, keinen Vergleich der unkompaktierten und optimalen vorkompaktierten Konfigurationen dar. Obwohl dies die Beurteilung der Parameter einschränkt, ergeben sich Erkenntnisse bezogen auf das Materialverhalten und dem Kompaktierungsprozess.

9 Methodik zur Ermittlung optimaler Vorkompaktierungsparameter für Faserverbunde

Im diesem Abschnitt wird eine mögliche Methode beschrieben, um optimale Kompaktierungsparameter zu erhalten. Dabei bezieht sich das Vorgehen auf eine monozyklische Kompaktierung von trockenem Fasermaterial mit konstanter Lagenanzahl vor dem Herstellungsprozess des Faserverbundes.

Optimal bedeutet die weitmögliche Erhöhung des Eigenschaftsprofil des hergestellten Faserverbundes zu erzielen. Validiert ist die Methodik zur Optimierung der Parameter jedoch nur anhand des FVG. Dieser korreliert in der Theorie mit den Eigenschaften, was die Ergebnisse teilweise anders widerspiegeln. Deshalb wird die Faser-Matrix-Haftung als zweiter Faktor, neben dem FVG, in diese Methodik als Beurteilungsgrundlage eingeführt. Für die Gewährleistung der Faser-Matrix-Haftung ist der Fokus auf eine vollständige Benetzung der Fasern durch die Matrix zu legen.

Der erste Schritt ist das Festlegen der Rahmenbedingungen. Dazu gehören die zur Verfügung stehenden Arbeitsgeräte und deren Möglichkeiten. Die Parameter Druck, Temperatur und Geschwindigkeit können je nach Arbeitsgerät nur in gewissen Grenzen variiert oder gar nicht verändert werden. Die Dauer kann durch prozessbedingte Rahmenbedingungen ebenfalls vorzeitig eingegrenzt oder festgelegt sein. Diese konstanten Parameter sollten als erstes ermittelt werden.

Sind alle vier Kompaktierungsparameter frei wählbar, sollte die Ermittlung in einer vorgegebenen Reihenfolge geschehen. Es empfiehlt sich entweder mit der Temperatur oder der Geschwindigkeit zu beginnen.

Die Faktoren zur Optimierung der Kompaktierungstemperatur hängen von der Faserart ab. Generell soll sie unter der Zersetzungstemperatur oder Schmelztemperatur des Materials liegen. Sind die Fasern hydrophil und können Feuchtigkeit aufnehmen, ist es ratsam eine Temperatur zu wählen, bei der das Material vollständig trocken ist. Dies ist zum Beispiel bei pflanzlichen Naturfasern notwendig, bei denen eine Wasseraufnahme die Materialeigenschaften beeinflusst [Aki11] [Lam01]. Bei synthetischen Fasern wird bei Temperaturen über 100 °C ein höherer FVG erreicht, da die Reibung zwischen den Fasern reduziert wird [Ara16]. Eine TGA gibt Auskunft über den optimalen Temperaturbereich, falls die benötigten Temperaturen wie für die Feuchtigkeitsabgabe oder Zersetzung nicht bekannt sind.

Die Kompaktierungsgeschwindigkeit kann in Be- und Entlastungsgeschwindigkeiten unterteilt werden. Dabei müssen beide nicht den gleichen Wert haben. Bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten hat das Material keine Zeit zur Reorganisation und die

Relaxation sinkt, sodass innere Spannungen entstehen können. Darum empfiehlt es sich geringere Kompaktierungsgeschwindigkeiten anzustreben. Es muss zwischen längerer Prozesszeiten und den resultierenden Ergebnissen abgewogen werden.

Die optimale Kompaktierungsdauer ist von dem Relaxationsverhalten des Materials abhängig. Dies wird von Temperatur und Geschwindigkeit beeinflusst, sodass diese Parameter vorher festgelegt sein sollten. Es wird angestrebt, dass die Relaxation in der gegebenen Kompaktierungsdauer in ein Plateau läuft. Beim Entlasten sollte die Relaxation weitestgehend beendet sein, sodass die Rückstellung möglichst gering ausfällt und somit höhere FVG erzielt werden können. Relaxations- und Rückstellverhalten können über Kompaktierungsversuche aufgenommen und daraus die Kompaktierungsdauer abgeleitet werden.

Der Kompaktierungsdruck besitzt bei ansonsten konstanten Kompaktierungsparametern eine Korrelation zum FVG, die in Diagramm 12 mit den aufgenommen Messdaten dargestellt ist. Bei steigendem Druck erhöht sich der FVG und läuft in ein Plateau. Beim Start dessen befindet sich der optimal Kompaktierungsdruck. Entsprechend der Ergebnisse dieser Arbeit liegt die Steigung des Plateaus nicht bei Null. Darum sollte eine maximale Steigung zwischen den Messwerten des Plateaus definiert werden. Auf Grundlage dieses Kriteriums kann die Ermittlung des Startpunkts des Plateaus erfolgen.

In Kompaktierungsversuchen kann der Zusammenhang zwischen FVG und Kompaktierungsdruck simuliert und der optimale Druck abgeleitet werden. Dabei sollten die anderen, bereits festgelegten, Kompaktierungsparameter möglichst identisch zur Realität sein. Dies vereinfacht die Interpretation der Ergebnisse. Die Abweichungen durch die in der Realität vorhandene Matrix können nicht simuliert werden. Deshalb muss eine Überprüfung der Ergebnisse der Simulation durch Herstellung von FKV-Platten mit anschließender Dickenmessungen und Berechnung des FVG erfolgen. Hierbei kann das Kriterium zur maximalen Steigung zwischen den Messwerten des Plateaus genutzt werden.

Nach diesem Schritt sind die Kompaktierungsparameter auf Beurteilungsgrundlage des FVG optimiert. Die Korrelation von FVG und den resultierenden mechanischen Eigenschaften beruht jedoch auf zwei Annahmen, die überprüft werden müssen. Es wird davon ausgegangen, dass keine Faserschädigungen und eine ausreichende Faser-Matrix-Haftung vorliegen.

Als erstes sollen Faserschädigungen ausgeschlossen werden. Dies kann durch einen Vergleich der Garnfestigkeiten kompaktierter und unkompaktierter Garne erfolgen. Die Garnfestigkeiten können im Garnzugversuch ermittelt werden.

Im zweiten Schritt erfolgt die Überprüfung der Faser-Matrix-Haftung. Eine erste Einschätzung der Faserbenetzung kann durch visuelle Kontrolle der FKV-Platten auf trockene Stellen und Lufteinschlüsse erfolgen. Mikroskopaufnahmen oder andere bildgebende Methoden zur visuellen Überprüfung sind dabei unerlässlich. Eine Bestimmung der ILSF kann Auskunft über

Faser-Matrix-Haftung bringen, die zwischen unkompaktierten und kompaktierten Konfigurationen gleich sein sollte, sofern eine ausreichende Benetzung vorhanden ist. Die Bestimmung der ILSF ist mit einer geraden Lagenanzahl sinnvoller, da die Messwerte nur bei reinem Schubversagen gültig sind. Ebenso kann ein „Single-Fibre Pull-out“- oder ein „Single-Fibre Push-out“-Test zur Bestimmung der Faser-Matrix-Haftung durchgeführt werden. Die gesammelten Erkenntnisse zur Faser-Matrix-Haftung müssen bei der Festlegung des Kompaktierungsdrucks berücksichtigt werden.

Sind bereits Vorkenntnisse über die Auswirkungen der Kompaktierungsparameter auf das Material bekannt, sollte mit diesen die Vorgehensweise sinnvoll angepasst werden. Andere Möglichkeiten in der Verfügbarkeit von Mess- oder Arbeitsgeräten kann die Methodik ebenfalls weiter optimieren.

Bei Einschränkung der Kompaktierungsparametern durch die Rahmenbedingungen helfen die Zusammenhänge zwischen den Parametern, um gegebenenfalls trotzdem die gewünschten Materialeigenschaften zu erzielen. Durch Verwendung niedriger Geschwindigkeiten sind geringere Drücke und kürzere Zeiten zur Kompaktierung notwendig. Werden synthetische Fasern kompaktiert gilt der gleiche Zusammenhang bei Verwendung einer höheren Temperatur [Ara16].

Ist die Bestimmung der optimalen Kompaktierungsparameter über den FVG unter Berücksichtigung der Faser-Matrix-Haftung als ausschlaggebende Faktoren gelungen, erfolgt die Durchführung weitere mechanische Untersuchungen. Nach einem Vergleich unkompaktierten und optimal kompaktierten Konfigurationen kann die beschriebene Methodik beurteilt und gegebenenfalls angepasst werden.

10 Ausblick

Die Arbeit hat in verschiedenen Aspekten weiteres Forschungspotenzial aufgezeigt. Diese Punkte werden im Folgenden dargelegt. Der Fokus liegt hauptsächlich auf dem Vorkompaktierungsprozess sowie dem Celluloseregenerat.

Bei der Optimierung des Vorkompaktierungsprozesses werden einige Parameter als feststehend definiert. Eine Variation dieser im Einklang mit den hier untersuchten Parametern (Geschwindigkeit, Temperatur, Dauer, Druck) kann die Eigenschaften weiter steigern. Zu untersuchen sind die zyklische Kompaktierung und die Nasskompaktierung. Beide bieten an sich bereits viel Variationspotenzial, sodass sich ein breites Spektrum durch verschiedene Kombinationen von nass und trocken mit mono- und mehr zyklischer Kompaktierung ergibt.

Aufgrund der Einflussnahme der Parameter auf das resultierende Eigenschaftsprofil sowie der Abhängigkeiten untereinander, wird die Bestimmung optimaler Parameter erheblich komplexer.

Generell sollte ein besseres Verständnis der Kompaktierungsvorgänge angestrebt werden. Die ablaufenden Mechanismen auf den verschiedenen Größenskalen sind neben dem Einfluss der Kompaktierungsparameter materialspezifisch. Um diese mit Sicherheit bestätigen zu können, sind bildgebende Verfahren notwendig. Neben Schliffbildern, die eine aufwändige Probenpräparation benötigen, bietet ein CT eine Alternative, mit der Tiefenaufnahmen in allen drei Raumrichtungen erzeugt werden können. Allgemein ist es sinnvoll, die abgebildeten Bereiche nicht zu klein zu wählen, da durch den Bildausschnitt eine Aussage über den gesamten Verbund getroffen werden soll.

Eine Einordnung des Verbesserungspotenzials bzw. eine Beurteilung der Optimierung des Celluloseregenerat-Gewebes ist aufgrund der fehlerhaften Drücke nur begrenzt möglich. Dieser Teil bedarf einer Wiederholung. Dabei ist es vorteilhaft, die Beurteilungskriterien d.h. die mechanischen Prüfungen zu erweitern, um ein umfangreicheres Bild der resultierenden Faserverbundeigenschaften zu erhalten. Wird die Arbeit mit der gleichen Thermopresse durchgeführt und der fehlerhafte Druckaufbringung nicht gelöst, können FKV-Platten in der Größe aus Teil II der Arbeit hergestellt und untersucht werden. Der absolute Wert des Druckes ist zwar nicht bekannt, aber es handelt sich um einen Vergleich zwischen den unkompaktierten und optimal kompaktierten Verbunden.

Im Zuge dessen sollte auch die Faser-Matrix-Haftung, mit dem Fokus auf die vollständige Faserbenetzung, genauer untersucht werden. Dafür ist eine visuelle Überprüfung mit bildgebende Methoden notwendig. Eine Durchführung von „Single-Fibre Pull-out“- , „Single-Fibre Push-out“-Tests oder ILSF-Prüfungen können ebenfalls helfen. Außerdem ist auf den Fasern ein Gleitmittel aufgebracht, über das kaum Informationen vorhanden sind, das allerdings zusätzliche Auswirkungen auf die Faser-Matrix-Haftung haben kann.

Bei der Kompaktierung auftretenden Relaxation kommt es zum Spannungsabbau durch die stattfindende Reorganisation. Durch DSC-Messungen von kompaktierten und unkompaktierten Textilien können Änderungen in der Kristallinität des Celluloseregenerats überprüft werden. Ändert sich diese, kann festgehalten werden, dass der Spannungsabbau auf Mikroebene ebenfalls stattfindet.

Um eine quantitative Aussage zu der steigenden Prozesszeit durch die Vorkompaktierung zu erlangen, ist eine Ermittlung der Infusionszeiten im VARI-Verfahren über die Permeabilitätswerte erforderlich. Dies kann in einer Simulation oder komplexen Berechnung erfolgen, welche die Zeit- und Ortsabhängigkeiten der erforderlichen Parameter berücksichtigt. Benötigt werden die Viskosität der Matrix, der Druckgradient und der FVG. Diese Faktoren hängen zudem vom gewählten Material und gewählten Aufbau, wie der Art des Harzzulaufs und des Vakuumschlusses ab.

Nach Bestimmung der Materialeigenschaften des Celluloseregenerat-Gewebes mit und ohne Kompaktierungsschritt ist ein Vergleich zu anderen Materialien hilfreich, um das Eigenschaftsprofil einzuordnen. Dabei ist es zudem interessant zu sehen, ob das Materialverhalten von Celluloseregeneratfasern dem von pflanzlichen Naturfasern oder synthetischen Fasern ähnelt, da sie Eigenschaften beider kombinieren. Vor allem ein Vergleich zu pflanzlichen Naturfasern mit hohen Celluloseanteilen kann aufschlussreich sein. Diese sind in Garnen versponnen, sodass ebenfalls eine Verdrillung vorliegt. Allerdings kommt aufgrund der Garnhaarigkeit der pflanzlichen Naturfasern ein weiterer Einflussfaktor hinzu.

Eine Gegenüberstellung zu Celluloseregeneraten aus einem anderen Herstellungsverfahren, bei denen es sich beispielsweise nicht um Viskose handelt, ist durchzuführen, um das Materialverständnis zu erhöhen.

Das Potenzial der Kompaktierung ändert sich je nach textilen Flächengebilde. Aufgrund der Verfügbarkeit werden in dieser Arbeit Gewebe untersucht. Für unidirektionale Gelege sind Kompaktierungsmechanismen einfacher zu interpretieren und zeigen das höchste Potenzial, den FVG zu steigern und die mechanischen Eigenschaften zu verbessern.

Bei den verwendeten Celluloseregenerat-Geweben ist zudem ein starkes Schrumpfverhalten bei Wasseraufnahme festzustellen. Ein erster Test zeigt ein Schrumpfen des Leinwandgewebes von knapp 20 % in Kett- und knapp 9 % in Schussrichtung. Bei Aufbringen eines einzelnen Wassertropfens zieht sich das Material bereits schlagartig zusammen. In Abbildung 46 ist Schrumpfen des Leinwandgewebes durch mehrere aufgebraute Wassertropfen dargestellt.



Abbildung 46: Schrumpfverhalten des Leinwandgewebes bei Wasserkontakt

Die Schrumpfung des Materials kann zudem durch eine vollständige Trocknung nicht rückgängig gemacht werden. Dieses Materialverhalten könnte für die Kompaktierung als Vorbehandlung genutzt werden, sodass der Packungsgrad bereits durch Schrumpfen erhöht ist. Vor allem für das Köpergewebe mit Poren geht somit ein großer Teil der Uneinheitlichkeit verloren, da die Poren durch das Schrumpfen kleiner werden.

Bei Lagerung des Materials im Ofen bei 105 °C zur Vortrocknung ist eine Verfärbung zu erkennen, die mit der Zeit auftritt und ansteigt. Dabei nimmt das Material dunklere Farbtöne an, wie Abbildung 47 verdeutlicht. Die Vortrocknung ist nach Herstellerangaben bei 105 °C für mindestens 2 h durchzuführen. Bei einer längeren Lagerung in dieser Temperatur tritt die Verfärbung auf. Aufgefallen ist diese erstmals nach drei Tagen Lagerzeit. Da es sich um eine zufällige Beobachtung handelt, ist der genaue Zeitverlauf nicht bekannt. Eine Messung der Farbe kann durch ein Farbmessgerät wie ein Spektralfotometer geschehen. Zugleich hilft die Durchführung einer TGA-Messung. Die Massenänderung sollte als Funktion der Zeit bei konstanter Temperatur von 105 °C aufgenommen werden. Zum weiteren Verständnis der Ursache der Farbänderung kann zudem die Durchführung einer DSC-Messung erfolgen.



Abbildung 47: Leinwandgewebe vor Lagerung (oben) und nach der Lagerung (unten) im Ofen bei 105 °C

Als Letztes gilt es, das unklare Verhalten der Presse weiter zu untersuchen, da dieses andere Arbeiten ebenso beeinflusst. Eine Kontaktierung des Herstellers oder weitere Versuchsreihen, um die unterschiedlichen Drücke zu verstehen, sind notwendig.

11 Literaturverzeichnis

- [Aki11] *Akier, A.H.:* Untersuchungen zum Materialverhalten von Rapsstroh-Polypropylen Compounds. Technische Universität Berlin, Dissertation, Schriftenreihe Kunststoff-Forschung, Heft 73, Universitätsverlag der TU Berlin, 2011.
- [Ant12] *Antonowitz, H.; Härtel, F.; Middendorf, P.:* Aufbau und Qualifikation einer chemischen Behandlungsmethode für Flachsfasern. Institut für Flugzeugbau, 2012.
- [Ara16] *Aranda Gallardo, S.:* Contribution to the Characterization of the Compaction of Fibre Reinforcements for Composite Manufacturing and Repair. Technische Universität Clausthal, Dissertation, 2016.
- [AVK10] *AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V.:* Handbuch Faserverbundkunststoffe – Grundlagen, Verarbeitung. 3. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010, ISBN 978-3-834-80881-3.
- [Bai22] *Bai, J. (ed.):* Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications. Woodhead Publishing series in civil and structural engineering, 2022.
- [BÜF23] *BÜFA GmbH & Co. KG:* Fasern und Gewebe. 2023, <https://thermoplasticcomposites.de/de/produkte/fasern-und-gewebe/> [Zugriff am: 02.10.2023].
- [Bun21] *Bunsell, A.R.; Joannès, S.; Thionnet, A.:* Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials. Second edition, Series in Materials Sciences & Engineering, CRC Press, 2021, ISBN 978-0-367-02373-7.
- [Cha03] *Chatzigeorgiou, L.; Feiler, M.; Aoki, R.:* Machbarkeitsstudie zum Prozessmonitoring von Vakuuminfusionsverfahren mittels Lockin Thermografie. In: DGZfP-Berichtsband 86-CD, 2003, S. 83-90.
- [Che11] *Cherif, C. (Hrsg.):* Textile Werkstoffe für den Leichtbau – Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften. Springer, Berlin, 2011.
- [Cor21] *Cordenka GmbH & Co. KG:* Cordenka® Rayon – Technical Data Sheet Woven Fabrics. Ausgabe Juli 2021.
- [Cor22] *Cordenka GmbH & Co. KG:* Safety data sheet CORDENKA® yarn (Rayon) – According to Regulation (EC) no. 1907/2006. Ausgabe September 2022.

- [Cor05] *Correia, N.C.; Robitaille, F.; Long, A.C. et al.*: Analysis of the Vacuum Infusion Moulding Process: I. Analytical formulation. *In*: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 36, 2005, Heft 12, S. 1645-1656.
- [Dic15] *Dickert, M.*: Einfluss von Binder auf die Herstellung von Faserkunststoffverbunden, Technische Universität Clausthal, Dissertation, 2015.
- [Ehr06] *Ehrenstein, G.W.*: Faserverbund-Kunststoffe – Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften. 2. völlig überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2006, ISBN 978-3-446-45754-6.
- [Ehr04] *Ehrenstein, G.W.; Riedel, G.; Trawiel, P.*: Thermal Analysis of Plastics - Theory and Practice. 1. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2004, ISBN 978-3-446-22673-9.
- [End09] *Endres, H.-J.; Siebert-Raths, A.*: Technische Biopolymere – Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. Hanser, München, 2009, ISBN 3-446-41683-8.
- [Erd17] *Erdmann, J.*: Biobasierte Kunststoffe mit Cellulosefaserverstärkung – Zusammenhänge zwischen Struktur, Haftung und mechanischen Eigenschaften. Martin-Luther-Universität, Dissertation, Halle-Wittenberg, 2017.
- [Hei23] *Heinmüller, V.*: Einfluss der Vorkompaktierung auf die Permeabilität von Flachsfasertextilien. Clausthal-Zellerfeld, Technische Universität Clausthal, Bachelorarbeit, 2023.
- [Höl13] *Hölting, B.; Coldewey, W.*: Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 8. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2013, ISBN 978-3-827-42354-2.
- [Ken21] *Kenzlers, A.K.*: Composites mit vorkompaktierten Flachsfasergelegen – Untersuchung des textilen Materialverhaltens und der resultierenden mechanischen Eigenschaften. Technische Universität Clausthal, Masterarbeit, 2021.
- [Kle05] *Klemm, D.; Heublein, B.; Fink, H.-P. et al.*: Cellulose: faszinierendes Biopolymer und nachhaltiger Rohstoff. *In*: Angewandte Chemie 117, 2005, Heft 22, S. 3422-3458.
- [Klu08] *Klunker, F.*: Aspekte zur Modellierung und Simulation des Vacuum Assisted Resin Infusion. Technische Universität Clausthal, Dissertation, 2008.

- [Lam01] *Lampke, T.*: Beitrag zur Charakterisierung naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe mit hochpolymerer Matrix. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2001.
- [May20] *May, D.*: Integrierte Produktentwicklung mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Lehrbuch, Springer Vieweg, Berlin, 2020, ISBN 978-3-662-60285-0.
- [Nei14] *Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.*: Handbuch Verbundwerkstoffe – Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 1. Auflage, Carl Hanser Fachbuchverlag, 2014, ISBN 978-3-446-43696-1.
- [OBr18] *O'Brien, C.; Zaghi, A.E.*: Mechanical Characteristics of Hybrid Composites with $\pm 45^\circ$ Glass and $0^\circ/90^\circ$ Stainless Steel Fibers. *In: Materials* (Basel, Switzerland) 11, 2018, Heft 8.
- [Pan20] *Pantaloni, D.; Bourmaud, A.; Baley, C. et al.*: A Review of Permeability and Flow Simulation for Liquid Composite Moulding of Plant Fibre Composites. *In: Materials* (Basel, Switzerland) 13, 2020, Heft 21.
- [Pun23] *Punke, D.*: Anfrage Angebot - Cordenka Textilien. BÜFA GmbH & Co. KG, E-Mail, 2023.
- [Rei15] *Reich-Albrecht, S.*: Einstellen eines definierten Eigenschaftsprofils in naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffen durch chemische Modifikation der Naturfasern. Technische Universität Clausthal, Dissertation, 2015.
- [Rie11] *Rieber, G.*: Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe. Technische Universität Kaiserslautern, Dissertation, 2011.
- [Rih03] *Rihm, R.F.*: Röntgen-Strukturuntersuchungen an Celluloseregeneratfasern. Technischen Universität Berlin, Dissertation, 2003.
- [Sch07] *Schürmann, H.*: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2. bearbeitete und erweiterte Auflage, VDI-Buch, Springer, Berlin, 2007, ISBN 978-3-540-72189-5.
- [Sha13] *Shah, D.U.*: Characterisation and Optimisation of the Mechanical Performance of Plant Fibre Compisites for Structural Applications. University of Nottingham, 2013.
- [Sha15] *Shah, D.U.; Clifford, M.J.*: Compaction, Permeability and Flow Simulation for Liquid Composite Moulding of Natural Fibre Composites. *In: Salit, M.S.; Jawaid, M.; Hoque, M.E. et al. (eds.): Manufacturing of natural fibre reinforced polymer composites.* Springer, Cham, 2015.

- [Ste19] *Steuernagel, L.*: Vorlesung: Polymerwerkstoffe II. Technische Universität Clausthal, 2019.
- [Ste15] *Steuernagel, L.; Meiners, D.*: Recycling von naturfaserverstärkten Thermoplasten. In: *Thomé-Kozmiensky, k.J.; Goldmann, D.* (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 8., TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2015, S. 492-499.
- [Tür14] *Türk, O.*: Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe – Grundlagen - Werkstoffe - Anwendungen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, ISBN 3-834-81763-5.
- [Vei23] *Veit, D.*: Fasern – Geschichte, Erzeugung, Eigenschaften, Markt. Springer Vieweg, Berlin, 2023, ISBN 978-3-662-64468-3.
- [Zen05] *Zenkert, D.*: Introduction to sandwich structures – Student Edition. 2. Auflage, 2005.
- [Zwi24] *ZwickRoell GmbH & Co. KG*: Extensometer – Dehnungsmessgeräte für die Materialprüfung – eine ZwickRoell Kernkompetenz. <https://www.zwickroell.com/de/zubehoer/extensometer/> [Zugriff am: 29.07.2024].

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 Instituts- und / oder der Universitätsbibliothek einverstanden bin.

Ort, Datum

Unterschrift