

# **Prozess- und materialtechnische Entwicklung von thermoplastischen Hybridverbunden mit Holzfaserverstärkung**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
der Universität Bayreuth  
zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
Frederik Obermeier (M. Sc.)  
aus  
Landshut

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Holger Ruckdäschel  
Prof. Dipl.-Ing. Peter Karlinger

Diese Dissertation ist im Rahmen einer kooperativen Promotion mit der Technischen Hochschule Rosenheim entstanden.

Tag der mündlichen Prüfung: 19.07.2023

Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe  
Universität Bayreuth  
2023

## Kurzfassung

Aufgrund ihres Leichtbaupotentials und der vorteilhaften Ökobilanz werden thermoplastische Hybridverbunde mit Naturfaserverstärkung (z. B. Flachs, Hanf und Kenaf) seit langem in der Automobilindustrie eingesetzt. Holzfasern (z. B. Fichte) wurden in diesem Zusammenhang bisher nicht untersucht. Die mechanischen Eigenschaften von Holzfasern sind vergleichbar mit Naturfasern. Darüber hinaus bieten Holzfasern Vorzüge wie lokale Verfügbarkeit und eine vorteilhafte Ökobilanz. Bei Hybridverbunden kann zudem die gleiche Holzfaser sowohl im Anspritzmaterial als auch in flächigen Halbzeugen als Verstärkungsfaser genutzt werden. So wird ein unnötiger Materialmix vermieden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden thermoplastische Faserverbundkunststoffe mit Holzfasern untersucht. Hierzu werden Fichtefasern über ein thermo-mechanisches Aufschlussverfahren im Labormaßstab hergestellt. Diese Fichtefasern werden einerseits über einen Spritzgusscompounder mit Polypropylen und Haftvermittler direkt compoundiert, andererseits werden sie mit Polypropylenfasern über ein Airlay-Verfahren zu einem Vlies gelegt. Bei der direkten einstufigen Compoundierung werden verschiedene Holzfaseranteile von bis zu 30 Gew.-% untersucht. Mit einem steigenden Holzfaseranteil wurde eine Erhöhung der Zugeigenschaften, der Viskosität und der Dichte festgestellt. Die Holzfasern haben somit eine Verstärkungswirkung. Die Kerbschlagzähigkeit bleibt bei steigendem Holzfaseranteil im Rahmen der Standardabweichung konstant, ist jedoch im Vergleich zum unveränderten Grundpolymer geringer.

Eine charakteristische Eigenschaft direkt angespritzter Strukturen bei Hybridverbunden ist die Verbundhaftung. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Verbundfestigkeit angespritzter Rippen aus Polypropylen und Fichtefasern mit verschiedenen Vliesstoffen verglichen. Die Vliese bestehen aus Holzfasern (Fichte) oder alternativ aus Naturfasern (Kenaf und Hanf), jeweils mit einer Polypropylenmatrix. Im Kopf-Zug-Versuch zeigt sich, dass die Kerntemperatur der Vliese und die Rippengeometrie einen signifikanten Einfluss auf die Verbundhaftung haben. Ein Direkt-Compound und ein Wood-Plastic-Composite als Anspritzmaterial unterscheiden sich hinsichtlich der Verbundhaftung nicht signifikant voneinander. Natur- und Holzfaser-Hybridverbunde weisen vergleichbare Tendenzen in der Verbundfestigkeit und Mechanik auf. Weitere Tests mit Computertomographie und Durchstoßversuchen bestätigen die Ergebnisse. Holzfaserverstärkte thermoplastische Hybridverbunde können somit bezüglich ihres mechanischen Verhaltens mit Naturfaserverbundwerkstoffen konkurrieren und stellen eine geeignete Alternative dar.

## Short Summary

Due to their lightweight potential and advantageous life cycle assessment, thermoplastic hybrid composites with natural fiber reinforcement (e.g., flax, hemp, and kenaf) have long been used in the automotive industry. Wood fibers (e.g., spruce) have not yet been investigated in this context. The mechanical properties of wood fibers are comparable to those of natural fibers. Wood fibers also offer advantages such as local availability and a favorable eco-balance. The same wood fiber can be used in hybrid composites as a reinforcing fiber in the injection material and in flat semi-finished products, thus avoiding an unnecessary mix of materials.

This work investigated thermoplastic fiber composites with wood fibers. Spruce fibers were produced on a laboratory scale using a thermo-mechanical pulping process. These fibers were either directly compounded with polypropylene and a coupling agent via an injection molding compounder or were laid with polypropylene fibers via an airlay process to form a non-woven. In direct one-stage compounding, an increased wood fiber content of up to 30 wt.-% was examined. It was observed that more wood fiber content led to an increase in tensile properties, viscosity, and density. The wood fibers had a reinforcing effect. With increased wood fiber content, the notched impact strength remained constant within standard deviation but was lower than that of the unchanged base polymer.

A characteristic property of directly molded structures in hybrid composites is the bond strength. This work compared the bond strength of injection-molded ribs made of polypropylene and spruce fibers with different non-wovens. The non-wovens were made of wood (spruce) or natural fibers (kenaf or hemp), both of which have a polypropylene matrix. The pull-off test indicated that the core temperature of the non-wovens and the rib geometry significantly influenced the bond strength. A direct compound and a wood-plastic composite (WPC) as injection material showed no significant difference in the pull-off test. Natural and wood fiber hybrid composites exhibited similar trends in bond strength and mechanics with similar parameters. Further tests (puncture tests, viscosity measurements, microscopy, and computer tomography) confirmed the results. Wood-fiber-reinforced thermoplastic hybrid composites can compete with natural-fiber composites in mechanical behavior and therefore represent a good alternative for technical semi-structural applications.

# Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Holger Ruckdäschel, Herrn Prof. Volker Altstädt, Herrn Prof. Peter Karlinger sowie Herrn Prof. Michael Schemme für die Betreuung dieser Arbeit, für die Unterstützung und für die Möglichkeit, im Bereich der holzfaserverstärkten Kunststoffe forschend tätig zu sein. Besonders danke ich Herrn Prof. Holger Ruckdäschel und Herrn Prof. Volker Altstädt, die mir die kooperative Promotion von Seiten des Lehrstuhls für Polymere Werkstoffe an der Universität Bayreuth ermöglicht haben.

Zudem möchte ich mich bei Herrn Prof. Andreas Michanickl aus der Holztechnik für die Expertise zur Vlieslegung und die gemeinsame Nutzung des Refiners bedanken. Frau Prof. Sandra Krommes aus dem Wirtschaftsingenieurwesen danke ich sehr für die gemeinsame Ökobilanzierung. Ich bedanke mich außerdem bei Herrn Prof. Martin Würtele und Herrn Dr.-Ing. Erwin Bürkle für die fachliche Korrektur dieser Arbeit.

Die Daten dieser Arbeit wurden größtenteils im Rahmen des Forschungsprojekts NFRipp (Förderkennzeichen 13FH069PX6) an der Technischen Hochschule Rosenheim erhoben. Daher möchte ich mich herzlich für die Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie beim Verein Deutscher Ingenieure als Projektträger bedanken. Ich bedanke mich auch bei der Technischen Hochschule Rosenheim und dem Zentrum für Forschung, Entwicklung und Transfer für die Unterstützung.

Ich möchte allen industriellen Kooperationspartnern danken, die das Projekt NFRipp unterstützt haben (in alphabetischer Reihenfolge): Brose Fahrzeugteile (Bamberg), Faurecia Autositze (Stadthagen), Frimo (Sontra), Krauss Maffei Technologies (München), Krelus (Oberentfelden, Schweiz), Pfeiderer Deutschland (Neumarkt) und Pöppelmann (Lohne). Des Weiteren bedanke ich mich bei Borealis Polyolefine (Linz, Österreich) und Krahn Chemie (Hamburg), die Versuchsmaterialien bereitgestellt haben. Bei der Firma Autefa Solutions Austria (Linz, Österreich) möchte ich mich besonders für die gemeinsamen Vlieslegeversuche bedanken. Bei der Firma Werth (Gießen) bedanke ich mich für die Computertomographie im Rahmen unserer gemeinsamen Entwicklungsarbeit. Ebenso danke ich der Firma Volume Graphics (Heidelberg) für die Software zur Analyse der Computertomographie.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen an der Technischen Hochschule Rosenheim bedanken, die meine Arbeit direkt oder indirekt unterstützt haben. Nachfolgend in alphabetischer Reihenfolge: Wolfgang Alversammer, Simon Barth, Christian Bielenberg, Brian

Ginder, Jonas Herz, Sabine Hummel, Johann Kagerer, Alisa Kehr, Roberto Lackner, Katharina Obermeier, Theresa Pscherer, Stephan Puntigam, Bettina Ruth-Anneser, Niclas Schillinger, Wolf Schmederer, Thomas Schmid, Mara Schumacher, Rosalie Stadler, Bernd Wehnl, Sebastian Wiedl und Markus Zillmer. Danken möchte ich weiterhin allen Studierenden, die zu den erzielten Ergebnissen beigetragen haben. Nachfolgend in alphabetischer Reihenfolge: Leon Aitzetmüller, Michael Daser, Alex Jacob, Danny Michel, Fabian Miedanner, Anna Preywisch, Kilian Schöllner, Jonas Schwarz, Florian Stadler und Lukas Steinbach.

Abschließend möchte ich mich herzlich bei meinen Eltern, meiner Familie und allen Freundinnen und Freunden für die langjährige Unterstützung bedanken. Ohne deren Hilfe und Kraft wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

In Gedenken an Herrn Prof. Michael Schemme

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>II</b>
<b>Short Summary</b> .....	<b>III</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Wiederkehrende Abkürzungen</b> .....	<b>X</b>
<b>Formelzeichen</b> .....	<b>XII</b>
<b>1 Einführung und Motivation</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Forschung</b> .....	<b>5</b>
2.1  Aufbau und Einteilung von Holz- und Naturfasern.....	5
2.1.1  Holzfasern.....	5
2.1.2  Naturfasern.....	7
2.2  Herstellung von Holz- und Naturfasern.....	8
2.2.1  Herstellung von Holzfasern.....	8
2.2.2  Herstellung von Naturfasern.....	11
2.3  Compoundierung und Spritzguss von Holz- und Naturfasern.....	11
2.3.1  Mehrstufige Verarbeitungsverfahren.....	11
2.3.2  Direkt-Compoundierung.....	13
2.4  Herstellung von Vliesstoffen mit Holz- und Naturfasern.....	15
2.5  Pressbauteile mit Holz- und Naturfasern.....	16
2.6  Hybridbauteile.....	19
2.6.1  Hybridbauteile mit Glasfasern.....	19
2.6.2  Hybridbauteile mit Holz- und Naturfasern.....	20
2.7  Ökologische Betrachtung von Holz- und Naturfasern.....	24
2.8  Emissionen von Volatile Organic Compounds (VOCs) bei Holzfasern.....	26
2.9  Zusammenfassung Stand der Forschung und Ableitung der Hypothesen.....	27
2.9.1  Ableitungen zur Hypothese 1 (Direkt-Compoundierung).....	27
2.9.2  Ableitungen zur Hypothese 2 (Hybridverbunde).....	27
<b>3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit</b> .....	<b>29</b>
<b>4 Materialien</b> .....	<b>31</b>
4.1  Direkt-Compoundierung.....	31
4.2  Vlieslegung.....	31
4.3  Hybridverbunde.....	31
<b>5 Experimentelle Methoden</b> .....	<b>33</b>
5.1  Herstellung von Holzfasern.....	33

5.2	Direkt-Compoundierung.....	33
5.3	Vlieslegung.....	34
5.4	Hybridverbunde.....	35
5.4.1	Untersuchungen zur Verbundhaftung.....	35
5.4.2	Untersuchungen an einem praxisnahen Bauteil.....	38
5.5	Weitere Materialprüfungen und Untersuchungen.....	40
5.5.1	Gravimetrische Faseranalyse.....	40
5.5.2	Mechanische Prüfungen.....	40
5.5.3	Mikroskopische und bildgebende Untersuchungen.....	40
5.5.4	Rheologische Untersuchungen und PVT-Messung.....	40
5.5.5	Thermische Untersuchungen und Spektroskopie.....	41
5.5.6	Ökobilanzierung.....	41
<b>6</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>42</b>
6.1	Charakterisierung von Holzfasern.....	42
6.1.1	Herstellung und Charakterisierung von Holzfasern.....	42
6.1.2	Gravimetrische Größenverteilung.....	43
6.1.3	Zusammenfassung.....	44
6.2	Direkt-Compoundierung von Polypropylen und Holzfasern.....	45
6.2.1	Zugversuch, Viskosität und Dichte.....	45
6.2.2	Schlagzähigkeitsprüfung.....	48
6.2.3	Computertomographische Analyse der Prüfkörper.....	51
6.2.4	Faservolumenanteil und theoretisches Zugmodul.....	55
6.2.5	Weiterführende Untersuchungen.....	56
6.2.6	Zusammenfassung.....	59
6.3	Vlieslegung von Holzfaservliesen mit thermoplastischer Matrix.....	60
6.3.1	Vlieslegung.....	60
6.3.2	Zugprüfung.....	62
6.3.3	Schlagzähigkeitsprüfung.....	63
6.3.4	Zusammenfassung.....	64
6.4	Hybridverbunde, Untersuchungen zur Verbundhaftung.....	65
6.4.1	Grundlegende Prozess- und Parameterstudien.....	65
6.4.2	Einfluss der Kerntemperatur der Vliese auf die Verbundhaftung.....	70
6.4.3	Einfluss des Anspritzmaterials auf die Verbundhaftung.....	73
6.4.4	Einfluss der Rippengeometrie auf die Verbundhaftung.....	75
6.4.5	Zusammenfassung.....	79
6.5	Hybridverbunde, Untersuchungen an einem praxisnahen Bauteil.....	81
6.5.1	Einfluss der Hybridisierung von Vliesstoffen auf das Impact-Verhalten.....	81
6.5.2	Analyse der Bruchbilder.....	83



6.5.3	Umformverhalten der Vliese im Hybridverfahren.....	85
6.5.4	Weiterführende Untersuchungen .....	87
6.5.5	Zusammenfassung .....	90
6.6	Ökologischer Vergleich von Natur- und Holzfasern.....	91
6.6.1	Rahmenbedingungen .....	91
6.6.2	Vergleichende Ökobilanzierung .....	92
6.6.3	Zusammenfassung .....	95
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>97</b>
7.1	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	97
7.1.1	Hypothese 1 (Direkt-Compoundierung) .....	97
7.1.2	Hypothese 2 (Hybridverbunde).....	98
7.1.3	Technische Ziele .....	99
7.1.4	Schlussfolgerung .....	101
7.2	Summary and Conclusions.....	102
7.2.1	Hypothesis 1 (direct-compounding) .....	102
7.2.2	Hypothesis 2 (hybrid composites).....	102
7.2.3	Technical goals.....	104
7.2.4	Conclusions.....	105
7.3	Ausblick .....	106
7.3.1	Emissionen von Volatile Organic Compounds (VOCs) bei Holzfasern .....	106
7.3.2	Vlieslegung mit Vernadelung .....	107
7.3.3	One-Shot-Verfahren .....	108
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>110</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>121</b>
	<b>Publikationen .....</b>	<b>135</b>
	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>137</b>

## Wiederkehrende Abkürzungen

"	Zoll
1/min	Drehzahl
Äquiv.	Äquivalent
ATR	Attenuated total reflectance
C	Kohlenstoff
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethen
CFC11	Trichlorfluormethan
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CT	Computertomograph
CTMP	Chemo-thermo-mechanical pulp
D	Durchmesser
DIN	Deutsche Industrienorm
dtex	Dezitetex (1 dtex entspricht 1 Gramm pro 10.000 Meter)
FT-IR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
g/10 min	Gramm pro 10 Minuten (Melt-Flow-Rate)
g/m <sup>2</sup>	Gramm pro Quadratmeter (Flächengewicht)
Gew.-%	Gewichtsprozent
GPa	Gigapascal
IMC	In-Mould-Compounder
ISO	Internationale Organisation für Normung
K/min	Kelvin pro Minute (Heizrate)
K12	Wirrvlieskarde (Vlieslegeprozess)
kg/h	Kilogramm pro Stunde (Massedurchsatz)
kg/m <sup>3</sup>	Kilogramm pro Kubikmeter (Schüttgewicht)
kJ/m <sup>2</sup>	Kilojoule pro Quadratmeter
kN	Kilonewton
l/d	Längen-Durchmesser-Verhältnis
m/min	Meter pro Minute (Abzugsgeschwindigkeit)
MFR	Melt-Flow-Rate
MJ	Megajoule
ml/min	Milliliter pro Minute (Durchflussrate)
mm/s	Millimeter pro Sekunde (Einspritzgeschwindigkeit)
mm <sup>2</sup>	Quadratmillimeter
MPa	Megapascal
OEM	Original Equipment Manufacturer
Pa	Pascal
PO <sub>4</sub>	Phosphat
PP	Polypropylen
REM	Rasterelektronenmikroskop
RMP	Refiner mechanical pulp
S <sub>02</sub>	Schwefeldioxid
Sb	Antimon
SD	Standardabweichung
SGM	Spritzgussmaschine
TH	Technische Hochschule

TMP	Thermo mechanical pulp
V21R	Vorvliesbildner (Vlieslegeprozess)
VDA	Verband der Automobilindustrie
VOCs	Volatile Organic Compounds
Vol.-%	Volumenprozent
WPC	Wood-Plastic-Composite
wt.-%	percent by weight
μ	Mikro bzw. 10 <sup>-6</sup>
μg C/g	Mikrogramm Kohlenstoff pro Gramm Probe (VOC-Messung)

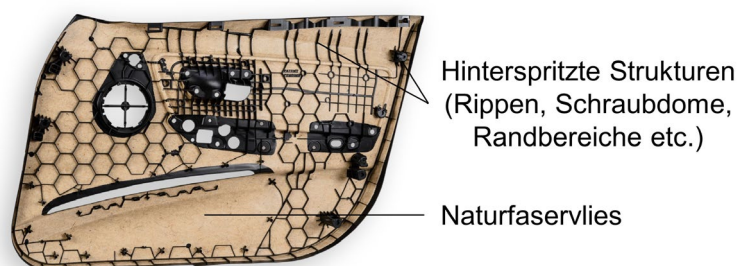
## Formelzeichen

$A_{\text{ref}}$	Referenzfläche [mm <sup>2</sup> ]
$E$	Durchstoßenergie [J]
$E_{\parallel}$	Zugmodul des Faserverbunds parallel zur Faserrichtung [MPa]
$E_{\text{Faser}}$	E-Modul der Faser [GPa]
$E_{\text{Matrix}}$	E-Modul der Matrix [MPa]
$F$	Kraft (z. B. Stoßkraft oder Abzugskraft) [N]
$F_{\text{max}}$	Maximale Kraft (z. B. Stoßkraft oder Abzugskraft) [N]
$h$	Höhe [m]
$l$	Verformung [mm]
$m$	Gewicht [kg]
$s$	Abzugsweg [mm]
$s_{\text{max}}$	Abzugsweg bei $F_{\text{max}}$ [mm]
$v$	Geschwindigkeit [m/s]
$\rho_{\text{Faser}}$	Dichte der Holzfaser [g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{Matrix}}$	Dichte der Matrix [g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma_{\text{max}}$	Maximale Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\varphi$	Faservolumenanteil [Vol.-%]
$\psi$	Fasergewichtsanteil [Gew.-%]

# 1 Einführung und Motivation

Leichtbau, ressourcenschonende Fertigungstechnologien und der Einsatz nachwachsender Rohstoffe sind zentrale Themen der Kunststoffindustrie des 21. Jahrhunderts. Biocomposites aus thermoplastischen oder duroplastischen Matrices mit Holzfasern (z. B. Fichte) oder anderen Naturfasern (z. B. Flachs, Hanf und Kenaf) werden seit langem in der Automobilindustrie eingesetzt [1-5]. Vorteile dieser Materialkombinationen sind ein geringes Gewicht, kurze Zykluszeiten und eine gute Ökobilanz [6]. In der Kunststofftechnik werden dabei Holzfasern und Naturfasern häufig separat genannt (siehe 2.1 Aufbau und Einteilung von Holz- und Naturfasern) [7].

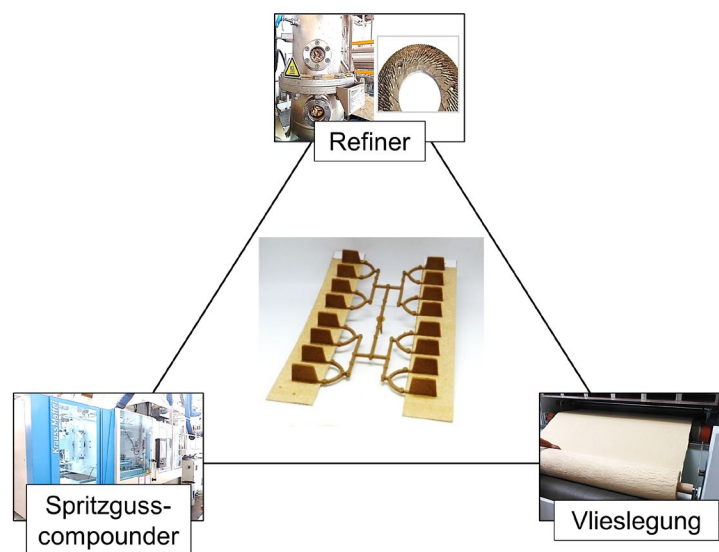
Die Hauptanwendungsbereiche stellen beispielsweise Türverkleidungen und Instrumententafeln im Automobilinterieur dar (siehe Abbildung 1). Thermoplastische Matrices setzen sich gegenüber den lange dominierenden duroplastischen Matrices immer mehr durch, da thermoplastische Verbunde im Gegensatz zu duroplastischen Systemen in hybriden Verfahren wie dem Hinterspritzen (bzw. One-Shot-Verfahren) verwendet werden können [6]. Während Naturfasern seit langem in Verbindung mit Thermoplasten und Hybridverfahren eingesetzt werden, sind Holzfasern in diesem Zusammenhang noch nicht untersucht worden. In bisherigen Sammelwerken und aktuellen Review-Veröffentlichungen werden hybride Verarbeitungsmethoden und das Hinterspritzen von Holzfaserverbundwerkstoffen nicht erwähnt [2-11].



**Abbildung 1** Türverkleidung aus dem Automobilinterieur, Naturfaservlies mit hinterspritzten Strukturen, Bild von Yanfeng Automotive Interiors [12]

Die mechanischen Eigenschaften von Holzfasern (z. B. Fichte) und Naturfasern (z. B. Flachs, Hanf und Kenaf) sind ähnlich [13]. Zudem haben Holzfasern diverse Vorteile gegenüber Naturfasern. So können Holzfasern lokal produziert und genutzt werden. Für diese Arbeit wurde das verwendete Holz beispielsweise im Rosenheimer Umland gewonnen. Die lokale Verfügbarkeit kann im Vergleich zu Naturfasern zu einer positiven Ökobilanz führen (siehe Abschnitt 6.6 Ökologischer Vergleich von Natur- und Holzfasern). Des Weiteren wird im Vliesstoff und im Anspritzmaterial die gleiche Holzfaser verwendet. Somit wird ein unnötiger Materialmix vermieden [14, 15].

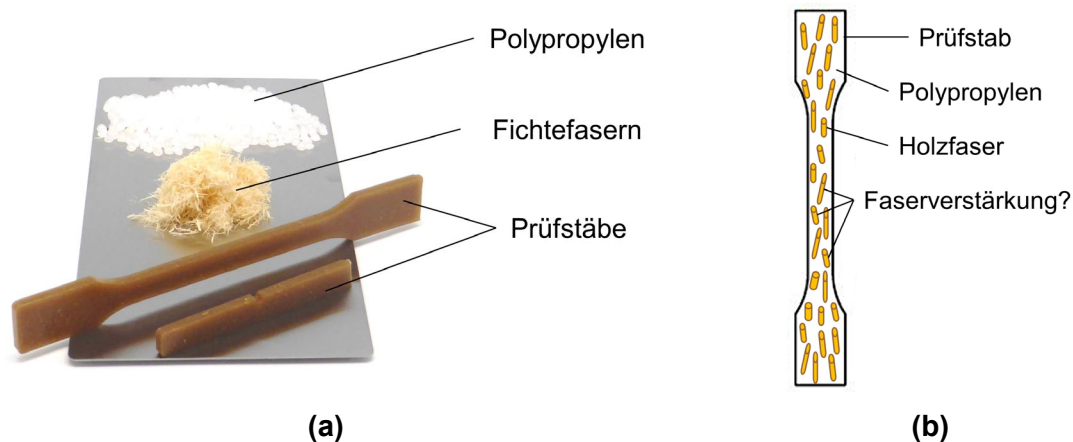
Im Sinne der nationalen Bioökonomiestrategie werden mit der Forschungsanlage MUNACU an der Technischen Hochschule Rosenheim thermoplastische Faserverbundkunststoffe mit Holzfasern untersucht. Dabei können Holzfasern mit einem Refiner über ein thermo-mechanisches Aufschlussverfahren im Labormaßstab hergestellt und über einen Spritzgusscompounder direkt verarbeitet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird zusätzlich die Technologie des Vlieslegens in Zusammenarbeit mit der Firma Autefa Solutions Austria GmbH genutzt. Die Betrachtung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfaserverstärkung in dieser Arbeit ergibt sich aus der Kombination der Technologien Refiner, Vlieslegung und Spritzguss bzw. Spritzgusscompounder (siehe Abbildung 2).



**Abbildung 2** Zur prozess- und materialtechnischen Entwicklung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfaserverstärkung sind drei Technologien relevant: Refiner, Vlieslegung und Spritzgusscompounder

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine wissenschaftliche Grundlage für die prozess- und materialtechnische Entwicklung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfaserverstärkung zu schaffen. Dies soll eine Basis für erste Bauteilentwicklungen darstellen. Potentielle Wachstumsmärkte für Biocomposites sind vor allem der Bausektor, der Automobilsektor sowie kleine neue Elektroautohersteller [6]. Zur Erreichung dieses Ziels werden verschiedene Prozessschritte einzeln betrachtet (siehe 3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit). Auf Basis des aktuellen Stands der Forschung (siehe 2 Grundlagen und Stand der Forschung) wurden zwei Hypothesen definiert, die in dieser Arbeit untersucht werden. Die Ableitung der Hypothesen aufgrund des Stands der Forschung wird in Abschnitt 2.9 (siehe 2.9 Zusammenfassung Stand der Forschung und Ableitung der Hypothesen) dargestellt.

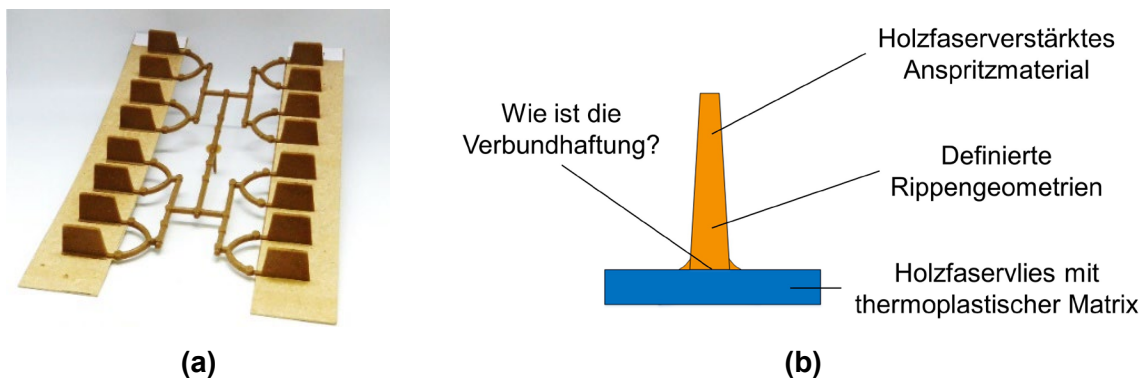
In den meisten Veröffentlichungen zu thermoplastischen Kunststoffen in Verbindung mit Holzmehl oder Holzfasern werden klassische mehrstufige Verarbeitungsprozesse (Compoundierung, Granulierung und Spritzguss) beschrieben. Zur Direktverarbeitung von Holz in der Kunststofftechnik gibt es bisher nur wenige Studien. In diesen Studien wurden keine Holzfasern, sondern Holzmehl untersucht. Ergänzend zum Stand der Wissenschaft und Technik werden in dieser Arbeit Holzfasern (Fichtefasern) aus einem thermo-mechanischen Aufschlussprozess (Refiner) auf einem Spritzgusscompounder direkt compoundiert (siehe Abbildung 3). Es soll untersucht werden, ob durch Direkt-Compoundierung von Polypropylen mit Holzfasern eine Faserverstärkung bzw. eine Verbesserung der Mechanik in Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit im Vergleich zum Grundpolymer ohne Holzfasern erreicht werden kann. Es soll der Einfluss eines steigenden Holzfaserteils auf die grundlegende Mechanik, Viskosität und Dichte herausgearbeitet werden. Dabei wird beurteilt, ob durch diesen Prozess und diese Werkstoffe eine Faserverstärkung möglich ist [7]. Durch ergänzende Untersuchungen mittels Mikroskopie und Computertomographie werden maßgebliche Effekte der Faser-Matrix-Interaktion beschrieben (siehe Abschnitt 6.2 Direkt-Compoundierung von Holzfasern).



**Abbildung 3** Direkt-Compoundierung von Holzfasern und Polypropylen, **(a)** Polypropylengranulat (hinten), Fichtefasern aus einem thermo-mechanischen Aufschlussprozess mit Refiner (mittig), Zugprüfstab und Kerbschlagbiegeprüfstab aus Polypropylen mit 20 Gew.-% Fichte (vorne) über Spritzgusscompounder direkt compoundiert [7], **(b)** schematische Darstellung, ist eine Faserverstärkung möglich?

Während Naturfasern seit langem in Verbindung mit thermoplastischen Matrizes und Hybridverfahren verwendet werden, wurden Holzfasern für Hybridverfahren wie das Hinterspritzen noch nicht untersucht. In aktuellen Review-Artikeln werden keine hybriden Verarbeitungsmethoden oder das Hinterspritzen von Holzfaserverbundwerkstoffen erwähnt. Eine charakteristische Eigenschaft direkt angespritzter Strukturen ist die Verbundhaftung. Ergänzend zum Stand der Wis-

senschaft und Technik wird die Verbundhaftung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfasern auf grundlegende Effekte untersucht. Es wird analysiert, ob die Verbundhaftung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfasern durch Prozessparameter, Anspritzmaterial und Rippengeometrie beeinflusst wird. Dabei werden Wirkzusammenhänge von Prozessfenster, Mechanik, Viskosität und Dichte herausgearbeitet. Es wird beurteilt, ob thermoplastische Hybridverbunde mit Holzfasern mit dem Stand der Technik aus Naturfasern konkurrieren können. Die Materialcharakterisierung erfolgt über Kopf-Zug-Versuche (siehe Abbildung 4 und Abschnitt 6.4 Hybridverbunde, Untersuchungen zur Verbundhaftung) und Durchstoßversuche (siehe Abschnitt 6.5 Hybridverbunde, Untersuchungen an einem praxisnahen Bauteil). Über ergänzende Untersuchungen werden prozess- und materialtechnische Eigenschaften der thermoplastischen Hybridverbunde charakterisiert (z. B. Umformverhalten) [15].



**Abbildung 4** Thermoplastische Hybridverbunde mit Holzfasern, **(a)** Prüfkörper zur Untersuchung der Verbundhaftung im Kopf-Zug-Versuch, Holzfaservlies mit angespritzten Rippen aus direkt-compoundierten Holzfasern mit Polypropylen, **(b)** schematische Darstellung, wie ist die Verbundhaftung und wie wird diese beeinflusst?

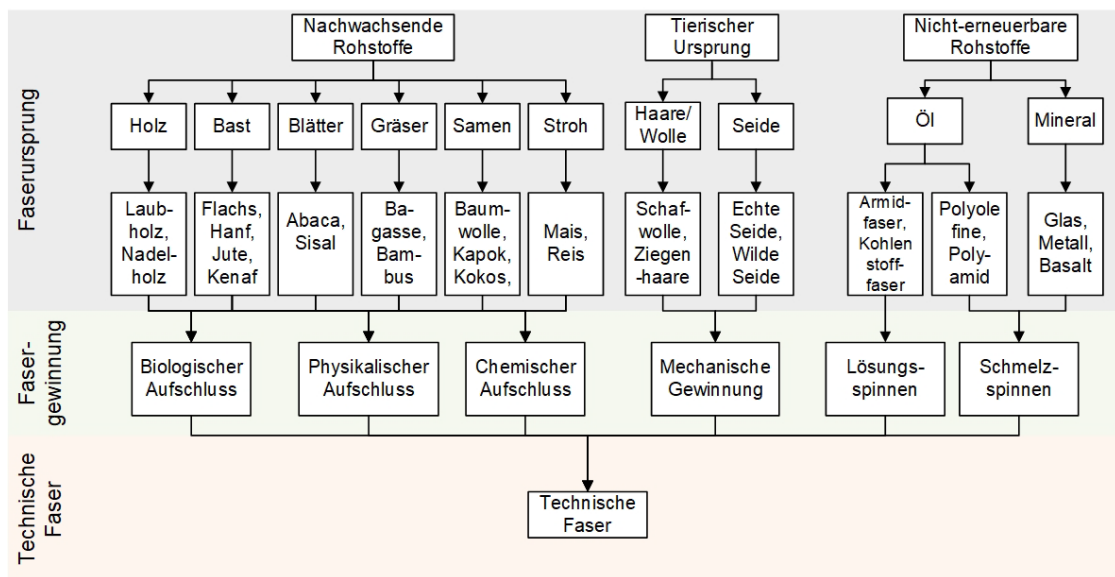
Ein möglicher Anwendungsbereich der untersuchten Materialkombinationen liegt im Automobilinterieur. Vor diesem Hintergrund werden im Ausblick der Arbeit weitere Eigenschaften der Materialien besprochen (siehe 7.3 Ausblick). Emissionsmessungen von Volatile Organic Compounds (VOCs) aus Holz, Holzfasern und Vliesstoffen mit Holzfasern werden ermittelt. Es sollte eine erste Einschätzung getroffen werden, ob der typische Grenzwert im Automobilinterieur von  $50 \mu\text{g C/g}$  eingehalten werden kann. Des Weiteren werden prozesstechnische Alternativen diskutiert (Veredelung von Vliesstoffen und One-Shot-Verfahren).



## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

### 2.1 Aufbau und Einteilung von Holz- und Naturfasern

Ein Teil der nachfolgenden Literatur im Abschnitt 2 wurde bereits in Veröffentlichungen im Rahmen des Promotionsvorhabens diskutiert [7, 15]. Naturfasern sind in der DIN 60001 kategorisiert. Demnach können Naturfasern pflanzlichen, tierischen oder mineralischen Ursprungs sein. Pflanzliche Naturfasern können in Samenfasern (z. B. Baumwolle), Bastfasern (z. B. Flachs, Hanf, Kenaf) und Hartfasern (z. B. Sisal und Kokos) unterschieden werden. Holzfasern werden in dieser Norm nicht erwähnt [7, 16]. In der Kunststofftechnik werden Holzfasern (z. B. Fichte) und Naturfasern (z. B. Flachs, Hanf, Kenaf) folglich häufig separat genannt [7]. Nachfolgende Abbildung zeigt die Einteilung technischer Fasern nach Ursprung und Gewinnung. Diese Einteilung wurde auf Basis der DIN 60001 erstellt und entsprechend an der Hochschule Rosenheim angepasst.

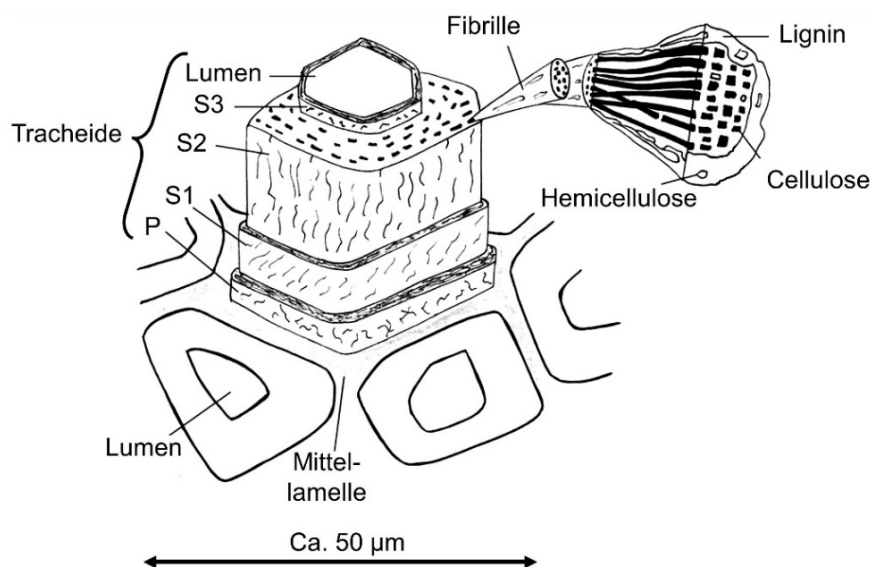


**Abbildung 5** Einteilung technischer Fasern nach Ursprung und Gewinnung auf Basis der DIN 60001 [16], angepasste und ergänzte eigene Darstellung der Technischen Hochschule (TH) Rosenheim

#### 2.1.1 Holzfasern

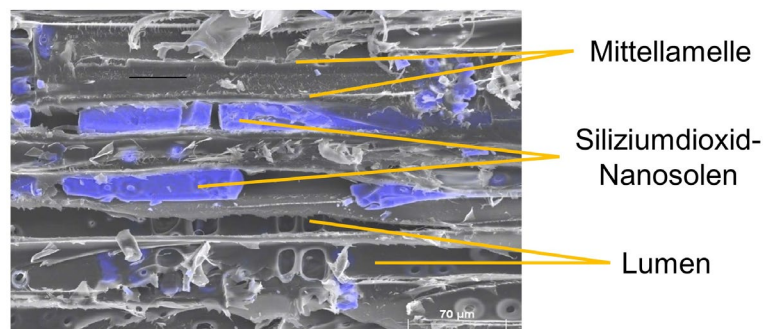
Holzfasern sind ein komplexer Werkstoffverbund. Abbildung 6 zeigt den schematischen Aufbau einzelner Tracheiden mit Lumen und deren Verbindung aus Mittellamellen [7, 17]. Tracheiden setzen sich aus einer Primärwand (P) und drei Sekundärwandschichten (S1, S2 und S3) zusammen. Diese Schichten bestehen aus Cellulosefibrillen, die in Hemicellulose und Lignin eingebettet

sind. Tracheiden haben einen Hohlraum in der Mitte, der als Lumen bezeichnet wird. Die einzelnen Tracheiden werden durch eine Mittellamelle verbunden, die zu 90 % aus Lignin besteht. Die Primärwand (P) besteht hauptsächlich aus ungeordneten Cellulosefibrillen und Lignin. Die Dicke liegt im Bereich von 0,1 bis 0,2  $\mu\text{m}$ . Die Sekundärwand S1 hat eine Dicke von 0,12 bis 0,35  $\mu\text{m}$  und besteht aus Fibrillen, die einen Winkel von 40 bis 50° zur Faserachse aufweisen. Die Schicht S2 hat eine Dicke von 1 bis 5  $\mu\text{m}$  und die Fibrillen verlaufen fast parallel zur Faserrichtung. S2 weist wenig Lignin und Hemicellulose auf, macht allerdings 80 bis 90 % des Faserwandmaterials aus. Der Aufbau der Schicht S3 ist vergleichbar mit S1 und hat eine Dicke im Bereich von 0,1 bis 0,14  $\mu\text{m}$  [7, 17].



**Abbildung 6** Prinzipieller Aufbau von Holz [7, 17]

Für Verfahren zur Holzmodifizierung oder zum Holzschutz wurden die Eindringwege von Flüssigkeiten in Holz untersucht. Abbildung 7 zeigt das Eindringen von Siliziumdioxid-Nanosolen in Kiefernholz über die Lumen der Tracheiden [18].



**Abbildung 7** Kiefernholz wurde mit Siliziumdioxid-Nanosolen (in blau) getränkt, REM-Aufnahme mit EDX-Mapping [18]

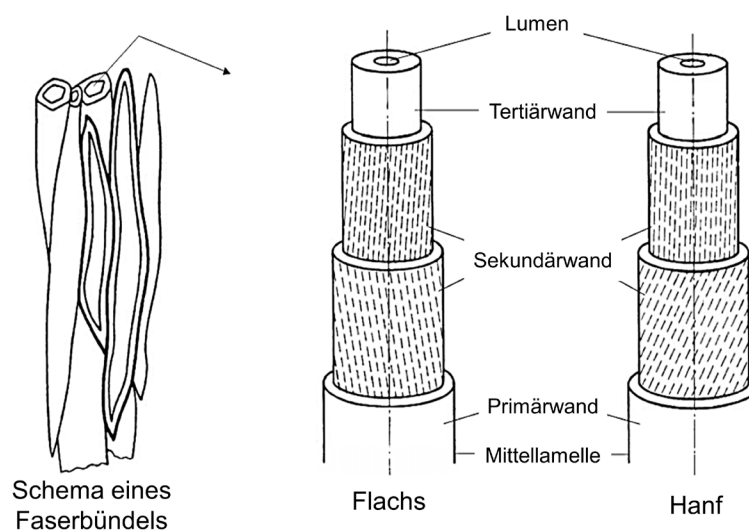
Bledzki et al. vergleichen die Dichte, die Zugfestigkeit und den Zugmodul von Nadelholz, Naturfasern und Standardverstärkungsfasern der Kunststofftechnik (siehe Tabelle 1). Hierbei nehmen Bledzki et al. für die Dichte von Holz  $1,5 \text{ g/cm}^3$  an [7, 13]. Die Rohdichte von Fichte mit Lumen im darrtrockenen Zustand liegt im Bereich von  $0,42 \text{ g/cm}^3$  [7, 19].

**Tabelle 1** Zugfestigkeit und Zugmodul einiger typischer Verstärkungsfasern der Kunststofftechnik im Vergleich zu Nadelholz [7, 13, 20]

Faser	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Zugfestigkeit [MPa]	Zugmodul [GPa]
Nadelholz	1,5	1000	40
Flachs	1,5	345-1035	27,6
Sisal	1,5	511-635	9,4-22
E-Glas	2,6	3400	73
Aramid (hochsteif)	1,45	3000	130
Carbon (hochfest)	1,78	3600	240

### 2.1.2 Naturfasern

Es gibt diverse Veröffentlichungen, die sich mit dem Aufbau von Naturfasern beschäftigen. Im Aufbau ähneln Hanf-, Flachs- und Kenaffasern einander stark [2, 21, 22]. Es gibt geringe mikroskopische Unterschiede in den Fasern. Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau von Flachs- und Hanffasern. Lampke betont, dass über den Richtungsverlauf der Fibrillenbündel noch Unklarheit besteht [21]. Zudem variiert die Wuchslänge: Flachs kann bis zu 120 cm hoch wachsen, während Hanfpflanzen in Deutschland eine Höhe von 2 m erreichen [21, 22].

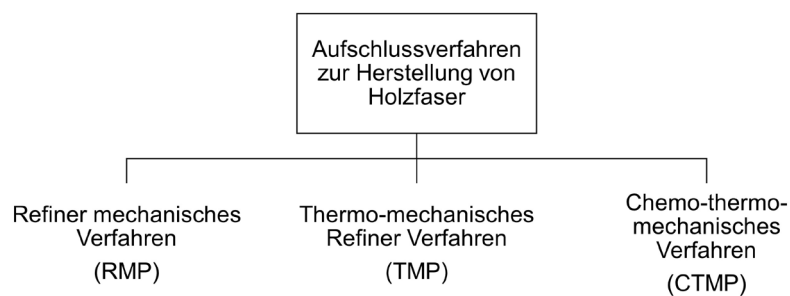


**Abbildung 8** Schematischer Aufbau der Elementarfasern von Flachs und Hanf [21]

## 2.2 Herstellung von Holz- und Naturfasern

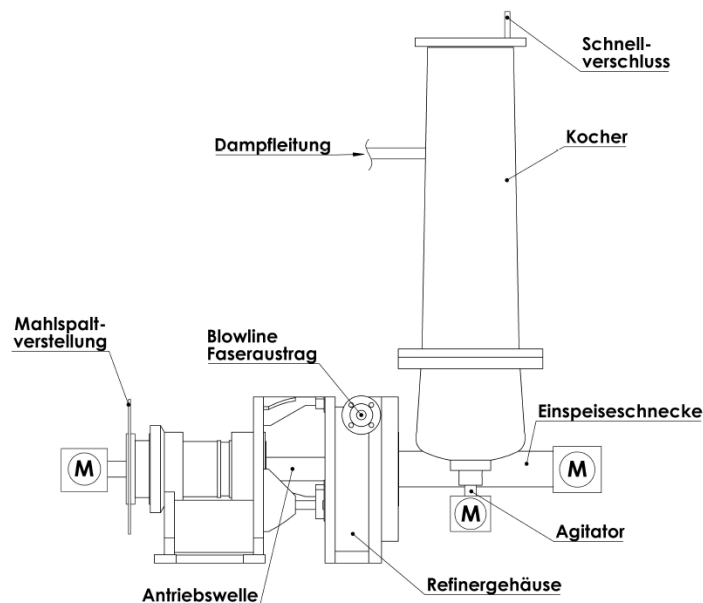
### 2.2.1 Herstellung von Holzfasern

Es gibt diverse Aufschlussverfahren zur Herstellung von Holzfasern. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen chemischen und mechanischen Aufschlussverfahren. Für diese Arbeit ist lediglich das thermo-mechanische Refiner Verfahren (TMP) als Teil der mechanischen Aufschlussverfahren relevant. Bei Refiner Verfahren wird zwischen rein mechanisch (RMP, refiner mechanical pulp), thermo-mechanisch (TMP, thermo mechanical pulp) und chemo-thermo-mechanisch (CTMP, chemo-thermo mechanical pulp) unterschieden [23].



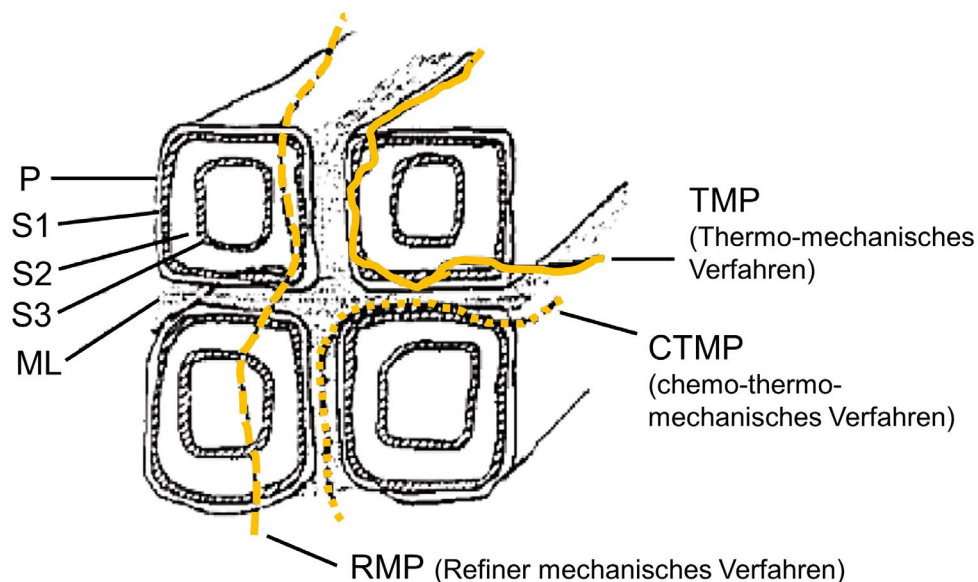
**Abbildung 9** Übersicht zu Aufschlussverfahren zur Herstellung von Holzfasern nach [23]

Bei thermo-mechanischen Refiner Verfahren handelt es sich meist um Scheibenrefiner mit Mahlscheiben im Refinergehäuse (siehe Abbildung 10). Dabei werden Hackschnitzel mittig zwischen Mahlscheiben in den Prozess eingeleitet. Die Hackschnitzel werden von der Mitte über die sich drehenden Mahlscheiben nach außen transportiert und dabei zerkleinert [23].



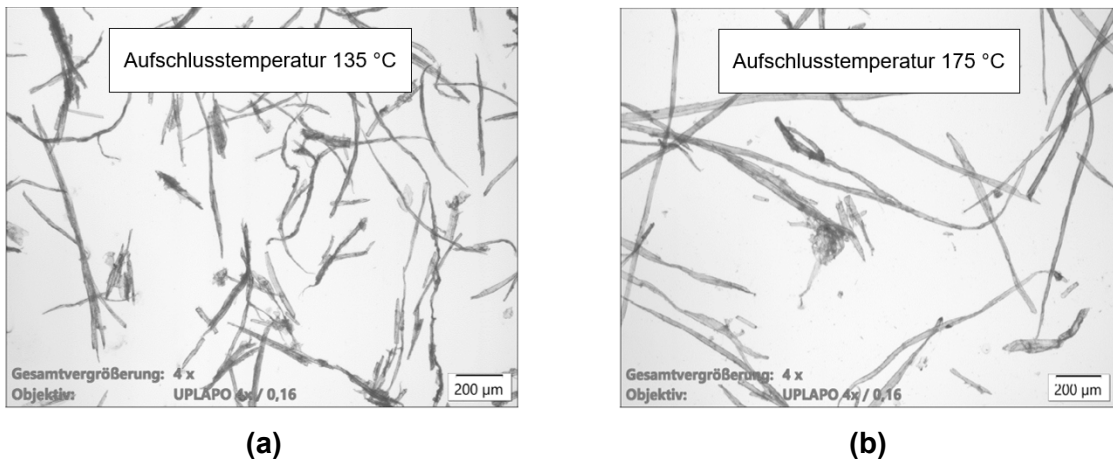
**Abbildung 10** Schematische Darstellung einer Laborrefineranlage für ein thermo-mechanisches Aufschlussverfahren (TMP, thermo mechanical pulp) [24]

Beim RMP-Verfahren (refiner mechanical pulp) werden Hackschnitzel in einem drucklosen Refiner unter atmosphärischem Druck zu Fasern aufgeschlossen. Der RMP-Prozess wurde zum TMP- (thermo-mechanisch) und CTMP-Verfahren (chemo-thermo-mechanisch) weiterentwickelt. Beim TMP-Verfahren werden die Hackschnitzel thermisch und beim CTMP thermisch und chemisch vorbehandelt. Bei allen Prozessen gilt, dass Einzelfasern und Faserbündel aus dem Holz herausgelöst werden, indem das Lignin und die Hemicellulosen der Mittellamelle und der Primärwand erweicht werden [23, 24]. Die Begriffe Einzelfasern und Faserbündel werden in Abschnitt 6.1 (vgl. 6.1 Herstellung und Charakterisierung von Holzfasern) definiert. Nach Ek et al. unterscheiden sich die Frakturzonen der Holzsubstanz (siehe Abbildung 11) je nach Aufschlussverfahren [25].



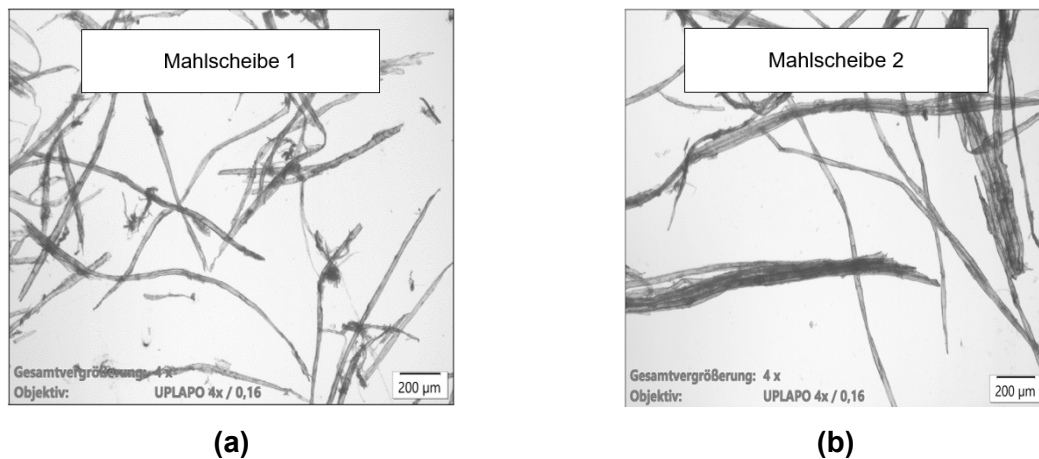
**Abbildung 11** Schematische Darstellung der unterschiedlichen Frakturzonen der Holzsubstanz je nach Aufschlussverfahren [25], ML: Mittellamelle, P: Primärwand, S1 bis S3: Sekundärwandschichten (siehe Abbildung 6)

Barth hat sich an der Technischen Hochschule (TH) Rosenheim mit der thermo-mechanischen Herstellung von Holzfasern aus Fichte beschäftigt. Ihm zufolge führt eine höhere Aufschlusstemperatur zu einem geringeren Feinanteil bzw. weniger Bruchstücken von Tracheiden und Faserbündeln (siehe Abbildung 12). Barth gibt zur Quantifizierung den Median aus der Luftstrahlsieb-analyse an. Demnach führt eine Aufschlusstemperatur von 135 °C zu einem Median von 153 µm und eine Aufschlusstemperatur von 175 °C zu einem Median von 175 µm [24].



**Abbildung 12** Mikroskopische Aufnahmen von Holzfasern aus Fichte, die durch einen thermo-mechanischen Prozess bei gleicher Mahlscheibengeometrie und unterschiedlicher Aufschlusstemperatur hergestellt wurden, **(a)** Aufschlusstemperatur von 135 °C, es sind zahlreiche Bruchstücke von Tracheiden und Faserbündeln erkennbar, **(b)** Aufschlusstemperatur von 175 °C, im Vergleich weniger Bruchstücke erkennbar [24]

Des Weiteren hat Barth unterschiedliche Mahlscheiben untersucht. Dabei konnte ein Einfluss der Mahlscheiben auf die Fasergeometrie nachgewiesen werden. Bei einer Aufschlusstemperatur von 150 °C sind bei Mahlscheibe 1 im Vergleich zu Mahlscheibe 2 deutlich mehr Bruchstücke von Tracheiden zu finden (siehe Abbildung 13). Demnach führt Mahlscheibe 1 zu einem Median von 269 µm und Mahlscheibe 2 zu einem Median von 679 µm [24].



**Abbildung 13** Mikroskopische Aufnahmen von Holzfasern aus Fichte, die durch einen thermo-mechanischen Prozess bei gleicher Aufschlusstemperatur von 150 °C und unterschiedlicher Mahlscheibengeometrie hergestellt wurden, **(a)** Mahlscheibe 1 zeigt deutlich Bruchstücke von Tracheiden, **(b)** Mahlscheibe 2 zeigt Tracheiden und Faserbündel [24]

## 2.2.2 Herstellung von Naturfasern

In dieser Arbeit werden Kenaf- und Hanffasern verwendet, die zu den Bastfasern zählen, also Naturfasern, die aus Pflanzenstängeln gewonnen werden [2]. Für die Gewinnung von Bastfasern werden Pflanzen mit einem möglichst hohen Faseranteil verwendet, der vor allem bei einjährigen Pflanzen vorkommt. Nach der Wachstumsphase werden die zwischen 60 und 160 cm (Flachs) bzw. 2 und 7 m (Hanf, 2 m in Deutschland, 4 bis 7 m in ursprünglichen Anbauländern [26]) hohen Pflanzen gemäht oder gerauft. Im Gegensatz zum Mähen wird beim Raufen die Pflanze mitsamt ihrer Wurzel aus dem Boden gezogen [27]. Dabei werden die Pflanzen mit Raufmaschinen geerntet und für die Feldröste für bis zu sechs Wochen auf dem Feld abgelegt. Der Einfluss von Feuchte und Mikroorganismen vereinfacht die Fasergewinnung, erhöht dabei allerdings gleichzeitig das Risiko für Faserschädigungen [28]. Im Anschluss an den Mäh- oder Raufprozess wird der Pflanzenstängel aufgeschlossen, um Faserbündel und Elementarfasern daraus gewinnen zu können [2, 27]. Neben der Feldröste existieren auch die Winter-, Wasser-, Schlamm- und Warmwasserröste [26]. Durch eine Wasserröste soll eine gleichmäßigere Fasergewinnung möglich sein. Dabei werden die Fasern durch eine kontrollierte Warmwasserrotte gewonnen. Dieser Prozess erfordert hohe Mengen an Frischwasser. Dadurch entstehen nicht nur hohe Produktionskosten, sondern auch große Mengen an Gärresten. Dem Frischwasser werden dabei Mikroorganismen oder Enzyme zur Unterstützung und Lenkung des Rotteprozesses zugesetzt [22].

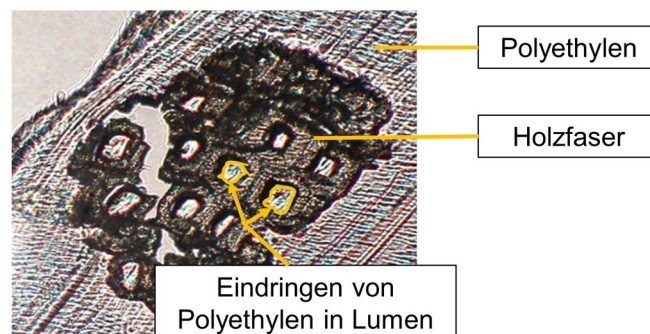
## 2.3 Compoundierung und Spritzguss von Holz- und Naturfasern

### 2.3.1 Mehrstufige Verarbeitungsverfahren

Veröffentlichungen von Bledzki et al. geben eine Übersicht über Untersuchungen und Anwendungen zu Natur- und Holzfasern als Verstärkung in Polymeren [13, 29]. Ergebnisse diverser Untersuchungen zeigen die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Polypropylen durch verschiedene Holzfasern in Kombination mit Maleinsäureanhydrid als Haftvermittler. Die Veröffentlichungen beschränken sich auf mehrstufige Verarbeitungsverfahren [30-36].

Schirp und Stender extrudierten und untersuchten Kiefernfasern aus einem thermo-mechanischen Aufschluss und mechanisch aufgeschlossene Hanffasern in einem zweistufigen Prozess. Als Referenzmaterial wurde Holzmehl (J. Rettenmaier & Söhne, Lignocel® BK 40/90) verwendet. Der Faseranteil wurde konstant bei 70 Gew.-% gehalten. Als Matrix wurde ein Polypropylen mit Polyethylen-Copolymer sowie ein Polypropylen mit Maleinsäureanhydrid und Gleitmittel verwendet. Die Materialkombinationen wurden auf einem Heizmischer vermengt und auf einem konischen, gegenläufigen Doppelschneckenextruder in Platten extrudiert. Ohne Maleinsäureanhydrid

konnte bei Holzfasern und Hanffasern keine Verbesserung der Festigkeit im Vergleich zum Holzmehl festgestellt werden. Mit Haftvermittler konnte bei Hanffasern im Vergleich zu Holzmehl eine höhere Biegefestigkeit erreicht werden [36]. Mit Polyethylen als Matrix konnten Schirp et al. bei Buchefasern aus einem thermo-mechanischen Aufschluss keine Verbesserung der Biegefestigkeit im Vergleich zu Holzmehl feststellen [37]. Peltola et al. untersuchten chemisch gebleichten Zellstoff aus Kiefer und Fichte, gebleichten Zellstoff aus Eukalyptus und Birke sowie mit Peroxid gebleichte Fichtefasern aus einem thermo-mechanischen Aufschluss. Teilweise wurden die Fasern vorab pelletiert, was die Dosierung vereinfachte. Als Referenzmaterial wurde ein Holzmehl aus Kiefer und Fichte verwendet. Als Matrix wurde Polypropylen und als Haftvermittler Maleinsäureanhydrid verwendet. Die Materialien wurden über einen Doppelschneckenextruder mit einem Faseranteil von 30 Gew.-% compoundiert und in einem zweiten Schritt mit einer Spritzgussmaschine verarbeitet. Die Fasern führten zu deutlich besseren mechanischen Kennwerten im Vergleich zum Holzmehl. Beim Grundpolymer wurde im Mittel eine Zugfestigkeit von 22,5 MPa und eine Schlagzähigkeit von 65,5 kJ/m<sup>2</sup> (ungekerbt) bestimmt. Durch die Fichtefasern erhöhte sich die Zugfestigkeit im Mittel auf 35,5 MPa. Die Schlagzähigkeit sank auf 17 kJ/m<sup>2</sup> [35]. Bledzki et al. untersuchten Faserverbunde mit Polypropylen und einer Kombination aus Regeneratcellulose und Holzmehl (Jeluwerk, Jeluxyl Weho500, Fichte und Tanne). Als Haftvermittler wurde Maleinsäureanhydrid verwendet. Die Materialien wurden über einen Laborextruder vermischt und anschließend spritzgegossen. Die Zugfestigkeit des Grundpolymers lag zwischen 25 und 30 MPa. Bei der Materialkombination mit 40 Gew.-% Holzmehl stieg die Zugfestigkeit auf 49 MPa. Bei 40 Gew.-% Regeneratcellulose stieg die Zugfestigkeit auf 72 MPa [38]. Gacitua und Wolcott konnten zeigen, dass Polymere in Lumen von Holz eindringen können. Das Eindringverhalten ist abhängig von der Viskosität der Polymere. Abbildung 14 zeigt Polyethylen, das in Lumen eingedrungen ist. Inwiefern dies die Mechanik des Faserverbunds beeinflusst, wurde nicht untersucht [39].

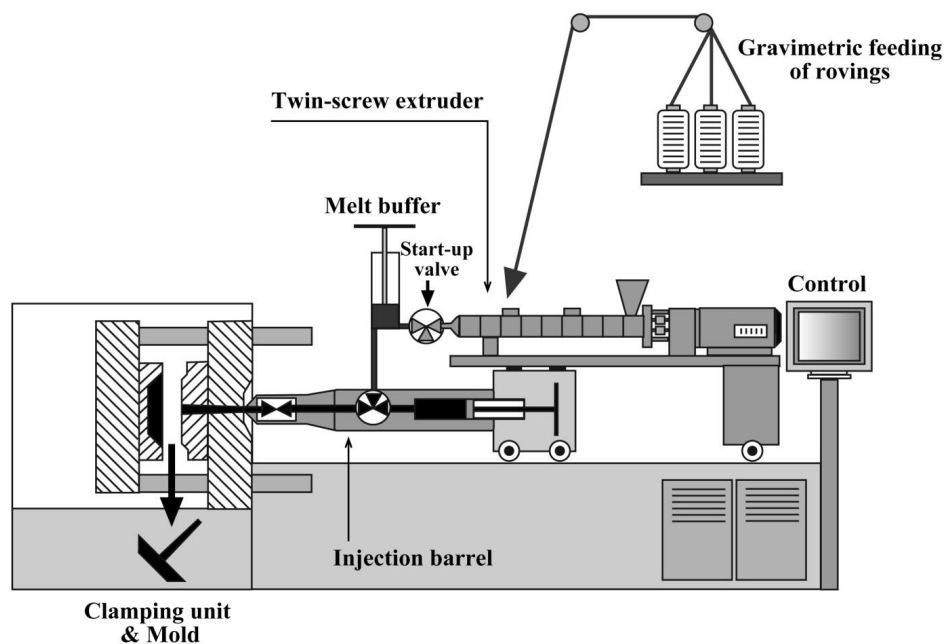


**Abbildung 14** Polyethylen dringt in Lumen einer Holzfaser ein [40]



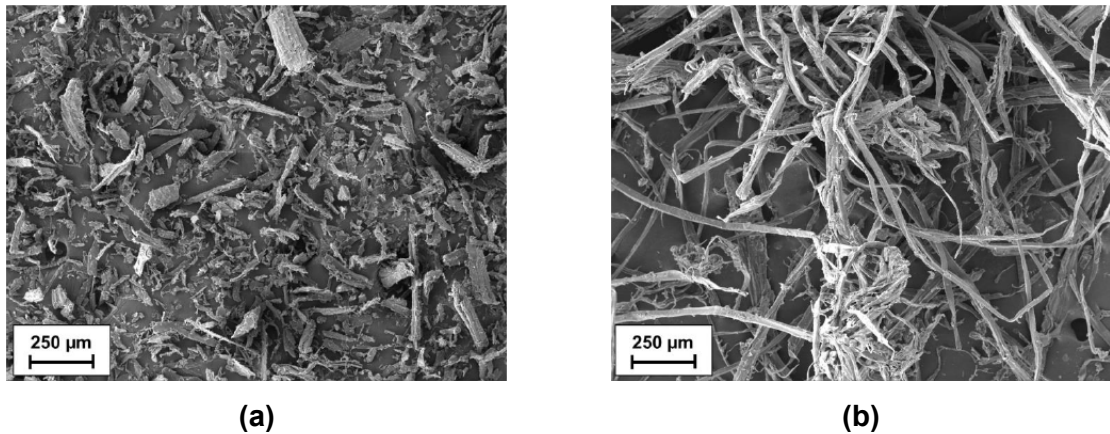
### 2.3.2 Direkt-Compoundierung

Die direkte, einstufige Compoundierung von Glasfasern und Naturfasern über einen Spritzgusscompounder ist bereits seit längerem Stand der Technik [41-45]. Eine der ersten direktverarbeitenden Spritzgussmaschinen wurde von Truckenmüller entwickelt. Er stattete eine Standard-Spritzgussmaschine mit einer speziellen Plastifiziereinheit aus, die die Glasfaser-Rovings direkt zuführen konnte. Die Fasern wurden in eine speziell konstruierte Entlüftung geführt und die Schnecke zieht die Fasern in die Plastifiziereinheit. Allerdings agglomerierten die Rovings, was auf eine unzureichende Homogenisierung der Schmelze zurückzuführen ist. Nachfolgende Abbildung zeigt die schematische Darstellung eines Spritzgusscompounders von Krauss-Maffei nach Rohde-Tibitz. Die Anlage umfasst einen Doppelschneckenextruder, einen Schmelzespeicher, eine Spritzeinheit und eine Schließeinheit. Bei der Verarbeitung von Glasfasern ist die Faserdosierung über Rovings möglich (siehe Abbildung 15) [41].



**Abbildung 15** Schematische Darstellung eines Spritzgusscompounders [41]

Zur Direktverarbeitung von Holz in der Kunststofftechnik gibt es bisher nur wenige Studien. In diesen Studien wurden keine Holzfasern, sondern Holzmehl untersucht [44-46]. Abbildung 16 zeigt den geometrischen Unterschied zwischen Holzfasern und Holzmehl nach Wiedl et al. [47]. Demnach besteht Holzmehl aus kugelförmigen Partikeln mit einer Länge und Breite von etwa 300 bis 400  $\mu\text{m}$  [48, 49]. Im Gegensatz dazu sind die Längen von Holzfasern aus einem thermo-mechanischen Aufschlussverfahren zwischen 20 und 4500  $\mu\text{m}$ , während die Faserdurchmesser von weniger als 1 bis 80  $\mu\text{m}$  variieren können [50].



**Abbildung 16** REM-Aufnahmen von (a) Holzmehl und (b) Holzfasern [47]

Wiedl et al. verglichen an der TH Rosenheim verschiedene Compoundiermethoden für Polypropylen mit Holzfasern und untersuchten dabei Emissionen, Optik und Mechanik. Bei der Analyse wurde ein besonderer Fokus auf die thermische Belastung der Holzfasern gelegt. Als Methoden wurden ein Spritzgusscompounder, ein Doppelschneckenextruder, ein Heiz-Kühl-Mischer und ein Messknetzer verwendet. Die höchsten Faserlängen im Bauteil konnten mit dem Spritzgusscompounder erreicht werden. Die besten mechanischen Eigenschaften wurden mit dem Heiz-Kühl-Mischer und dem Messknetzer erreicht [47].

Bürkle et al. verglichen die klassische mehrstufige Verarbeitung von Compounds mit Holzfasern (Compoundierung, Granulierung, Spritzguss) mit der Direkt-Compoundierung im Spritzgussprozess (IMC-Technologie). Bei der Direkt-Compoundierung zeigte sich ein um 40 % geringerer Energieverbrauch. Die schonende Verarbeitung durch nur ein einmaliges Aufheizen kann die Geruchsemissionen vermindern und die Bauteileigenschaften verbessern [43].

Im Teilvorhaben 9 des FENAF-Netzwerkverbunds wurden verschiedene Kombinationen von Polypropylen, Flachfasern und Holzmehl (J. Rettenmaier & Söhne, Lignocel® BK 40/90) untersucht. Thermoplast und Haftvermittler werden nicht explizit genannt. Als Verarbeitungstechnologie wurde dabei der klassische mehrstufige Prozess (Compoundierung, Granulierung, Spritzguss) mit einer Direkt-Compoundierung im Spritzgussprozess (KM 1300-14000 IMC) verglichen. Dabei wurden Verarbeitungsparameter optimiert und die Maschinenkomponenten der IMC-Technologie weiterentwickelt. Bei der Verarbeitung über die IMC-Technologie wurden Prüfkörper mit 20 Gew.-% und 40 Gew.-% Holzmehl untersucht. Die Erhöhung des Holzmehlanteils von 20 auf 40 Gew.-% wirkte sich positiv auf die normierte Zugfestigkeit und negativ auf die normierte Schlagarbeit aus [45].

Gusovius et al. analysierten in einer weiteren Veröffentlichung im Rahmen des FENAFANetzwerkverbunds die Verarbeitung von Hanf und Flachs in Kombination mit Polypropylen (Borealis, BE170MO) und Haftvermittler (BYK, Scona TPPP8112 GA). Verarbeitet wurden die Materialien über einen Spritzgusscompounder (KM 1300-14000 IMC). Tabelle 2 zeigt die mechanischen Kennwerte des Grundpolymers laut Datenblatt [51] sowie die Messwerte der Mischungen mit 3 Gew.-% Haftvermittler und 30 Gew.-% Naturfaseranteil [44]. Veröffentlicht wurde dieser Artikel im Rahmen eines Buches von Fanguero und Rana, in dem die Beiträge der International Conference on Natural Fibers aus dem Jahr 2015 zusammengefasst wurden [52].

**Tabelle 2** Mechanische Kennwerte aus dem FENAFANetzwerkverbund von direkt compoundiertem Kunststoff mit Naturfaserverstärkung, Zugprüfung nach ISO 527-1 und 527-4, Schlagzähigkeit nach ISO 179-2 edgewise bei Raumtemperatur, die Kerbart der Schlagzähigkeitsprüfkörper ist nur beim Datenblattwert des Grundpolymers bekannt [44, 51]

Material	Polypropylen	Polypropylen	Polypropylen
	unverstärkt	mit Flachs	mit Hanf
Naturfaseranteil [Gew.-%]	-	30	30
Zugmodul [MPa]	1250	1970	2430
Zugfestigkeit [MPa]	25	21,5	26,9
Schlagzähigkeit [kJ/m <sup>2</sup> ]	8 (Kerbe A)	8,16	11,35

Guo und Kethineni untersuchten verschiedene Werkstoffe über einen einstufigen direkten Spritzgussprozess. Dabei wurden die Materialien über einen Trommelmischer vermengt und ohne Compoundierung direkt mit einer Spritzgussmaschine verarbeitet. Als Grundpolymer wurde ein Polypropylen verwendet. Das Grundpolymer wurde in Kombination mit Holzmehl (P.J. Murphy Forest Products, Hartholz), Glasfasern und Kohlenstofffasern verarbeitet. Bei 20 Gew.-% Holzmehl sank die Zugfestigkeit des Verbunds um etwa 24 % im Vergleich zum Grundpolymer. Bei einer Mischung aus 10 Gew.-% Holzmehl und 10 Gew.-% Glasfasern oder Kohlenstofffasern konnte die Zugfestigkeit um 30 % und 38 % gesteigert werden [46].

## 2.4 Herstellung von Vliesstoffen mit Holz- und Naturfasern

Als Vliesstoff wird ein Kombinationsgelege aus Fasern wie Naturfasern, Polymerfasern, Glasfasern oder anderen synthetischen Fasern bezeichnet. Die Fasern werden durch einen Luftstrom oder Karden wirt oder unidirektional gelegt [27]. Es gibt diverse Verfahren zur Herstellung von Vliesstoffen. Für diese Arbeit sind Kardierverfahren und aerodynamische Verfahren relevant. Im Kardierverfahren werden die Fasern mittels Karde oder Krempel bis zu einzelnen Fasern aufge-

löst. Der Krempel bringt das wirr vorliegende Fasermaterial in die gewünschte geordnete Faserlage. Dies kann sowohl eine Wirr- als auch eine Parallellage sein. Die Hauptaufgabe des Krempels besteht darin, eine konstante Vorlage der Faserflocken zu bilden und Fremtteile auszusortieren [27, 53]. In aerodynamischen Verfahren wird das Vlies direkt gebildet. Der Vorteil des aerodynamischen Vorgehens liegt in der Zuführbarkeit des trockenen Materials nach der Dosierung mittels eines Luftstroms. Das Vlies wird wirr gelegt, indem die Feststoffe von der pneumatischen Luftförderung getrennt werden. Durch die Einstellmöglichkeit von Luftstrom, Materialmenge sowie Abzugsgeschwindigkeit kann die Faserorientierung und damit die Vlieseigenschaften beeinflusst werden. Im Anschluss an die Vliesbildung ist eine Verfestigung notwendig. Diese kann entweder über eine Vernadelung oder einen Durchlaufofen erfolgen [27].

Schumacher hat sich an der TH Rosenheim intensiv mit der Konsolidierung thermoplastischer Holzfaservliesstoffe befasst. Es wurden Holzfasern aus Fichte mit Polypropylenfasern (PP-Fasern) verwendet. Dabei wurden Parameterstudien zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften durchgeführt. Es wurde herausgearbeitet, dass die Presszeit den größten Einfluss auf die Mechanik hat. Eine Erhöhung des Holzfaserteils von 50 Gew.-% auf 70 Gew.-% resultierte in keiner signifikanten Veränderung der Mechanik. Eine Vernadelung der Vliese im Vergleich zu rein thermisch gebundenen Vliesen resultierte in einer höheren Zug- und Biegefestigkeit. Dies gilt sowohl in Produktionsrichtung als auch quer zur Produktionsrichtung [54]. Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit der Verwendung nachwachsender Rohstoffe im Vlieslegeprozess und damit verbundenen technologischen Konsequenzen [55] sowie mit tiefergehenden Untersuchungen der Beziehung von Struktur, Prozess und Eigenschaften [56, 57].

## 2.5 Pressbauteile mit Holz- und Naturfasern

Diverse Veröffentlichungen geben einen Überblick über bisherige Anwendungen von Verbundstoffen mit Holz- oder Naturfasern. Sie befassen sich hauptsächlich mit Anwendungen in der Automobilindustrie [26, 58-60]. In der Vergangenheit wurden beim Formpressen hauptsächlich duroplastische Matrices und Fasermaterialien wie Holz oder bestimmte Naturfasern (Flachs, Hanf, Kenaf, Sisal, Jute und Baumwolle) verwendet. Aktuell werden Holzfasern in Form von Vliesstoffen und Nadelvliesen beim Formpressen sowohl mit duroplastischen als auch mit thermoplastischen Matrices verwendet [2].

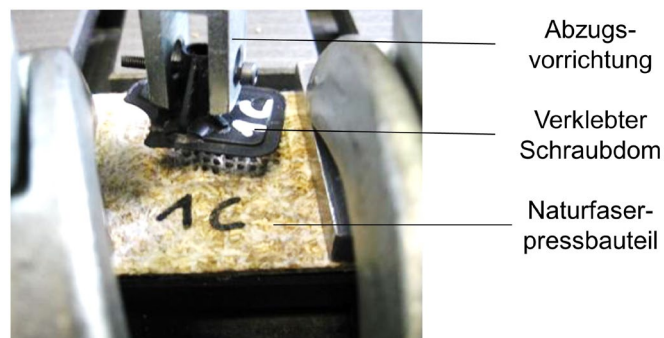
Fibrowood ist ein vernadelter Holzfaservliesstoff (siehe Abbildung 17), der Acrylharz und thermoplastische Fasern als Matrix enthält. Beim Wood-Stock-Verfahren werden extrudierte Platten aus Polypropylen mit Holzmehl und Naturfasern verwendet [2]. Lignotock hingegen besteht aus

Holzfasern, Acrylharzen, Melaminharzen und thermoplastischen Fasern in verschiedenen Mischungsverhältnissen [61]. Englund et al. stellen fest, dass die Verwendung von Holzfaserverbundwerkstoffen weitverbreitet ist, es aber nur wenige wissenschaftliche Arbeiten dazu gibt. Die Literatur befasst sich überwiegend mit Verbundwerkstoffen aus Holzspänen und duroplastischen Matrices [62].



**Abbildung 17** Türverkleidungen aus dem Automobilinterieur mit Holzfasern als Pressbauteile mit einer Mischung aus duroplastischer und thermoplastischer Matrix, Material Fibrowood [3]

Allen voran Automobilzulieferer haben sich ausführlich mit den mechanischen Eigenschaften verklebter funktioneller Elemente bei Pressbauteilen aus Naturfasern beschäftigt. Ergebnisse hierzu wurden nicht veröffentlicht. Eine der wenigen Veröffentlichungen aus diesem Bereich von Klusmaier und Bogdanov zeigt einen Abzugsversuch mit verklebten Retainern von einer Türverkleidung als Naturfaserpressbauteil (siehe Abbildung 18). Details zur Prüfmethode und zu den ermittelten Kennwerten wurden nicht veröffentlicht [63]. Folglich können Kennwerte verklebter Strukturen nicht als Vergleich in dieser Arbeit herangezogen werden.



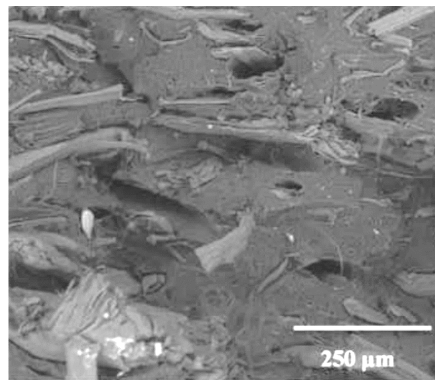
**Abbildung 18** Abzugsversuch mit verklebten Retainern von einer Türverkleidung als Naturfaserpressbauteil [63]

Die aktuelle Forschung bei Halbzeugen für Pressbauteile zielt darauf ab, natürliche oder regenerierte Cellulosefasern mit Glas-, Kohlenstoff- und Basaltfasern zu kombinieren, um die mechanischen Eigenschaften je nach Anwendung anzupassen [64-68]. Ein weiteres Forschungsgebiet ist die Verwendung von Biopolymeren, biologisch abbaubaren Kunststoffen [69-75] sowie von re-

cyclten Kunststoffen [76-79]. Menzel beschäftigte sich im Rahmen einer Dissertation mit Naturfaserverbunden mit thermoplastischer Matrix in Sandwichverbundbauweise. Dabei wurden Naturfaservliesstoffe mit einer Schaumfolie zu einem Halbzeug kombiniert, das durch ein Formpressverfahren verarbeitet und charakterisiert wurde [80].

Für diverse technische Anwendungen von Verbundwerkstoffen mit Holzfasern sind Flammenschutzmittel relevant. Ayrlmis und seine Kollegen untersuchten Flammenschutzmittel für Faserverbunde mit Holzfasern und Polypropylen. Sie fanden heraus, dass ein Optimum der physikalischen und mechanischen Eigenschaften mit 4 Gew.-% Haftvermittler und 8 Gew.-% Flammenschutzmittel auf Phosphatbasis erreicht wird [81]. Nach Renner et al. sind Ammoniumphosphat, Graphit, Metallhydroxidderivate und deren Kombinationen wirksame Flammenschutzmittel für Verbundwerkstoffe mit Holzfasern [82]. Saba et al. untersuchten Flammenschutzmittel für Verbundwerkstoffe mit Kenaffasern. Ergänzend zu Renner et al. empfehlen sie Montmorillonit, Nanoton und Nanoröhren als Flammenschutzmittel [83]. Hu et al. synthetisierten ein neues Flammenschutzmittel auf Basis von Lignin mit Phosphor für biologisch abbaubare Verbundstoffe mit Holzmehl und Polymilchsäure. Neben der verbesserten Flammhemmung konnten sie auch vielversprechende mechanische Eigenschaften nachweisen [84].

Instrumentierte Durchstoßversuche sind bekannte Methoden zur Prüfung von Verbundwerkstoffen und naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffen [85-91]. Es gibt jedoch keine Veröffentlichungen, in denen hybride hinterspritzte Verbundstrukturen mit Natur- oder Holzfasern untersucht werden. Puech et al. untersuchten Polypropylen mit unbehandelten Hanffasern in Durchstoßversuchen (siehe Abbildung 19). Sie konnten zeigen, dass das Bruchverhalten in erster Linie auf Faser-Pull-Out und Matrixversagen zurückzuführen ist. In Abbildung 19 sind diverse Stellen zu erkennen, an denen Fasern aus der Matrix ausgezogen wurden [88].



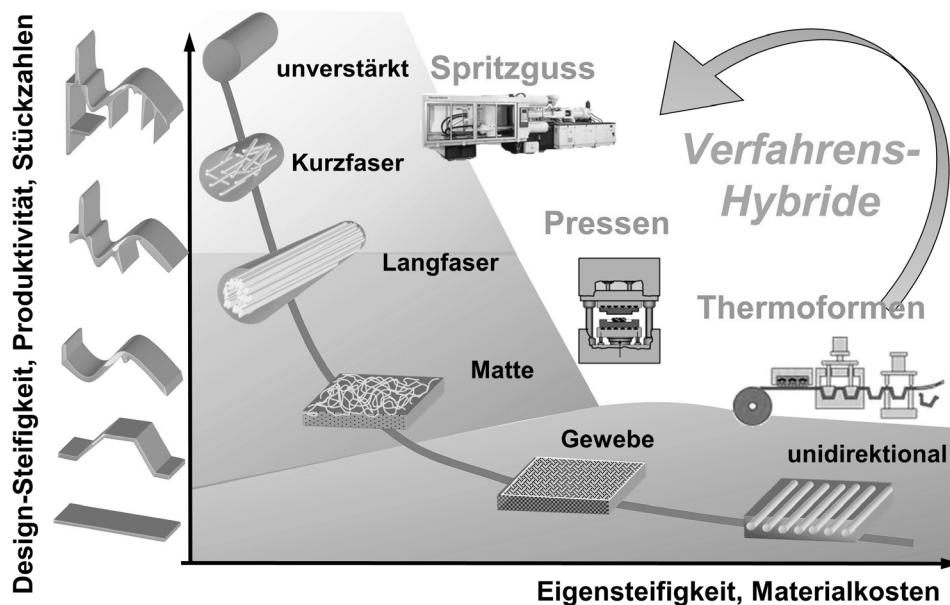
**Abbildung 19** REM-Aufnahme von Polypropylen mit unbehandelten Hanffasern, Bruchfläche [88]

Pingulkar et al. untersuchten mit dem Durchstoßversuch Bio-Verbundwerkstoffe mit natürlichen Bastfasern und einer thermoplastischen Matrix. Demnach haben Verbundwerkstoffe mit Kenaf, Jute und Hanf das Potential, in semistrukturellen Bauteilen Anwendung zu finden [85]. Cheng et al. untersuchten die Verwendung von 60 Gew.-% Abfallbiomasse der Ölpalme in Sandwichkernen aus Polyurethan bei Faserverbunden mit Jutefasern und Epoxidmatrix. Die Eigenschaften der Faserverbunde wurden über einen Durchstoßversuch bestimmt. Dabei konnte eine Mischung aus 50 Gew.-% Palmschalen und 50 Gew.-% Palmschalkernen als optimales Mischungsverhältnis ermittelt werden [92].

## 2.6 Hybridbauteile

### 2.6.1 Hybridbauteile mit Glasfasern

Hybridbauteile mit Glasfasern sind seit langem bekannt. Bereits 2001 wurde am Lehrstuhl für Kunststofftechnik der ‚Erlanger Träger‘ entwickelt. Dieser Träger bestand aus einem Einleger mit 70 Gew.-% Glasfasergewebe mit Polyamidmatrix und angespritzten Rippen aus Polyamid mit 30 Gew.-% Glasfaseranteil [93]. Hybridbauteile profitieren von den Synergieeffekten, die sich aus der Kombination von Formpressen und Spritzguss ergeben. Das Hinterspritzen kombiniert die Eigensteifigkeit faserverstärkter Halbzeuge beim Formpressen mit der Konstruktionssteifigkeit und hohen Produktivität des Spritzgusses [94, 95]. Abbildung 20 zeigt die technologischen Zusammenhänge.



**Abbildung 20** Synergieeffekt durch Hybridbauweisen, Kombination von Designsteifigkeit und Produktivität von Spritzguss mit der hohen Eigensteifigkeit faserverstärkter Halbzeuge [94]

Konkrete Vorteile sind das hohe Leichtbaupotential, die hohe spezifische Festigkeit, Steifigkeit und Schlagzähigkeit sowie kurze Zykluszeiten, Gestaltungsfreiheit und die Möglichkeit zur Funktionsintegration. Bei endlosfaserverstärkten Thermoplasten mit Glasfasern wird oft von Organoblechen gesprochen. Dabei werden Fasergewebe oder Gelege mit einer thermoplastischen Matrix imprägniert. Es gibt bereits diverse Serienanwendungen von Hybridverbunden mit Organoblechen [96]. Schemme beschreibt die Entwicklungshistorie von Hybridbauteilen in Abhängigkeit von der Technologiereife bzw. der Seriennähe von Prototypen und Demonstratoren zu Serienanwendungen [94]. Abbildung 21 zeigt zwei aktuelle Serienanwendungen von Hybridverbunden mit Organoblechen [94, 97].



**Abbildung 21** Serienanwendungen von Hybridverbunden mit Organoblechen, **(a)** Türmodulträger für den Ford Focus [97] **(b)** Durchlade für den Land Rover Discovery [94]

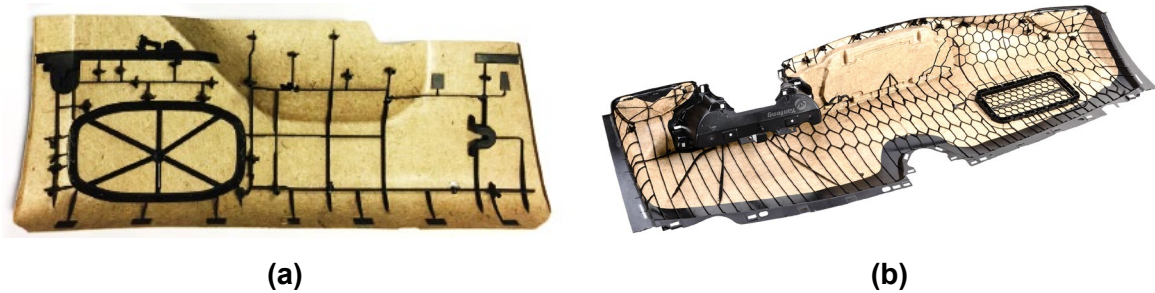
Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit dem Recycling von Glasfaserverbundwerkstoffen [98-101]. Hummel et al. untersuchten mechanische Recyclingverfahren von Produktionsabfällen von Organoblechen mit Glasfasern, die bei der Produktion von Hybridverbunden (z. B. bei Türinnenverkleidungen) anfallen. Es konnte gezeigt werden, dass das Recycling von Produktionsabfällen mechanisch sinnvoll und ökonomisch sowie ökologisch vorteilhaft ist [102].

### 2.6.2 Hybridbauteile mit Holz- und Naturfasern

Für thermoplastische Halbzeuge mit Naturfasern (z. B. Kenaf, Hanf) werden hybride Verarbeitungsverfahren wie das Hinterspritzen eingesetzt. Bei Hybridverfahren wird das Halbzeug zunächst in einem Infrarotofen oder einer Heißpresse erwärmt, dann in das Spritzgusswerkzeug eingelegt, geformt und schließlich hinterspritzt [103]. Die Entwicklung von Hybridverfahren für naturfaserverstärkte Halbzeuge wurde von Zulieferern und OEMs in der Automobilindustrie vorangetrieben. Es gibt einige Konferenzbeiträge und Artikel zum Thema hybride Verfahren in diesem Zusammenhang, aber keine wissenschaftlichen begutachteten Veröffentlichungen [104-108].



Unterschiedliche Firmen aus dem Automobilbereich haben bereits diverse Hybridbauteile mit Naturfasern im industriellen Maßstab umgesetzt. Meist wurden dabei nur Pressefotos und keine technischen Details oder interne Untersuchungen veröffentlicht. Abbildung 22 zeigt zwei Beispiele aus dem Automobilinterieur.



**Abbildung 22** Hybridbauteile mit Naturfasern aus dem Automobilinterieur, **(a)** Seitenverkleidung [109], **(b)** Instrumententafel, Bild von Yanfeng Automotive Interiors [110]

Ein weiteres Beispiel aus dem Automobilinterieur zeigt Abbildung 23. An diesem Bauteil wird deutlich, wie die Vorteile der Designsteifigkeit, der Gestaltungsfreiheit und der Funktionsintegration nicht nur bei Hybridverbunden mit Glasfasern (siehe 2.6.1 Hybridbauteile mit Glasfasern), sondern auch bei Hybridverbunden mit Naturfasern Anwendung finden. Ein Naturfaservlies mit einer Matrix aus Polypropylen und einem Flächengewicht von  $1400 \text{ g/m}^2$  wurde hinterspritzt und so funktionalisiert [80].



**Abbildung 23** Türverkleidung aus dem Automobilinterieur (Mercedes-Benz W205), Naturfaservlies mit einer Matrix aus Polypropylen mit hinterspritzten Rippenstrukturen und Funktionselementen [80]

Auch bei Hybridverbunden mit Naturfasern finden sich Bestrebungen, wie bei Hybridverbunden mit Glasfasern mehr Recyclingmaterial zu verwenden. Der Automobilzulieferer Faurecia hat ein

Naturfaservlies aus 40 Gew.-% Kenaf, 50 Gew.-% PP-Fasern und 10 Gew.-% recycelten Kohlenstofffasern entwickelt (siehe Abbildung 24). Dieses Material eignet sich zur Verarbeitung in hybriden Verfahren wie dem Hinterspritzen [111].



**Abbildung 24** Türverkleidung aus dem Automobilinterieur, Hybridbauteile mit Naturfasern und recycelten Kohlenstofffasern [111]

In neueren Review-Veröffentlichungen werden hybride Verarbeitungsmethoden wie das Hinterspritzen von Naturfaser- oder Holzfaserverbundwerkstoffen nicht erwähnt [4, 7-11]. Ein Industrieprojekt, das sich mit dem Thema hybride Verbundwerkstoffe befasste, war das FENAF-Projekt (abgeschlossen im Jahr 2014). In diesem Projekt wurde die Verbundfestigkeit hybrider Verbundwerkstoffe mit Naturfasern an einem Trägerdemonstrator untersucht (siehe Abbildung 25). Getestet wurde ein vernadeltes Naturfaservlies mit einer Polypropylenmatrix als Halbzeug in Kombination mit einem Naturfaser-Polypropylen-Compound als Spritzgussmaterial. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verbundfestigkeit mit zunehmender Breite der Rippengeometrie leicht abnimmt und dass ein Versagen der Probe nur innerhalb des Naturfaservlieses auftritt. Die Ergebnisse sind jedoch nur im Projektbericht ohne weitere Angaben zu den Materialien oder den Prüfmethoden verfügbar [105].



**Abbildung 25** Demonstratorbauteil mit thermoplastischem Naturfaservlies und direkt angespritzten Rippen aus Polypropylen [105]

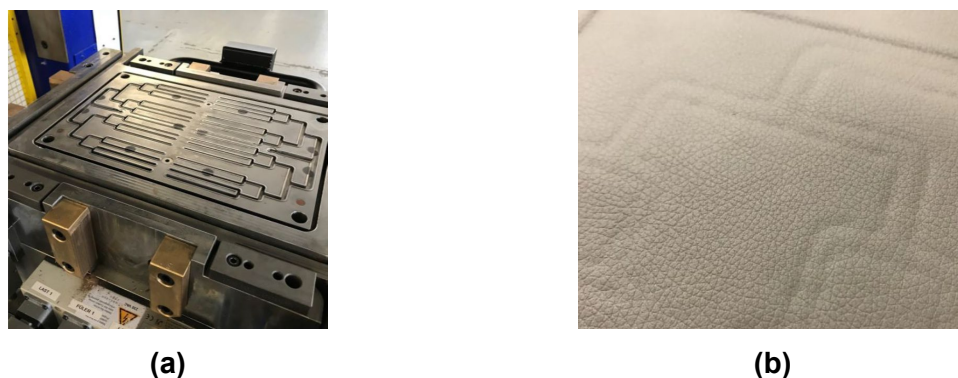
Ouali et al. untersuchten die kontinuierliche Herstellung von Prepregs mit Naturfasern und Biopolymeren sowie deren mechanisches Verhalten. Als Matrix wurden biobasierte thermoplasti-

sche Polymere auf Basis von Polyethylen und Polyamid verwendet. Als Naturfaser kamen unidirektionale Flachsfasern zum Einsatz. Sie zeigen nur Bilder von hinterspritzten Strukturen, erwähnen aber nicht deren Verbundfestigkeit. Nach Ouali et al. eignen sich die Prepregs zur Verarbeitung mittels Formpressen, Hinterspritzen oder Verfahren mit multifunktionalen Vorrichtungen. Ziel der Untersuchungen war die ressourcen-, kosten- und energieeffiziente Herstellung von Bio-composites im industriellen Maßstab. Als Anwendungsbereiche werden der Automotive-Bereich sowie der Freizeitbereich genannt. Abbildung 26 zeigt den Versuchsaufbau und das Demonstratorbauteil [112-114].



**Abbildung 26** Demonstratorbauteil mit unidirektionalen Flachsfasern und biobasiertem Thermoplast auf einer Multifunktionsspritzgussmaschine der Firma Engel, (a) Aufheizen, (b) Positionieren im Werkzeug, (c) Demonstratorbauteil [113]

Ein industrielles Problem bei der Verarbeitung von Naturfasern in Hybridverbunden ist die Abzeichnung von Rippen auf der Sichtseite. Abzeichnungen können sogar nach einem Kaschierprozess (z. B. Vakuumkaschieren) noch sichtbar sein. Dieses Problem ist in der Industrie allgemein bekannt. Die Firma FRIMO hat hierzu erste Untersuchungen durchgeführt (siehe Abbildung 27). Abgesehen davon sind keine wissenschaftlichen Untersuchungen zu diesem Thema bekannt [109].



**Abbildung 27** Rippenabzeichnungen von Hybridbauteilen mit Naturfasern, (a) Versuchswerkzeug der Firma FRIMO, (b) Rippenabzeichnungen nach dem Vakuumkaschieren [109]

Neuere Trends bei Hybridverbunden mit Naturfasern gehen in Richtung sichtbarer Naturfaseroberflächen. Vorreiter dabei war das Konzept ‚Visible Nature‘, das in der Türverkleidung des BMW i3 zu sehen ist (siehe Abbildung 28a). Dabei wurde ein thermoplastisches Naturfaservlies aus Kenaf und PP verwendet. Vor der Formgebung im kalten Werkzeug wurde zusätzlich eine schwarze Dekorfolie aus PP mit einer Dicke von 200  $\mu\text{m}$  auf das Vlies aufgebracht. Das Flächengewicht des Türträgers inklusive Dekorfolie liegt bei 1980  $\text{g}/\text{m}^2$ . Ein vergleichbarer spritzgegossener Türträger inklusive Folienbeschichtung hat ein Flächengewicht von 3320  $\text{g}/\text{m}^2$  [115].

Das Unternehmen Yanfeng Automotive Interiors verfolgt eine ähnliche Strategie. Der Grundträger aus Naturfasern und PP wird mit einem dekorativen Vlies aus Naturfasern und einer zusätzlichen schützenden Schicht versehen (siehe Abbildung 28b). Dies soll vor allem neuen Trends wie Individualisierung und den ethischen Ansprüchen hin zu mehr ökologischer Nachhaltigkeit gerecht werden [116].



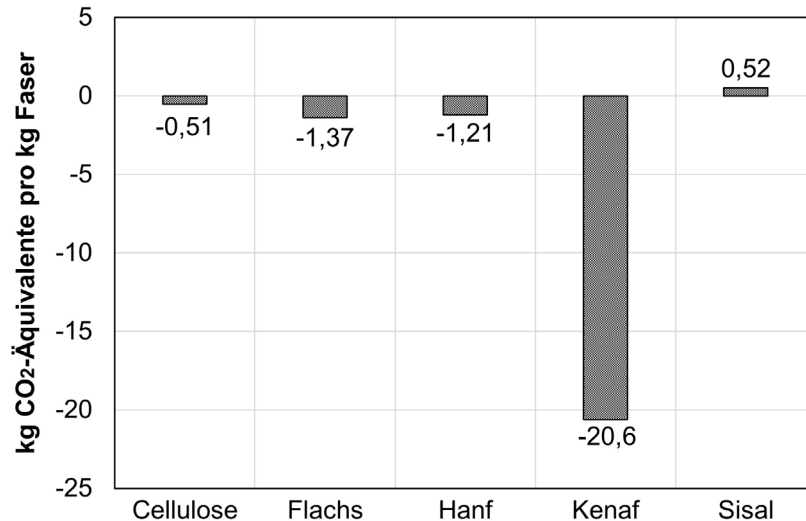
**Abbildung 28** Sichtbare Naturfaseroberflächen für das Automobilinterieur, (a) Türinnenverkleidung des BMW-i3 [115], (b) dekoratives Vlies aus Naturfasern für das Automobilinterieur [116]

## 2.7 Ökologische Betrachtung von Holz- und Naturfasern

Zur Quantifizierung und zum Vergleich der Nachhaltigkeit unterschiedlicher Materialien und Verfahren hat sich die Ökobilanzierung etabliert. Schmiedel et al. geben an, dass bei der Verwendung von Naturfasern im Automobilinterieur im Vergleich zu einem reinen Spritzgussbauteil das Gewicht um 20 bis 50 % reduziert und somit die Ökobilanz des Gesamtfahrzeugs deutlich verbessert werden kann [115].

Schmiedel et al. zeigen, dass unter den Naturfasern Fasern aus Kenaf besonders vorteilhaft sind. Kenaf kommt meist aus China, Indien oder Thailand und wird per Hand geerntet. Durch den manuellen Ernteprozess kommen keine Maschinen zum Einsatz, was sich positiv auf die Ökobilanz auswirkt. Die Fasern werden aus dem Stängel gewonnen. Die Blätter bleiben nach der Ernte auf

den Feldern und dienen so als natürliche Düngung. Abbildung 29 zeigt eine vergleichende Ökobilanz unterschiedlicher Naturfasern. Es werden lediglich CO<sub>2</sub>-Äquivalente verglichen [115].



**Abbildung 29** Vergleichende CO<sub>2</sub> Bilanz unterschiedlicher Naturfasern nach [115]

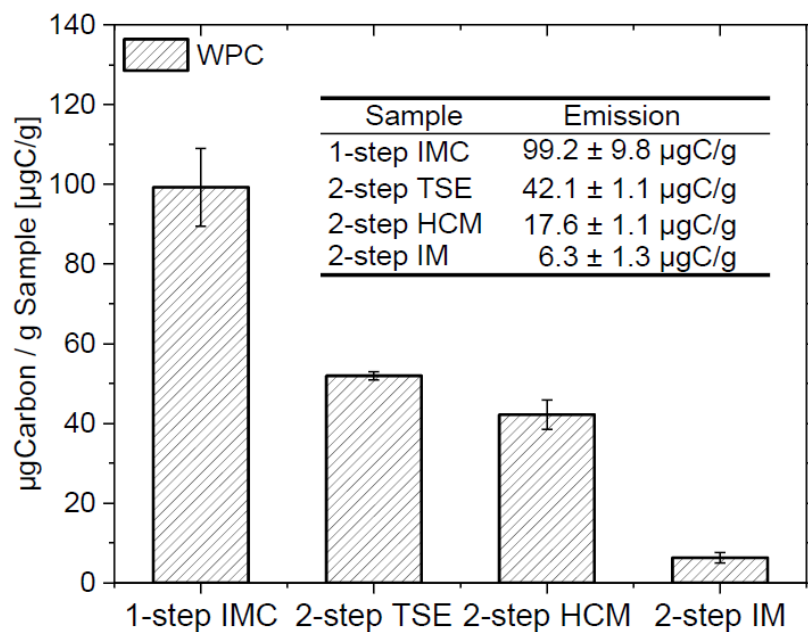
Auch in anderen Veröffentlichungen wurde die Ökobilanz von Naturfasern diskutiert [117-119]. Bereits 2001 wurden Schilffasern mit Glasfasern zur Verstärkung in Kunststoffen über eine Ökobilanzierung verglichen. Als Anwendungsbeispiel wurden Kunststofftransportpaletten untersucht. Transportpaletten aus Schilf erweisen sich als ökologisch vorteilhaft, wenn sie eine minimale Lebensdauer von drei Jahren erreichen, verglichen mit einer fünfjährigen Lebensdauer der herkömmlichen Palette. Die vorteilhafte Ökobilanz ergibt sich aus der Substitution der Glasfaserproduktion durch die Naturfaserproduktion, die Verringerung des Polypropylenanteils durch einen höheren Schilffaseranteil und das geringere Palettengewicht [118]. 2004 wurde diese Aussage von Joshi et al. verallgemeinert. In den meisten Fällen haben Verbundwerkstoffe mit Naturfasern eine vorteilhafte Ökobilanz im Vergleich zu Verbundwerkstoffen mit Glasfasern [119].

Nach Xu et al. ist es wichtig, zu bedenken, dass bei der Verwendung von Naturfasern z. B. in der Automobilindustrie ‚natürlich‘ nicht mit ‚umweltfreundlich‘ gleichzusetzen ist. Bei einer vergleichenden Ökobilanz wurde hingegen festgestellt, dass sich die Verwendung von Holzfasern als Verstärkung in Polypropylen positiv auf die Ökobilanz auswirken kann [120]. Nach Sommerhuber et al. gilt Holz und deren Verwendung in WPCs als sinnvoller Weg für ein nachhaltiges Wirtschaftswachstum. Bei einer vergleichenden Ökobilanzierung konnte herausgearbeitet werden, dass ein höherer Holzanteil in WPCs gleichzusetzen ist mit einer besseren Ökobilanz. Die Verwendung von Sekundärholz wirkt sich dabei zusätzlich positiv auf die Gesamtbilanz aus [121].

## 2.8 Emissionen von Volatile Organic Compounds (VOCs) bei Holzfasern

Emissionen im Automobilinterieur können über unterschiedliche Normen bestimmt werden. Die VDA 277 beschreibt die Untersuchung nichtmetallischer Werkstoffe im Automobilinterieur bezüglich deren Kohlenstoffemission (VOCs) [122]. Bis zu einer Temperatur von 105 °C wird beim Erhitzen von Holz nur hygroskopisch gebundenes Wasser entfernt [123]. Bei einer verlängerten Erwärmungsdauer kann es bereits bei Temperaturen unter 105 °C zu thermischem Abbau von Holzbestandteilen kommen [124, 125]. Aufgrund der langsamen Abbaureaktion kann der thermische Abbau unter 105 °C vernachlässigt werden [124]. Über einer Temperatur von 120 °C kommt es insbesondere bei Hemicellulosen zur chemischen Spaltung [126].

Der thermische Abbau von Hemicellulose, Cellulose und Lignin führt zur Bildung von VOCs [127-129]. Wiedl et al. haben gezeigt, dass der Verarbeitungsprozess einen signifikanten Einfluss auf die VOC-Emissionen von Polypropylen mit Holzanteil hat (siehe Abbildung 30). Bei direkt compoundingierten Proben wurden 99,2 µg C/g ermittelt [47].



**Abbildung 30** Einfluss des Verarbeitungsprozesses auf VOC-Emissionen nach VDA 277, PP mit 30 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Spritzgusscompounder (1-step IMC), Compoundierung und Spritzguss (2-step TSE), Heiz-Kühl-Mischer (2-step HCM), Messkneteter (2-step IM) [47]

## 2.9 Zusammenfassung Stand der Forschung und Ableitung der Hypothesen

### 2.9.1 Ableitungen zur Hypothese 1 (Direkt-Compoundierung)

In den meisten Veröffentlichungen zu thermoplastischen Kunststoffen in Verbindung mit Holzmehl oder Holzfasern werden klassische mehrstufige Verarbeitungsprozesse (Compoundierung, Granulierung und Spritzguss) beschrieben. Die direkte, einstufige Compoundierung von Glasfasern und Naturfasern über einen Spritzgusscompounder ist bereits seit längerem Stand der Technik. Zur Direktverarbeitung von Holz in der Kunststofftechnik gibt es bisher nur wenige Studien. In diesen Studien wurden keine Holzfasern, sondern Holzmehl untersucht (2.3 Compoundierung und Spritzguss von Holz- und Naturfasern) [7]. Daraus leitet sich die Hypothese 1 dieser Arbeit ab.

#### **Hypothese 1 (Direkt-Compoundierung):**

Ergänzend zum Stand der Wissenschaft und Technik werden Holzfasern (Fichtefasern) aus einem thermo-mechanischen Aufschlussprozess (Refiner) auf einem Spritzgusscompounder direkt compoundiert. Dabei soll folgende Hypothese untersucht werden: **Durch Direkt-Compoundierung von Polypropylen mit Holzfasern kann eine Faserverstärkung bzw. eine signifikante Verbesserung der Mechanik in Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit im Vergleich zum Grundpolymer ohne Holzfasern erreicht werden.** Dabei wird der Einfluss eines steigenden Holzfaserteils auf die grundlegende Mechanik, Viskosität und Dichte herausgearbeitet. Es wird beurteilt, ob durch diesen Prozess und diese Werkstoffe eine Faserverstärkung möglich ist. Durch ergänzende Untersuchungen mittels Mikroskopie und Computertomographie werden maßgebliche Effekte der Faser-Matrix-Interaktion beschrieben.

### 2.9.2 Ableitungen zur Hypothese 2 (Hybridverbunde)

Die Entwicklung von Hybridverfahren für naturfaserverstärkte Halbzeuge wurde von Zulieferern und OEMs in der Automobilindustrie vorangetrieben. Es gibt in diesem Zusammenhang einige Konferenzbeiträge und Artikel zum Thema hybride Verfahren, aber keine wissenschaftlichen begutachteten Veröffentlichungen. Es gibt keine Veröffentlichungen zum Thema Verbundhaftung naturfaserverstärkter Hybridverbunde.

Während Naturfasern seit langem in Verbindung mit thermoplastischen Matrices und Hybridverfahren verwendet werden, wurden Holzfasern für Hybridverfahren wie das Hinterspritzen noch nicht untersucht. Aktuelle Review-Artikel erwähnen keine hybriden Verarbeitungsmethoden

oder das Hinterspritzen von Holzfaserverbundwerkstoffen [15]. Daraus leitet sich die Hypothese 2 dieser Arbeit ab.

**Hypothese 2 (Hybridverbunde):**

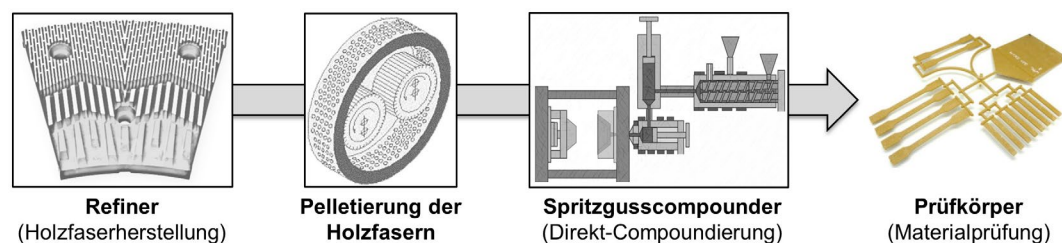
Ergänzend zum Stand der Wissenschaft und Technik werden Holzfasern (Fichtefasern) aus einem thermo-mechanischen Aufschlussprozess (Refiner) zu Vliesen mit Polypropylenmatrix gelegt. Die Vliese werden mit direkt-compoundiertem Polypropylen mit Holzfasern hinterspritzt. Als charakteristische Eigenschaft direkt angespritzter Strukturen wird die Verbundhaftung definiert. Folgende Hypothese wurde formuliert: **Die Verbundhaftung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfasern wird beeinflusst durch Prozessparameter, Anspritzmaterial und Rippengeometrie.** Dabei werden Wirkzusammenhänge von Prozessfenster, Mechanik, Viskosität und Dichte herausgearbeitet. Es wird beurteilt, ob thermoplastische Hybridverbunde mit Holzfasern mit dem Stand der Technik aus Naturfasern konkurrieren können.



### 3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

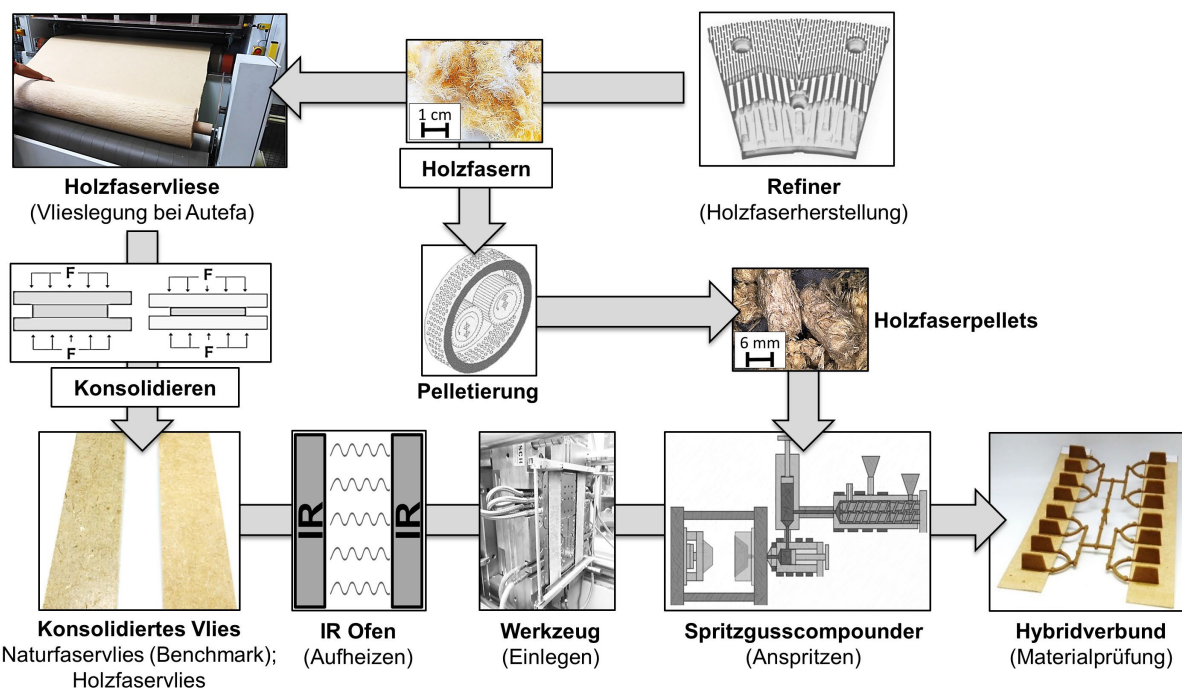
Ziel dieser Arbeit ist die prozess- und materialtechnische Entwicklung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfaserverstärkung. Dabei werden Holzfasern mit einem Refiner über ein thermo-mechanisches Aufschlussverfahren selbst hergestellt und über einen Spritzgusscompounder direkt verarbeitet. Im Rahmen dieser Arbeit wird zusätzlich die Technologie des Vlieslegens in Zusammenarbeit mit der Firma Autefa Solutions Austria GmbH genutzt. Somit ergibt sich die Arbeit aus einer Kombination der Technologien Refiner, Vlieslegung und Spritzguss bzw. Spritzgusscompounder. In Abschnitt 2.9 (siehe 2.9 Zusammenfassung Stand der Forschung und Ableitung der Hypothesen) wurde dargestellt, wie sich die untersuchten Hypothesen vom bisherigen Stand der Forschung ableiten.

In Hypothese 1 (Direkt-Compoundierung) werden ergänzend zum Stand der Wissenschaft und Technik Holzfasern (Fichtefasern) aus einem thermo-mechanischen Aufschlussprozess (Refiner) auf einem Spritzgusscompounder direkt compoundiert (siehe Abbildung 31). Dabei wird der Einfluss eines steigenden Holzfaserteils auf die grundlegende Mechanik, Viskosität und Dichte herausgearbeitet. Die Herstellung der Holzfasern wird in Abschnitt 6.1 besprochen. Die Ergebnisse zur Direkt-Compoundierung werden in Abschnitt 6.2 diskutiert.



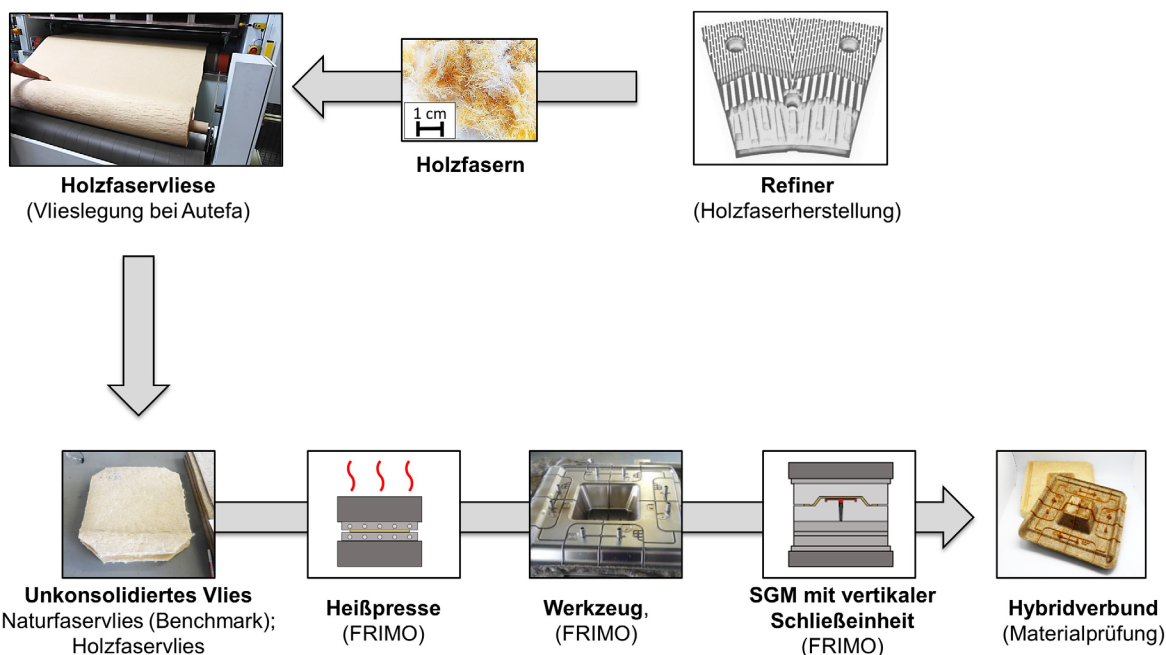
**Abbildung 31** Schematische Darstellung der relevanten Technologien zur Untersuchung der Direkt-Compoundierung

Zur Untersuchung der Hypothese 2 (Hybridverbunde) wird die Verbundhaftung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfasern auf grundlegende Effekte untersucht. Die Herstellung der Holzfaservliese wurde im Technikum der Autefa Solutions Austria GmbH in Linz durchgeführt und wird in Abschnitt 6.3 besprochen. Holzfaservliese und Naturfaservliese als Benchmark werden in einem Infrarotofen aufgeheizt und in das Spritzgusswerkzeug eingelegt (siehe Abbildung 32). Als Anspritzmaterial wird ein Direkt-Compound verwendet, das bereits in Abschnitt 6.2 untersucht wurde. Die Verbundhaftung der Prüfkörper wird im Kopf-Zug-Versuch untersucht. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 6.4 (siehe 6.4 Hybridverbunde, Untersuchungen zur Verbundhaftung) diskutiert.



**Abbildung 32** Schematische Darstellung der relevanten Technologien zur Untersuchung der Verbundhaftung im Kopf-Zug-Versuch

Im Vergleich zu Abschnitt 6.4 werden in Abschnitt 6.5 (siehe 6.5 Hybridverbunde, Untersuchungen an einem praxisnahen Bauteil) die unkonsolidierten Vliese auf einer beheizten Presse erwärmt und direkt in das Spritzgusswerkzeug eingelegt (siehe Abbildung 33).



**Abbildung 33** Schematische Darstellung der relevanten Technologien zur Untersuchung am praxisnahen Bauteil, Darstellung von Heißpresse, Werkzeug und Spritzgussmaschine (SGM) nach FRIMO [109]

## 4 Materialien

### 4.1 Direkt-Compoundierung

Es wurde Fichtenrundholz aus dem Rosenheimer Umland verwendet und daraus wurden über einen thermo-mechanischen Aufschluss Holzfasern hergestellt. Zur Weiterverarbeitung auf dem In-Mould-Compounder (Spritzgusscompounder) wurden die Fichtefasern zu Pellets weiterverarbeitet (5.1 Herstellung von Holzfasern und 6.1 Charakterisierung von Holzfasern).

Als Thermoplast wurde ein Polypropylen-Homopolymer HJ120UB von Borealis verwendet. Laut Datenblatt hat das Polypropylen eine Dichte von  $0,905 \text{ g/cm}^3$  und einen MFR-Wert von  $75 \text{ g/10 min}$  bei  $230 \text{ °C}$  und  $2,16 \text{ kg}$  Prüfgewicht [130].

Als Haftvermittler wurde ein mit Maleinsäureanhydrid gepfropftes Polypropylen-Copolymer der Firma BYK Additives verwendet. Die Typenbezeichnung ist SCONA TPPP 8112 GA. Der Gehalt von Maleinsäureanhydrid beträgt laut Datenblatt  $1,4 \%$  und der MFR-Wert beträgt  $80 \text{ g/10 min}$  bei  $190 \text{ °C}$  und  $2,16 \text{ kg}$  Prüfgewicht [131].

### 4.2 Vlieslegung

Es wurde Fichtenrundholz aus dem Rosenheimer Umland verwendet und daraus wurden über einen thermo-mechanischen Aufschluss Holzfasern hergestellt (5.1 Herstellung von Holzfasern und 6.1 Charakterisierung von Holzfasern). Als Matrixmaterial wurde eine PP-Faser des Typs E 4219 von IFG Asota mit einer Länge von  $18 \text{ mm}$  und einem Titer von  $2,2 \text{ dtex}$  verwendet [132]. Als Benchmark diente ein vernadelter Naturfaservliesstoff Hacoloft N der Firma J.H. Ziegler (siehe Abschnitt 4.3 Hybridverbunde, Tabelle 4).

### 4.3 Hybridverbunde

Die folgende Tabelle zeigt die beiden Anspritzmaterialien, die in Abschnitt 6.4 (siehe 6.4 Hybridverbunde, Untersuchungen zur Verbundhaftung) verwendet wurden. Für das Direkt-Compound wurde ein Polypropylen-Homopolymer HJ120UB von Borealis verwendet. Als Haftvermittler wurde ein mit Maleinsäureanhydrid gepfropftes Polypropylen-Copolymer SCONA TPPP 8112 GA von BYK Additives verwendet. Das Direkt-Compound wurde mit einem WPC (Wood-Plastic-Composite, WPC PP H50-500-14) der Firma JELU-Werk als Benchmark verglichen. Das WPC wurde mit  $60 \text{ Gew.-%}$  HJ120UB von Borealis gemischt, um einen Holzanteil von  $20 \text{ Gew.-%}$  zu erreichen. Die Untersuchung am praxisnahen Bauteil (siehe Abschnitt 6.5) wurde im Technikum von FRIMO

Sontra auf einer Standard-Spritzgussmaschine durchgeführt. Folglich wurde in dieser Untersuchung nur das WPC verwendet.

**Tabelle 3** Anspritzmaterial für die Hybridverbunde, für das praxisnahe Bauteil wurde nur das WPC verwendet, der Zugmodul und die Zugfestigkeit wurden nach ISO 527-2/1A gemessen, der MFR wurde nach ISO 1133-2 mit 10 kg bei 170 °C gemessen

	<b>WPC (Benchmark)</b>	<b>Direkt-Compound</b>
<b>Holzfasern</b>	Fichte und Tanne (20 Gew.-%)	Fichte (20 Gew.-%)
<b>Polymer</b>	PP Homopolymer (78,8 Gew.-%)	PP Homopolymer (77 Gew.-%)
<b>Additive</b>	Haftvermittler (1,2 Gew.-%)	Haftvermittler (3 Gew.-%)
<b>Zugmodul</b>	(3010 ± 50) MPa	(2940 ± 210) MPa
<b>Zugfestigkeit</b>	(39 ± 1) MPa	(42 ± 3) MPa
<b>MFR</b>	(20 ± 1) g/10min	(12 ± 1) g/10min

Die Fichtefasern für das Direkt-Compound (siehe Tabelle 3) und für die Vliese (siehe Tabelle 4) wurden im Technikum der TH Rosenheim hergestellt (siehe 5.1 Herstellung von Holzfasern). Als Benchmark diente ein vernadelter Naturfaservliesstoff Hacoloft N der Firma J.H. Ziegler. Der Benchmark wurde mit einem Holzfaservlies auf Basis der Airlay-Technologie verglichen (siehe 5.3 Vlieslegung).

**Tabelle 4** Vliese für die Hybridverbunde, der Zugmodul und die Zugfestigkeit wurden gemäß ISO 527-4/2 gemessen

	<b>Naturfaservlies (Benchmark)</b>	<b>Holzfaservlies</b>
<b>Fasern</b>	Kenaf, Hanf (50 Gew.-%)	Fichte (50 Gew.-%)
<b>Polymer</b>	PP-Faser	PP-Faser
<b>Zugmodul</b>	(2900 ± 200) MPa	(2950 ± 60) MPa
<b>Zugfestigkeit</b>	(28 ± 2) MPa	(28 ± 2) MPa
<b>Flächengewicht</b>	(1800 ± 50) g/m <sup>2</sup>	(1920 ± 40) g/m <sup>2</sup>

## 5 Experimentelle Methoden

### 5.1 Herstellung von Holzfasern

Fichtenstämme aus dem Raum Rosenheim wurden manuell entrindet und mit einem Trommelhacker (Typ CV 400N-2M, Bruks) zu Hackschnitzeln zerkleinert. Die Zerfaserung der frischen Hackschnitzeln wurde auf einem 12"-Laborrefiner (Typ 12 1CP, Andritz) durchgeführt. Der thermomechanische Aufschluss erfolgte bei 160 °C und 5,2 bar Sättigungsdampfdruck für drei Minuten. Für die Zerfaserung wurde die Mahlscheibe 12XASR01 verwendet. Die Schüttdichte der Fasern betrug 35 kg/m<sup>3</sup>. Für die Direkt-Compoundierung (vgl. 5.2 Direkt-Compoundierung) wurden die feuchten Fichtefasern mit einer Pelletierpresse (Typ RMP 250, MÜNCH-Edelstahl) zu Pellets mit einer Schüttdichte von 110 kg/m<sup>3</sup> weiterverarbeitet. Bei der Pelletierung werden die Vorschubgeschwindigkeit der Dosierschnecke und die Verdichtung manuell gesteuert.

### 5.2 Direkt-Compoundierung

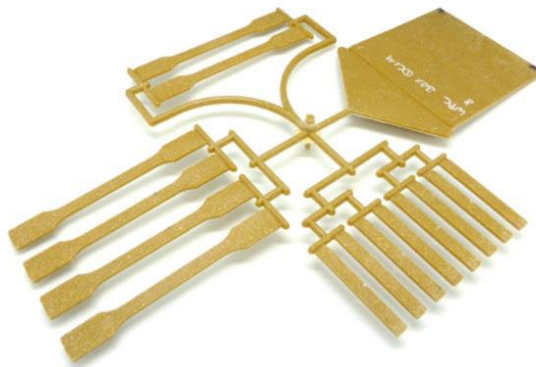
Die Direkt-Compoundierung der Materialien Polypropylen, Haftvermittler und Fichtepellets wurde auf einem Spritzgusscompounder von Krauss Maffei (KM 300 CX IMC, L/D = 41, D = 25 mm, Einspritzkolben D = 60 mm) durchgeführt. Nachfolgende Tabelle zeigt die Verarbeitungsparameter (siehe Tabelle 5). Der Haftvermittler und die Fichtepellets wurden vor der Verarbeitung drei Stunden bei 80 °C in einem Umluftofen getrocknet. Die Materialien wurden gravimetrisch dosiert.

**Tabelle 5** Parameter bei der Direkt-Compoundierung von Holzfasern mit Polypropylen und Haftvermittler

Parameter	Wert
Drehzahl Extruder [1/min]	400
Massedurchsatz [kg/h]	7
Staudruck (Extruder) [bar]	60
Verarbeitungstemperatur [°C]	170
Zweistufiger Spritzdruck [bar]	1500 / 1000
Zweistufige Einspritzgeschwindigkeit [mm/s]	50 / 20
Umschaltpunktgesteuerter Nachdruck [mm]	16
Einstufiger Nachdruck [bar]	350
Heißkanal [°C]	170
Werkzeugtemperatur [°C]	40

Das Polypropylen und der Haftvermittler wurden über den regulären Materialeinzug zugeführt. Die Fichtepellets wurden über die Seitenbeschickung bei 28 D in den Compounder eingebracht. Die Schneckenkonfiguration ist im Anhang zu finden (siehe Anhang A).

Es wurde ein Multiprüfkörperwerkzeug der TH Rosenheim verwendet (Abbildung 34). Nachfolgende Abbildung zeigt die Geometrie des Werkzeugs bzw. der Prüfkörper. Das Bauteil enthält vier reguläre Zugprüfstäbe (Typ 1A), zwei Zugprüfstäbe mit Bindenaht (Typ 1A), vier Schlagbiegestäbe ohne Kerbe (Typ 1), vier Schlagbiegestäbe mit Kerbe (Typ 1, Kerbart B) sowie eine Prüfplatte mit Filmanguss. In dieser Veröffentlichung wurden zum Zwecke der Materialprüfung die regulären Zugprüfstäbe und die gekerbten Schlagbiegestäbe verwendet. Weitere Details zur Prüfkörpergeometrie sind im Anhang zu finden (siehe Anhang B).

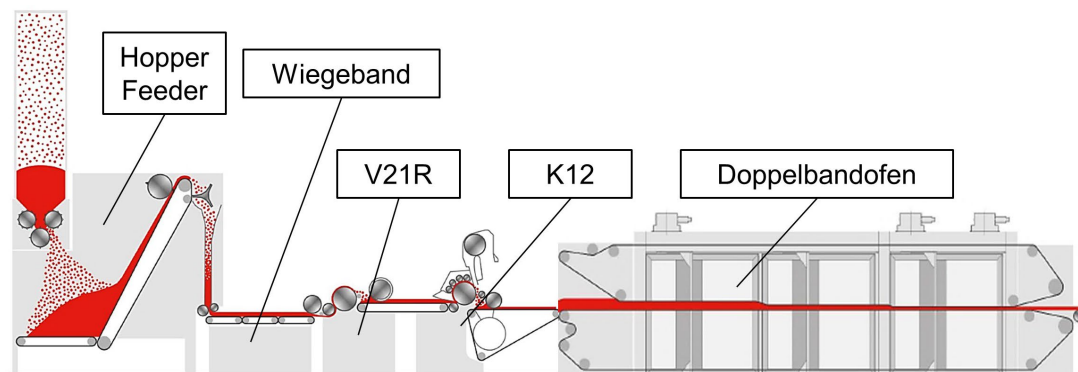


**Abbildung 34** Zur Materialprüfung wurden Prüfkörper aus dem Multiprüfkörperwerkzeug der TH Rosenheim verwendet

### 5.3 Vlieslegung

Abbildung 35 zeigt den Anlagenaufbau zur Vlieslegung. Die Versuche wurden im Technikum der Autefa Solutions Austria GmbH in Linz durchgeführt. Zur Vorbereitung der Holzfasern und PP-Fasern (siehe 4.2 Vlieslegung) sowie zur Dosierung wurden zwei mechanische Ballenöffner sowie ein Fluffer vorgelagert.

Nach der Voröffnung und Dosierung der Fasern wurde der Materialstrom in einem Rüttelschacht-speiser (Hopper Feeder) homogenisiert. Im Anschluss wurde das Materialgemisch über ein Wiegeband dem Vorvliesbildner V21R zugeführt. Die Einheit V21R erzeugt über eine partiell besaugte Siebtrommel ein gleichmäßiges Faservlies auch Vorvlies genannt. Das Vorvlies wurde in eine Wirrvlieskarde (K12) eingezogen. Durch die aerodynamische Einheit K12 entsteht eine dreidimensionale Faserausrichtung. Nach der Einheit K12 wurde das Vlies über einen Doppelbandofen bei 180 °C thermisch gebunden, um es als Rollenware transportieren zu können.



**Abbildung 35** Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus zur Vlieslegung [133]

Nachfolgende Tabelle zeigt die verwendeten Prozessparameter bei der Vlieslegung.

**Tabelle 6** Parameter bei der Vlieslegung von Holzfasern mit Polypropylenfasern

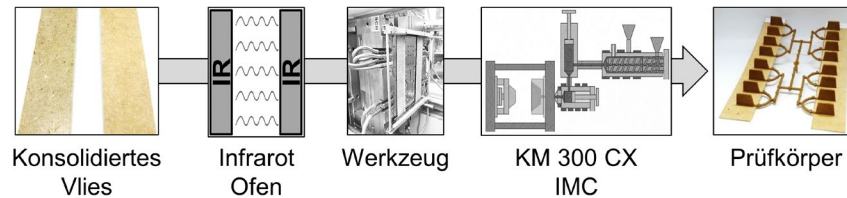
Parameter	Wert
Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	1800
Massedurchsatz [kg/h]	518
Geschwindigkeit [m/min]	2
V21R [1/min]	1000
K12 [1/min]	1800
Leistung Absaugung [%]	75

## 5.4 Hybridverbunde

### 5.4.1 Untersuchungen zur Verbundhaftung

Holzfaserpellets wurden mit Polypropylen und dem Haftvermittler bei einer Temperatur von 170 °C auf einem Krauss-Maffei Spritzgusscompounder (Typ KM 300 CX IMC, Krauss-Maffei) compoundingiert. Vor der Verarbeitung wurden das WPC, die Holzfaserpellets und der Haftvermittler bei 80 °C für drei Stunden in einem Umluftofen getrocknet. Nach der Trocknung lag der Feuchtigkeitsgehalt der Materialien unter 1 Gew.-%. Die Vliese wurden mittels einer beheizten (200 °C, isobar, Typ LA 100, Robert Bürkle) und einer gekühlten Presse (40 °C, isochor, Typ LP 370, Diefenbacher) auf eine Dicke von 2 mm vorkonsolidiert (siehe Abbildung 36). Vor dem Einlegen in die Spritzgussform wurden die Einleger mit einem Infrarotofen auf eine Kerntemperatur von 170 °C erwärmt. Die Kerntemperatur wurde mit Thermoelementen in den Einlegern ermittelt. Der Infrarotofen wurde von der TH Rosenheim mit Infrarotstrahlern von KRELUS (Strahler Typ

G14 -25 -2,5 MINI 7,5) gefertigt (siehe Anhang C). Die Verarbeitungsparameter werden in Abschnitt 6.4.1 (siehe 6.4.1 Grundlegende Prozess- und Parameterstudien) diskutiert.



**Abbildung 36** Prozessablauf vom konsolidierten Vlies bis zum Probekörper für Kopf-Zug-Versuche

Das Spritzgusswerkzeug hat zwei verschiedene Rippengeometrien (siehe Abbildung 37). Die erste Rippengeometrie hat einen Radius von 0,8 mm an der Rippenbasis (siehe Abbildung 37a). Die Grenzfläche zwischen Rippe und Vlies beträgt  $229,5 \text{ mm}^2$ . Die zweite Rippengeometrie hat einen Fuß von 10 mm Breite und 1,3 mm Höhe an der Rippenbasis, so dass die Grenzfläche  $450 \text{ mm}^2$  beträgt (siehe Abbildung 37b). Die Länge der beiden Rippen beträgt 45 mm. Jedes Bauteil hat acht Rippen mit Fuß und acht Rippen mit Radius (siehe Anhang D).



**Abbildung 37** Zur Untersuchung der Verbundhaftung wurden zwei verschiedene Geometrien der Rippen untersucht, (a) Rippe mit Radius, (b) Rippe mit Fuß

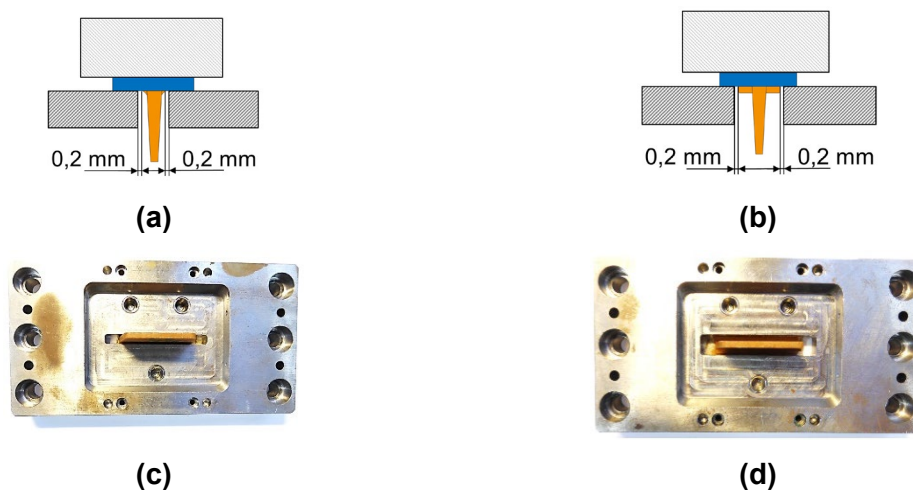
Die Verbundhaftung der angespritzten Rippen auf den Vliesen (siehe Abbildung 38a) wurde mit einer Prüfvorrichtung im Kopf-Zug-Versuch bestimmt. Abbildung 38b zeigt eine schematische Darstellung der Abzugsvorrichtung. Es wurde eine Zwick/Roell Universalprüfmaschine vom Typ Z020 verwendet. Die Abzugsgeschwindigkeit betrug  $10 \text{ mm/min}$ .



**Abbildung 38** Versuchsaufbau zur Untersuchung der Verbundhaftung, (a) Probekörper für den Kopf-Zug-Versuch mit beiden Rippengeometrien und Schema einer Rippe (b) schematische Darstellung der Abzugsvorrichtung

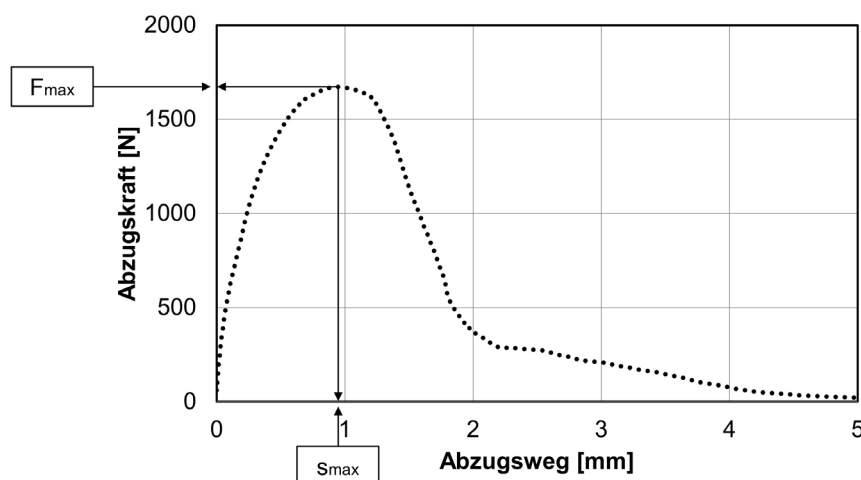


Um gleichbleibende Prüfbedingungen zu gewährleisten und ein Durchbiegen der Vliese beim Abzug zu vermeiden, wurden zwei verschiedene Auflager verwendet. Der Abstand von Rippenbasis zum Auflager betrug bei beiden Rippengeometrien 0,2 mm (siehe Abbildung 39). Das Auflager kann je nach Rippengeometrie getauscht werden. Der restliche Prüfaufbau ist somit identisch. Die jeweilige Rippengeometrie wurde vor dem Einspannen über eine Zentriervorrichtung positioniert. Die Rippen wurden zum Abzug in der Abzugsvorrichtung auf der kompletten Länge von 45 mm und einer Höhe von 35 mm geklemmt.



**Abbildung 39** Auflager je nach Rippengeometrie, (a) und (b) schematische Darstellung der Abzugsvorrichtung beider Rippengeometrien (Seitenansicht), (c) und (d) Auflager der Abzugsvorrichtung beider Rippengeometrien (Ansicht von unten)

Nachfolgende Abbildung zeigt einen exemplarischen Kurvenverlauf im Kraft-Weg-Diagramm einer abgezogenen Rippe. Die maximale Abzugskraft ( $F_{\max}$ ) und der Abzugsweg ( $s_{\max}$ ) bei  $F_{\max}$  sind im Diagramm vermerkt.



**Abbildung 40** Exemplarischer Kurvenverlauf des Kopf-Zug-Versuchs mit maximaler Abzugskraft ( $F_{\max}$ ) und Abzugsweg bei  $F_{\max}$  ( $s_{\max}$ )

In Abschnitt 6.4.4 werden unterschiedliche Rippengeometrien auf deren Verbundhaftung verglichen. Dazu wird die maximale Abzugskraft auf die jeweilige Rippengrundfläche normiert und somit als Spannung verglichen. Nachfolgende Formel zeigt den Zusammenhang.

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A_{ref}} \quad (1)$$

mit

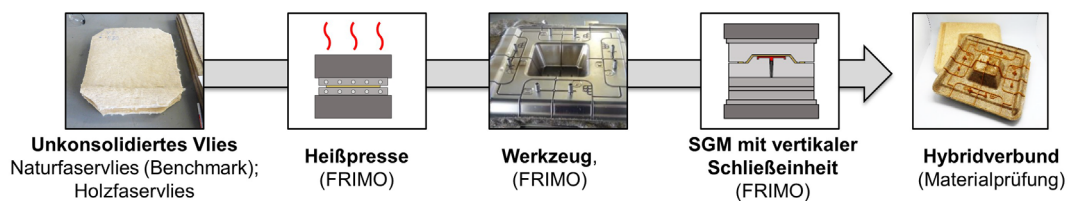
$\sigma_{max}$ : maximale Spannung [N/mm<sup>2</sup>]

$F_{max}$ : maximale Abzugskraft [N]

$A_{ref}$ : Referenzfläche [mm<sup>2</sup>]

#### 5.4.2 Untersuchungen an einem praxisnahen Bauteil

Im Vergleich zu Abschnitt 5.4.1 (siehe 5.4.1 Untersuchungen zur Verbundhaftung) werden in diesem Abschnitt 5.4.2 die unkonsolidierten Vliese auf eine Kerntemperatur von 170 °C erwärmt und in einem isochoren Prozess über eine beheizte Presse auf eine Dicke von 2 mm gepresst und danach direkt in das Spritzgusswerkzeug eingelegt und hinterspritzt (siehe Abbildung 41).



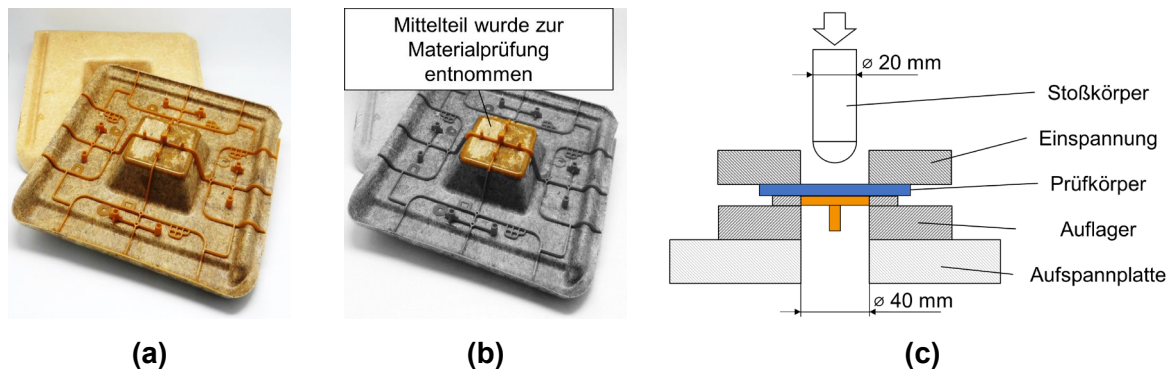
**Abbildung 41** Prozessablauf vom unkonsolidierten Vlies bis zum praxisnahen Bauteil

Die Verarbeitung des WPC erfolgte auf einer Standard-Spritzgussmaschine (Windsor WKT4, D = 42 mm) mit einer Dreizonenschnecke bei 170 °C. Nachfolgende Tabelle zeigt die Prozessparameter.

**Tabelle 7** Verarbeitungsparameter für die Untersuchungen an einem praxisnahen Bauteil

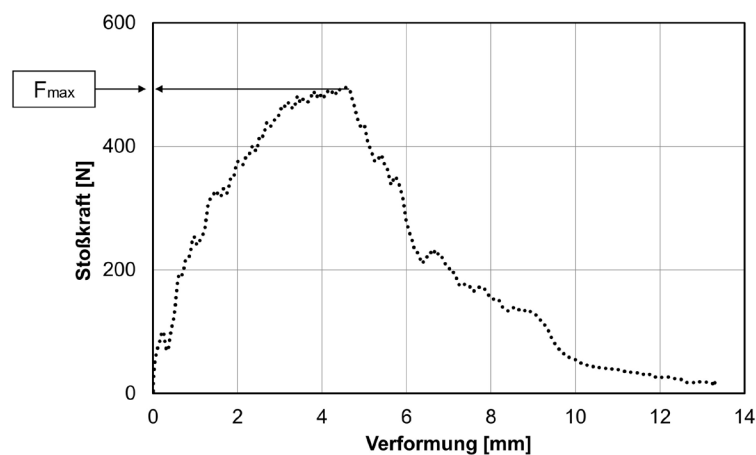
Parameter	Wert
Verarbeitungstemperatur [°C]	170
Einspritzgeschwindigkeit [mm/s]	10
Umschaltpunktgesteuerter Nachdruck [mm]	25
Einstufiger Nachdruck [bar]	100
Heißkanal [°C]	170

Für die Materialprüfung wurde das Mittelteil aus den Probekörpern entnommen (siehe Abbildung 42b) und mit einer Durchstoßprüfung nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4 untersucht (siehe Abbildung 42c). Zu diesem Zweck wurde ein Fallwerk Amsler HIT1100F von Zwick/Roell verwendet. Das Bauteil hat in Länge, Breite und Höhe die Dimensionen 300 × 300 × 75 mm.



**Abbildung 42** Prüfaufbau zur Untersuchung des Durchstoßverhaltens nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4, (a) Prüfkörper mit Naturfaservlies (vorne) und Prüfkörper mit Holzfaservlies (hinten), (b) der mittlere Teil (farblich hervorgehoben) wurde für die Durchstoßprüfung entfernt, (c) schematische Darstellung des Durchstoßversuchs

Nachfolgende Abbildung zeigt einen exemplarischen Kurvenverlauf im Kraft-Verformungs-Diagramm im Durchstoßversuch. Die maximale Stoßkraft ( $F_{\max}$ ) ist im Diagramm vermerkt.



**Abbildung 43** Exemplarischer Kurvenverlauf des Durchstoßversuchs mit maximaler Stoßkraft ( $F_{\max}$ )

Die Durchstoßenergie wird nach folgendem Integral berechnet [134].

$$E = \int_0^l F(l) dl \quad (2)$$

mit

E: Durchstoßenergie [J]  
 l: Verformung [mm]  
 F: Stoßkraft [N]

## 5.5 Weitere Materialprüfungen und Untersuchungen

### 5.5.1 Gravimetrische Faseranalyse

Die Luftstrahlsiebanalysen wurden mit einem Luftstrahlsieb der Firma Hosokawa Alpine vom Typ e200 LS durchgeführt. Die verwendeten Maschenweiten der Siebe betragen 125, 315, 630, 1000, 1600 und 2500  $\mu\text{m}$ . Die Probeneinwaage betrug 5 g. Das Luftstrahlsieb wurde in Kombination mit einer Waage von Mettler Toledo vom Typ PB602-S verwendet.

### 5.5.2 Mechanische Prüfungen

Die Zugprüfung wurde auf einer Zugprüfmaschine von Zwick/Roell vom Typ Z020 mit einer Kraftmessdose von 20 kN und taktilem Extensometer durchgeführt. Die Kopf-Zug-Versuche wurden mit demselben Prüfgerät durchgeführt. Die Kerbschlagbiegeprüfung wurde auf einem Pendelschlagwerk der Firma Zwick/Roell vom Typ HIT50P durchgeführt. Für die Durchstoßprüfung nach ISO 6603-2 wurde ein Fallwerk Amsler HIT1100F von Zwick/Roell verwendet. Der Falltest wurde mit 4,4 m/s und einem Gewicht von 9,378 kg bei einer Fallhöhe von 1 m durchgeführt.

### 5.5.3 Mikroskopische und bildgebende Untersuchungen

Die mikroskopischen Aufnahmen wurden mit einem Digitalmikroskop der Firma Zeiss vom Typ Smartzoom 5 durchgeführt. Die Beleuchtung ermöglicht Auflicht, koaxiales Hellfeld und Mischlicht. Für die Mikroskopie mit Mikrotomschnitten wurde ein Mikrotom (Typ Mikrotom L, microTec Laborgeräte) mit einem linearen Schneidverfahren verwendet. Die Computertomographie (CT) wurde mit einem TomoScope XS Plus der Firma Werth durchgeführt. Die maximale Länge des zu vermessenden Bauteils beträgt bei diesem Typ ca. 450 mm je nach Breite und Höhe. Die maximale Auflösung beträgt 60 Milliarden Voxel. Als zusätzliche Analysesoftware wurde VGSTUDIO MAX mit der Version 3.5.2 der Firma Volume Graphics verwendet.

### 5.5.4 Rheologische Untersuchungen und PVT-Messung

Die Messung der Melt-Flow-Rate wurde mit einem Schmelzindex-Prüfgerät der Firma Göttfert vom Typ MI-3 durchgeführt. Der Prüfkanaldurchmesser betrug 9,5 mm. Im Zuge der MFR-Messungen wurde auch die Dichte der Schmelze ermittelt. Die Schmelzviskositätsmessungen wurden mit einem Hochdruckkapillarviskosimeter (Typ RHEOGRAPH 25) der Firma Göttfert gemäß ISO 11443 durchgeführt. Es wurde im Zweikanalsystem mit zwei Kapillaren gemessen ( $L/D = 20/1$  und  $L/D = 0,2/1$ ). Die Viskosität wurde aus der scheinbaren Viskosität über die Weissenberg-Rabinowitsch-Korrektur und Bagley-Korrektur mittels der Software WinRheo II (Version 1.9.3) berechnet. Die PVT-Messungen wurden ebenfalls mit diesem Gerät durchgeführt.

### 5.5.5 Thermische Untersuchungen und Spektroskopie

Die DSC-Messungen wurden mit einer DSC 3+ der Firma Mettler Toledo durchgeführt. Der Messzyklus war Heat/Cool/Heat bei einer Heiz- und Kühlrate von 10 K/min von 25 °C bis 200 °C. Als Spülgas wurde Stickstoff mit einer Durchflussrate von 60 ml/min verwendet. Die Einwaage der Proben betrug im Mittel  $9 \pm 2$  mg.

Die IR-Spektroskopie wurde mit einem FT-IR-Spektrometer der Firma Bruker vom Typ Tensor 27 durchgeführt. Für die Messungen wurde eine Germanium-ATR-Einheit verwendet.

### 5.5.6 Ökobilanzierung

Zur Ökobilanzierung wurde die Datenbank ecoinvent [135] und die Software openLCA mit der Wirkungsabschätzung CML-IA baseline genutzt. Innerhalb der Bilanzierung wurden die für den Produktionsprozess benötigten Materialien, Rohstoffe, Betriebsmittel, Hilfsmittel und Energie berücksichtigt. Deshalb wurden aus den genannten Datensätzen die Herstellungsprozesse der benötigten Maschinerie bzw. produktionsbedingten Infrastruktur entfernt, sodass die davon ausgehenden Umweltauswirkungen nicht berücksichtigt wurden. Es wurden folgende Datensätze verwendet:

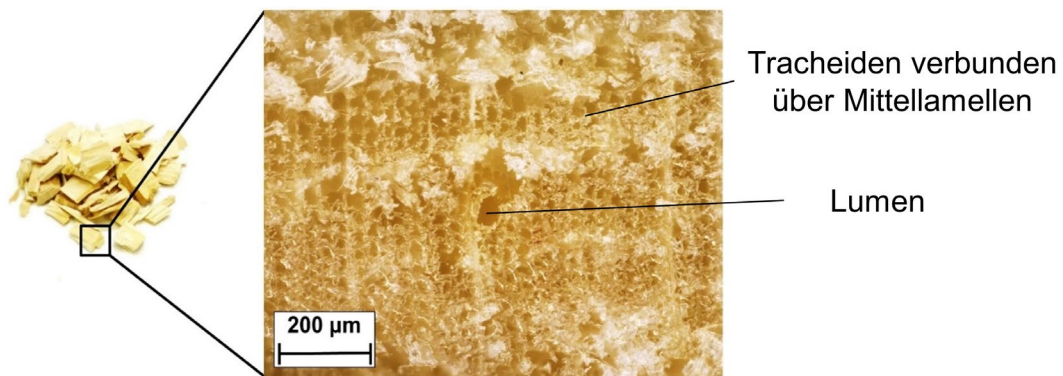
- softwood forestry, spruce, sustainable forest management; pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark (Referenz: Werner, F., softwood forestry, spruce, sustainable forest management, DE, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.8; Referenzjahr 2010)
- thermo-mechanical pulp production; thermo-mechanical pulp (Referenz: Hischier, R., thermo-mechanical pulp production, RER, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.8; Referenzjahr 1993)
- fibre production, kenaf, retting; fibre, kenaf (Referenz: Symeonidis, A., fibre production, kenaf, retting, IN, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.8; Referenzjahr 2016)
- fibre production, flax, retting; fibre, flax (Referenz: Nigam, M., fibre production, flax, retting, IN, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.8; Referenzjahr 2016)

## 6 Ergebnisse und Diskussion

### 6.1 Charakterisierung von Holzfasern

#### 6.1.1 Herstellung und Charakterisierung von Holzfasern

Ein Teil der nachfolgenden Ergebnisse im Abschnitt 6.1 wurde bereits in einer Veröffentlichung im Rahmen des Promotionsvorhabens diskutiert [7]. Zur Herstellung von Holzfasern wurde Fichtenrundholz zu Hackschnitzeln zerkleinert (5.1 Herstellung von Holzfasern). In nachfolgender Mikroskopie eines Hackschnitzels aus Fichte ist die mikroskopische Struktur des Holzes sichtbar. Die regelmäßige Anordnung der Tracheiden (Abbildung 44) ist durch den Trommelhacker teilweise zerstört.

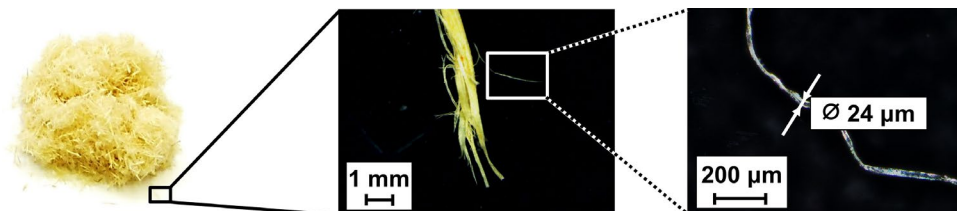


**Abbildung 44** Übersichtsbild einiger Hackschnitzel aus Fichte (links), Mikroskopie eines Mikrotomanschnitts eines Hackschnitzels aus Fichte (rechts), Querschnitt in Bezug auf die Wachstumsrichtung des Baumes, Auflicht

Die Geometrie der Tracheiden variiert je nach Alter des Baumes, Lage im Stamm und Umwelteinflüssen in der Länge zwischen 1,7 und 3,7 mm bzw. beim Durchmesser zwischen 20 und 40 µm [136]. Daraus ergibt sich ein durchschnittliches Längen-Durchmesser-Verhältnis von 97:1. Es wird ersichtlich, dass ein Großteil des Fichtenholzes aus freiem Volumen in den Lumen besteht, die im lebenden Baum dem Stofftransport dienen. Die Literaturangaben der Rohdichte darrtrockener Fichte von  $0,42 \text{ g/cm}^3$  [19] wird so verständlich. Die Dichte der Zellwand beträgt laut Literatur im Mittel  $1,5 \text{ g/cm}^3$  [13].

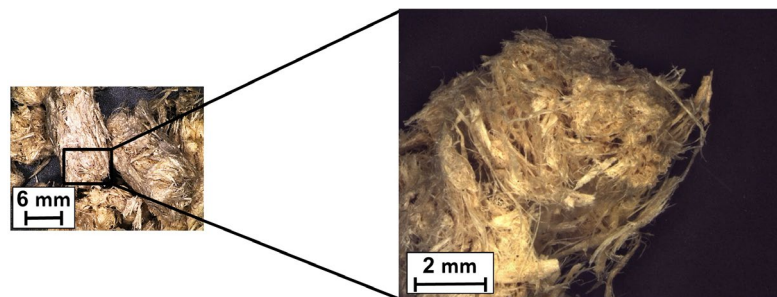
Die Hackschnitzel wurden in einer Laborrefineranlage zu Holzfasern aufgeschlossen (5.1 Herstellung von Holzfasern). Die Herstellung von Holzfasern im Refiner zieht eine von der Auswahl der Aufschlussparameter und der verwendeten Holzart abhängige Fasergrößenverteilung nach sich. Die Charakterisierung der Anteile an Faserbündeln, Einzelfasern und Feinanteil kann optisch und

gravimetrisch erfolgen. Nachfolgende Abbildung zeigt ein Faserbündel und eine Einzelfaser. Das Faserbündel besteht aus mehreren Einzelfasern (Tracheiden) (siehe Abbildung 45). Die Einzelfaser besteht aus einer einzelnen Faser (Tracheide) mit nur einem Lumen. Faserbruchstücke und kleinere Partikel werden als Feinanteil bezeichnet. Nachfolgend wird der Begriff Holzfasern synonym für ein Gemisch aus Faserbündel, Einzelfasern und Feinanteil verwendet.



**Abbildung 45** Übersichtsbild einiger thermo-mechanisch hergestellter Fasern aus Fichte (links), Mikroskopie eines Faserbündels aus Fichte (Mitte), Mikroskopie einer Einzelfaser aus Fichte (rechts)

Holzfasern sind über die klassischen Dosierer der Kunststofftechnik schwierig zu verarbeiten, da sie nicht rieselfähig sind (Abbildung 45 Übersichtsbild der Refinerfasern aus Fichte). Aus diesem Grund wurden die Holzfasern über einen Zwischenschritt zu Pellets verdichtet. Dabei werden die Holzfasern über eine Pelletieranlage (5.1 Herstellung von Holzfasern) durch eine Lochmatrize gepresst. Nachfolgende Abbildung zeigt mehrere Fichtepellets und ein stark vergrößertes Pellet. Pellets bestehen aus Faserbündeln, Einzelfasern und Feinanteil. Durch die Pelletierung ist die Verarbeitung über eine klassische gravimetrische Dosierung möglich. Ziel bei der Compoundierung ist, die Holzfaserpellets wieder in Faserbündel und Einzelfasern aufzulösen, in der Matrix zu dispergieren und homogen in das Bauteil einzubringen.

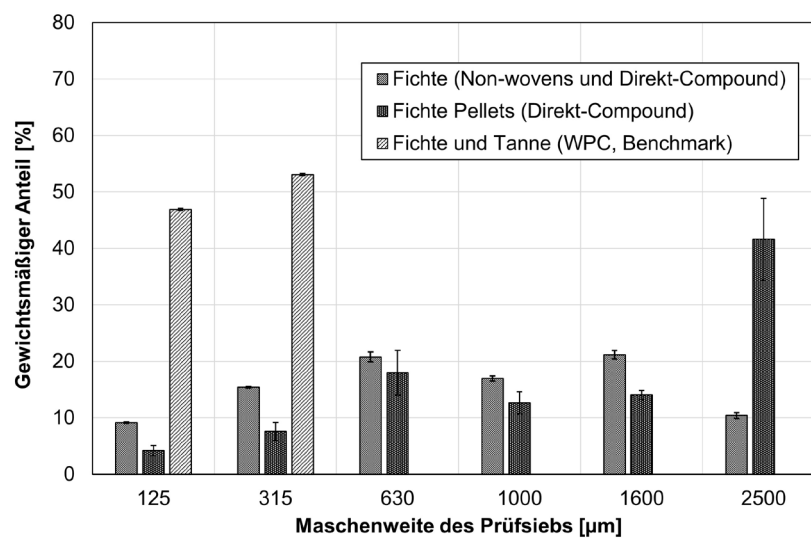


**Abbildung 46** Übersichtsbild einiger Pellets aus Fichtefasern (links), Mikroskopie von einem Pellet aus Fichtefasern (rechts), auffällig ist die geringe Komprimierung

### 6.1.2 Gravimetrische Größenverteilung

Die Analyse der gravimetrischen Größenverteilung (Abbildung 47) erfolgte über ein Luftstrahlsieb (5.5 Weitere Materialprüfungen und Untersuchungen). Optische Messmethoden können nicht zum Vergleich von Fasern und Faserpellets verwendet werden, da sich ihre Geometrien zu

stark unterscheiden. Die geringe Standardabweichung bei der gravimetrischen Analyse von Fichtefasern deutet jedoch auf eine hohe Reproduzierbarkeit der Messmethode hin. Die Standardabweichung bei den Pellets ist deutlich höher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich beim Sieben kleinere Stücke von den Pellets ablösen. Die Fichtefasern in Abbildung 47 wurden zum einen für die Holzfaservliese und zum anderen als Pellets für das Direkt-Compound verwendet. Die für das WPC-Benchmark verwendete Fichte und Tanne kann als Holzmehl bezeichnet werden. Die Länge der Naturfasern Kenaf und Hanf aus dem Benchmark-Naturfaservlies liegt im Bereich von 5 bis 10 cm. Daher ist für die Naturfasern weder eine Luftstrahlsiebanalyse noch eine optische Analyse möglich.



**Abbildung 47** Luftstrahlsieb-Analyse von Holzfasern aus Fichte, Pellets mit Fichtefasern und des Holzmehls, das im Benchmark-WPC verwendet wurde,  $n = 3 \pm SD$

### 6.1.3 Zusammenfassung

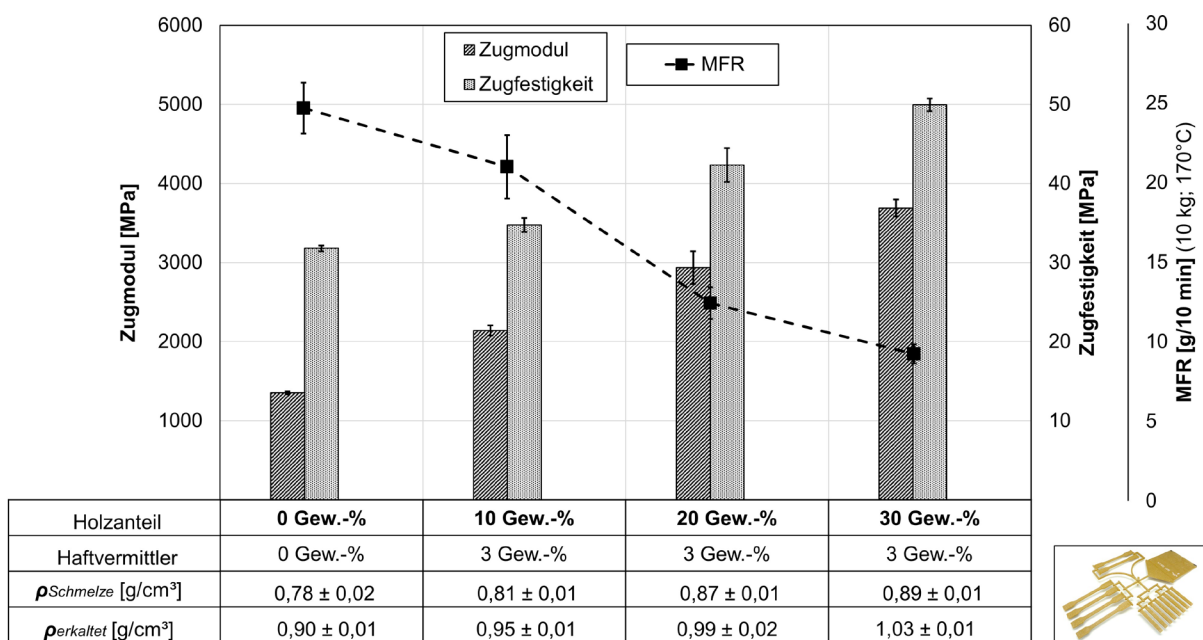
Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Holzfasern synonym für ein Gemisch aus Faserbündel, Einzelfasern und Feinanteil verwendet. Über den Zwischenschritt der Pelletierung werden Holzfasern rieselfähig und lassen sich über klassische Dosierer der Kunststofftechnik verarbeiten. Die Analyse der gravimetrischen Größenverteilung über ein Luftstrahlsieb ermöglicht die einheitliche Untersuchung der stark unterschiedlichen Fasergeometrien. Die geringe Standardabweichung deutet auf eine hohe Reproduzierbarkeit der Messmethode hin. Imken und Plinke et al. zeigten, dass die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen optischen Methoden nicht immer gewährleistet ist. Die Verteilung der Fasern und die Algorithmen zur Auswertung haben einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse. Bei demselben Material sind daher Messabweichungen zwischen den Methoden unvermeidlich. Derzeit gibt es keine Standardmethode für eine ausreichende Charakterisierung [137, 138]. Folglich werden hier nur Ergebnisse der Luftstrahlsiebanalyse gezeigt (Abbildung 47).



## 6.2 Direkt-Compoundierung von Polypropylen und Holzfasern

### 6.2.1 Zugversuch, Viskosität und Dichte

Ein Teil der nachfolgenden Ergebnisse im Abschnitt 6.2 wurde bereits in einer Veröffentlichung im Rahmen des Promotionsvorhabens diskutiert [7]. Die Holzfaserpellets (Abbildung 46 und Abbildung 47) wurden über den Spritzgusscompounder (5.2 Direkt-Compoundierung) mit steigendem Holzanteil, Haftvermittler und Grundpolymer (4 Materialien) direkt compoundiert. Die Mechanik wurde über die Zugprüfung ISO 527-2/1A getestet. Zur Charakterisierung der Viskosität wurde eine MFR-Messung der gespritzten Prüfkörper durchgeführt. Bei der MFR-Messung wurde zudem die Dichte der Schmelze ( $\rho_{\text{Schmelze}}$ ) bei den Prüfbedingungen ermittelt (10 kg, 170 °C). Im Vergleich dazu wurde die Dichte der Prüfkörper im erkalteten Zustand ( $\rho_{\text{erkaltet}}$ ) geometrisch über deren Gewicht ermittelt. Ein steigender Holzanteil führt zu einer stetigen Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit. Die Holzfasern haben eine Verstärkungswirkung. Tabelle 8 zeigt die Messwerte des Diagramms im Vergleich zum Matrixpolymer (Abbildung 48).



**Abbildung 48** Zugprüfung nach ISO 527-2/1A von PP mit Haftvermittler und unterschiedlichem Holzanteil, MFR-Messung,  $\rho_{\text{Schmelze}}$  und  $\rho_{\text{erkaltet}}$  mit  $n = 3 \pm \text{SD}$

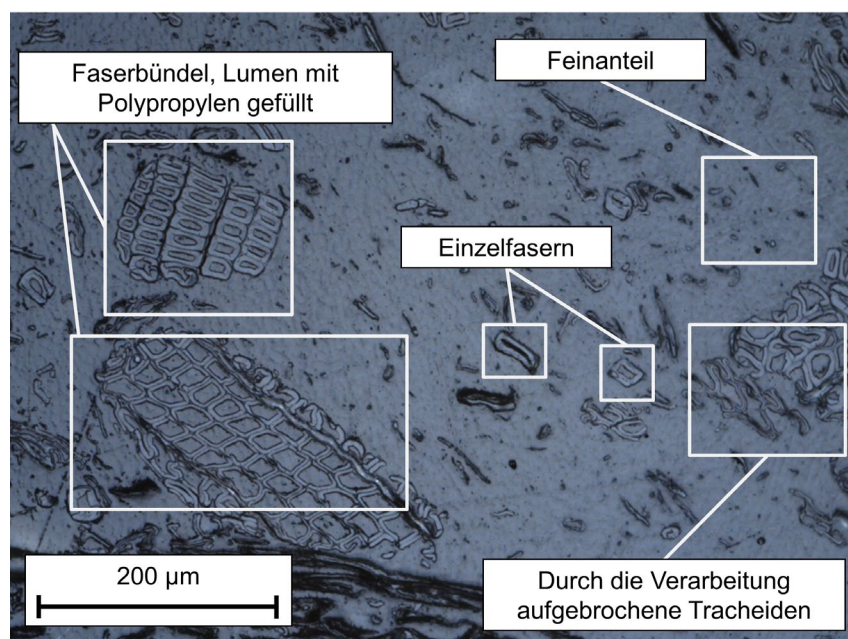
Bei steigendem Holzanteil kann zudem eine stetige Abnahme der Melt-Flow-Rate, also eine Erhöhung der Viskosität festgestellt werden. Die Erhöhung der Viskosität thermoplastischer Schmelzen durch Füllstoffe oder Verstärkungsfasern ist allgemein bekannt. Der Anstieg der Dichte mit steigendem Holzanteil (Abbildung 48) mag zunächst nicht intuitiv erscheinen. Das verwendete

Polypropylen hat laut Datenblatt eine Ausgangsdichte von  $0,905 \text{ g/cm}^3$ . Im darrtrockenen Zustand hat Fichte eine Dichte von  $0,42 \text{ g/cm}^3$  [19]. Die niedrige Dichte von Fichte im darrtrockenen Zustand liegt am großen freien Raum in den Lumen (Abbildung 44). Demnach müsste die Dichte des Verbunds bei einem steigenden Holzanteil sinken, wenn die Luftanteile in den Lumen erhalten bleiben.

**Tabelle 8** Messwerte des Diagramms (Abbildung 48), Zugprüfung nach ISO527-2/1A, MFR-Messung mit  $n = 3 \pm \text{SD}$

Holzanteil [Gew.-%]	0	10	20	30
Zugmodul [MPa]	$1352 \pm 20$	$2142 \pm 64$	$2937 \pm 207$	$3691 \pm 109$
Zugfestigkeit [MPa]	$31,8 \pm 0,4$	$34,8 \pm 0,9$	$42,3 \pm 2,2$	$49,9 \pm 0,9$
MFR [g/10 min]	$24,7 \pm 1,6$	$21,0 \pm 2,0$	$12,4 \pm 1,0$	$9,2 \pm 0,6$

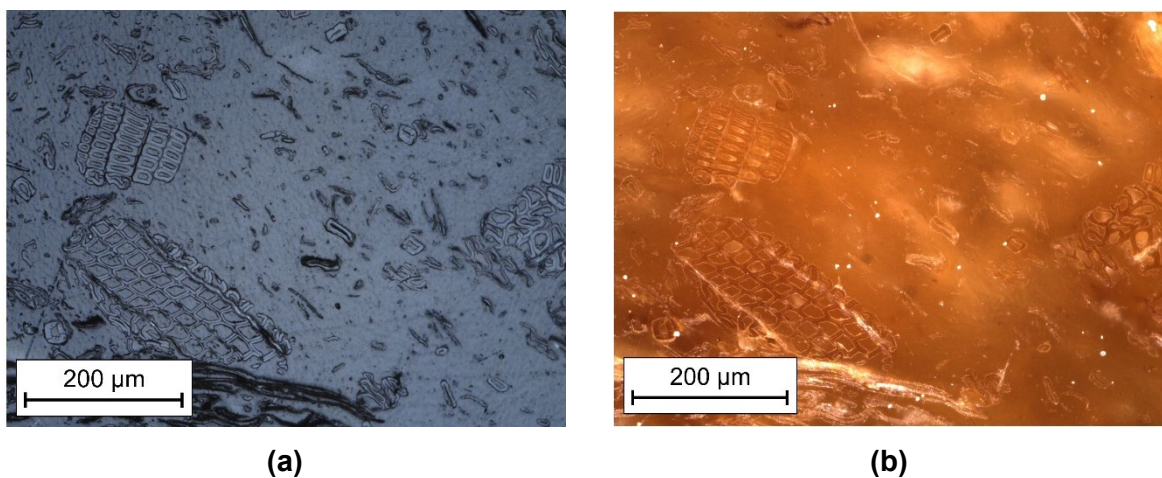
Es zeigt sich jedoch, dass sich die Holzfasern durch die Verarbeitung verändern. Entweder füllen sich die Lumen mit Schmelze oder die Zellwände der Tracheiden werden durch die hohen Scherkräfte und Drücke (Compoundierung, Staudruck, Spritzdruck) aufgebrochen oder komprimiert (Abbildung 49). Dies wird im Vergleich zur Prinzipskizze in Abbildung 6 (siehe 2.1.1 Aufbau und Einteilung von Holz- und Naturfasern) deutlich. Die reine Dichte der Zellwände beträgt ca.  $1,5 \text{ g/cm}^3$  [13]. Durch das Füllen der Lumen oder Aufbrechen der Tracheiden kommt es zum Anstieg der Dichte des Verbunds.



**Abbildung 49** PP mit 20 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Anschliff, koaxiales Hellfeld

In Abbildung 49 lassen sich Einzelfasern und Faserbündel erkennen. Außerdem sind Feinanteile erkennbar, also Holzstrukturen, die kleiner sind als eine Einzelfaser (6.1 Charakterisierung von Holzfasern). Die Holzfaserpellets (Abbildung 46) lösen sich in Faserbündel, Einzelfasern und Feinanteil auf und fügen sich homogen in die Matrix ein. Durch das Füllen der Lumen mit der Matrix lässt sich auch die Verbesserung der Mechanik erklären. Die Matrix (Polypropylen) geht durch das Füllen der Lumen eine formschlüssige Verbindung mit den Holzfasern ein. Dies wird verstärkt durch die Verwendung eines Haftvermittlers, der zusätzlich eine stoffschlüssige Verbindung vom unpolaren Polypropylen zur Holzfaser schafft. Aufgrund der hohen Festigkeit und Steifigkeit von Holzfasern (siehe Tabelle 1) kommt es so zu einer Verstärkungswirkung im Vergleich zum Grundpolymer (siehe Tabelle 8).

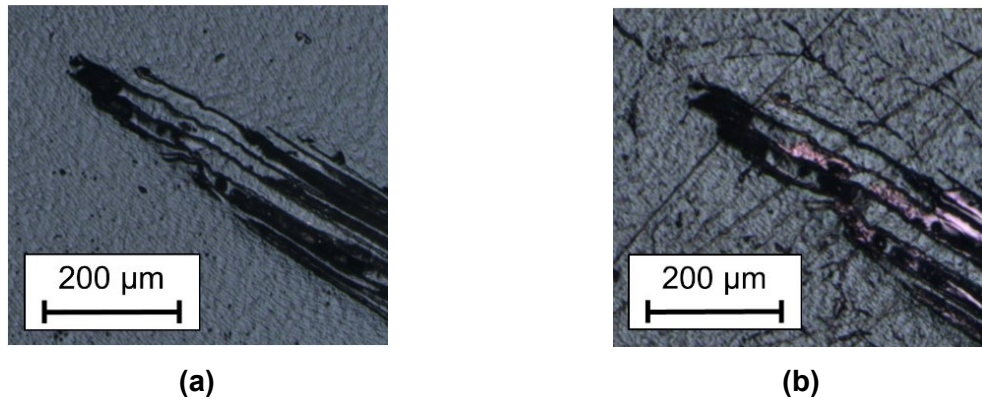
Das Füllen der Lumen mit Polypropylen (siehe Abbildung 49) wurde durch eine vergleichende Mikroskopie mit unterschiedlicher Belichtung untersucht und bestätigt. Das Füllen der Lumen zeigt sich sowohl bei koaxialem Hellfeld (siehe Abbildung 50a) als auch bei Auflicht (siehe Abbildung 50b).



**Abbildung 50** Einfluss der Beleuchtungsart auf den Anschliff, PP mit 20 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, (a) koaxiales Hellfeld, (b) Auflicht

Das Füllen der Lumen mit Polypropylen wurde weiterhin durch Kontrastmittelmikroskopie bestätigt. Dazu wurde ein bestimmter Bereich eines Anschliffs mikroskopiert. Danach wurde der Anschliff in Kontrastmittel getränkt und erneut mikroskopiert. Abbildung 51 zeigt die Mikroskopie einer Stelle eines Anschliffs mit und ohne Kontrastmittel. Es zeigt sich, dass das Kontrastmittel tendenziell den Bereich der Holzfaser hervorhebt. Das Kontrastmittel wird von der Faser aufgenommen, wodurch gezeigt wird, dass die Faser formschlüssig in die Matrix eingebunden ist. Somit wird die Aussage weiter unterstützt, dass die Lumen der Holzfasern mit Polypropylen gefüllt werden. Dieses Verhalten stimmt mit dem Stand der Wissenschaft und Technik überein. Gacitua und

Wolcott konnten bereits zeigen, dass Polyethylen in Lumen von Holzfasern eindringt (siehe Abbildung 14) [39]. Folglich ist bei der untersuchten Materialkombination und der verwendeten Technologie (Direkt-Compoundierung) der gleiche Effekt festzustellen.



**Abbildung 51** PP mit 20 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Anschliff, koaxiales Hellfeld, (a) ohne Kontrastmittel, (b) mit Kontrastmittel

Der Versuch mit 30 Gew.-% Holzanteil (Abbildung 48) wurde in einem Validierungsversuch wiederholt und die Ergebnisse konnten bestätigt werden (siehe Tabelle 9). Beim Validierungsversuch kam es zum leichten Abfall der Zugfestigkeit nach ISO 527-2/1A. Dies ist durch Schwankungen bei der Verarbeitung zu erklären (Material, Mensch, Maschine, Mitwelt). Beim Wiederholungsversuch konnte außerdem der Effekt des Haftvermittlers nachgewiesen werden. Der Mittelwert der Zugfestigkeit sank ohne Haftvermittler deutlich ab. In Abschnitt 6.2.5.3 (siehe 6.2.5.3 Mikroskopische Untersuchung der Bruchflächen) werden Bruchflächen mit und ohne Haftvermittler analysiert. Auch hier zeigt sich ein deutlicher Unterschied.

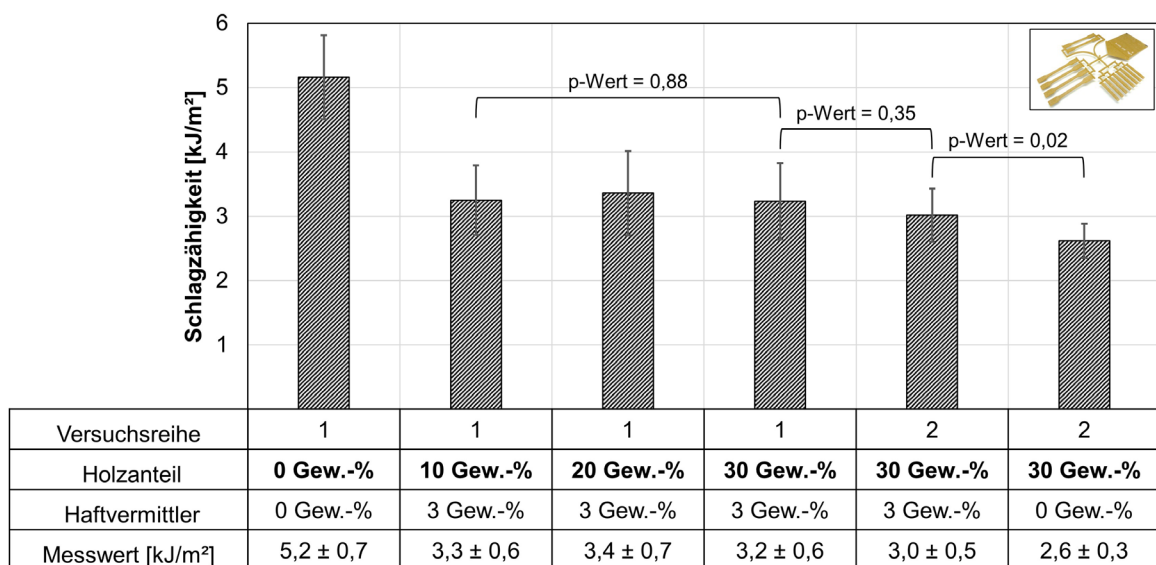
**Tabelle 9** Validierungsversuch und Effekt des Haftvermittlers auf die Zugfestigkeit von PP mit 30 Gew.-% Holzanteil

Versuchsreihe	1	2	2
	(Abbildung 48)	(Validierungsversuch)	(Validierungsversuch)
Haftvermittler [Gew.-%]	3	3	0
Holzanteil [Gew.-%]	30	30	30
Zugfestigkeit [MPa]	49,9 ± 0,9	44,7 ± 2,4	30,9 ± 0,6

### 6.2.2 Schlagzähigkeitsprüfung

Die Schlagzähigkeit bei steigendem Holzanteil wurde über einen Kerbschlagbiegeversuch nach ISO 179/1eB ermittelt (siehe Abbildung 52). Es zeigte sich, dass die Schlagzähigkeit im Vergleich zum Grundpolymer leicht abfiel. Bei steigendem Holzanteil blieb die Schlagzähigkeit im Rahmen

der Standardabweichung jedoch konstant. Die konstante Schlagzähigkeit bei steigendem Holzanteil ist im Vergleich zum Stand der Wissenschaft und Technik positiv hervorzuheben. Unter anderem Bledzki et al. stellen die sinkende Schlagzähigkeit bei steigendem Holzanteil als eines der Hauptprobleme von WPCs dar [13]. Durch die Compoundierung konnten die Holzfaserpellets (siehe Abbildung 46) in der Matrix dispergiert werden. Die Pellets lösen sich in Faserbündel, Einzelfasern und Feinanteil auf (siehe Abbildung 49). Die konstante Schlagzähigkeit ist mit der homogenen Einarbeitung der Pellets sowie mit der formschlüssigen und stoffschlüssigen Verbindung von Matrix und Holzfaser zu erklären (6.2.1 Zugversuch, Viskosität und Dichte).

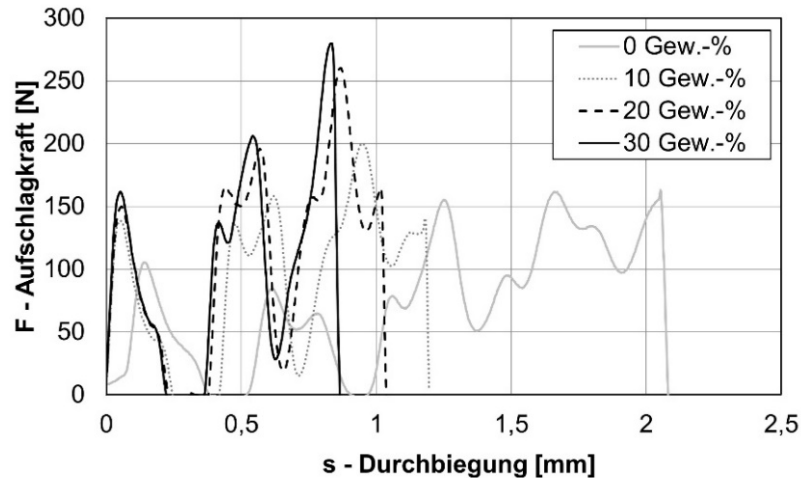


**Abbildung 52** Schlagzähigkeitsprüfung ISO 179/1eB (edgewise, Kerbart B) von PP mit und ohne Haftvermittler und mit unterschiedlichem Holzanteil aus zwei Versuchsreihen,  $n = 10 \pm SD$ , p-Wert durch einfaktorielle Varianzanalyse bei  $\alpha = 0,05$

Bei einer einfaktoriellen Varianzanalyse und einem Alphaniveau von 0,05 besteht kein Unterschied zwischen der Schlagzähigkeit in Versuchsreihe 1 mit 10, 20 sowie 30 Gew.-% Holzanteil (p-Wert = 0,88). Der direkte Vergleich von Versuchsreihe 1 und 2 bei 30 Gew.-% Holzanteil zeigt ebenfalls keinen Unterschied (p-Wert = 0,35). Bei Versuchsreihe 2 zeigt sich bei gleichem Alphaniveau ein Unterschied mit und ohne Haftvermittler (p-Wert = 0,02).

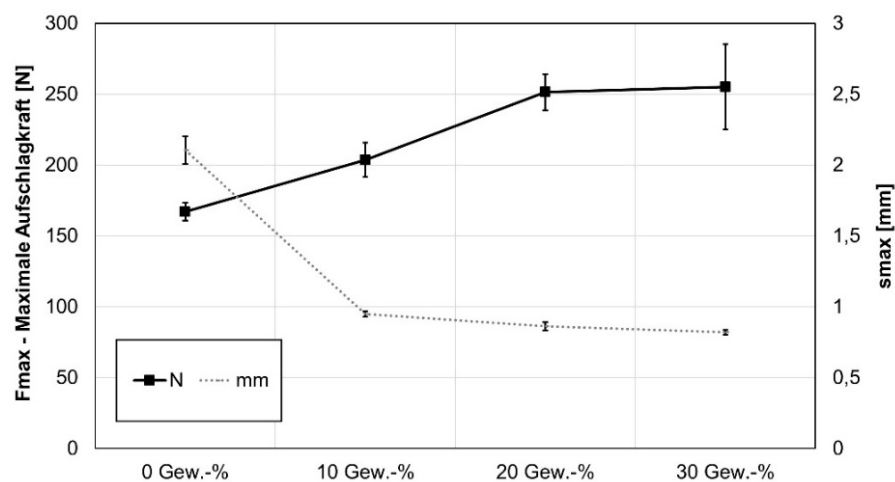
Zum besseren Verständnis der Schlagzähigkeit wurde die nicht instrumentierte Messung (Abbildung 52, ISO 179/1eB) wiederholt. Dabei wurde ein instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch (Abbildung 53, ISO 179/2eB) verwendet. Im Kraft-Durchbiegungs-Diagramm zeigt sich, dass sich die Kurven bei steigendem Holzanteil verschieben (Abbildung 53 und Abbildung 54). Bei steigendem Holzanteil steigt die maximale Schlagkraft und tritt bei geringerer Durchbiegung auf. Die ma-

ximale Schlagkraft aus Abbildung 53 wird in Abbildung 54 dargestellt. Trotz der unterschiedlichen Kurven bleibt das Flächenintegral und somit die Schlagzähigkeit im Rahmen der Standardabweichung konstant.



**Abbildung 53** Kraft-Durchbiegungs-Diagramm, Schlagzähigkeitsprüfung ISO 179/2eB (edgewise, Kerbart B), exemplarischer Kurvenverlauf von PP mit unterschiedlichem Holzanteil aus Versuchsreihe 1

Die Kurven in Abbildung 53 zeigen einen typischen schwingungsförmigen Verlauf. Diese Schwingungen werden durch Trägheitseffekte verursacht. Durch die elastische Komponente der untersuchten Materialien kommt es zum sogenannten Prellen und der Kontakt zwischen Prüfkörper und Hammer bricht ab. Die Schlagzähigkeitsprüfung besteht somit aus einer Folge von mehrfachen Schlägen [139].



**Abbildung 54** Maximale Kraft ( $F_{max}$ ) und Durchbiegung bei  $F_{max}$  ( $s_{max}$ ), Schlagzähigkeitsprüfung ISO 179/2eB (edgewise, Kerbart B) von PP mit unterschiedlichem Holzanteil aus Versuchsreihe 1,  $n = 3 \pm SD$

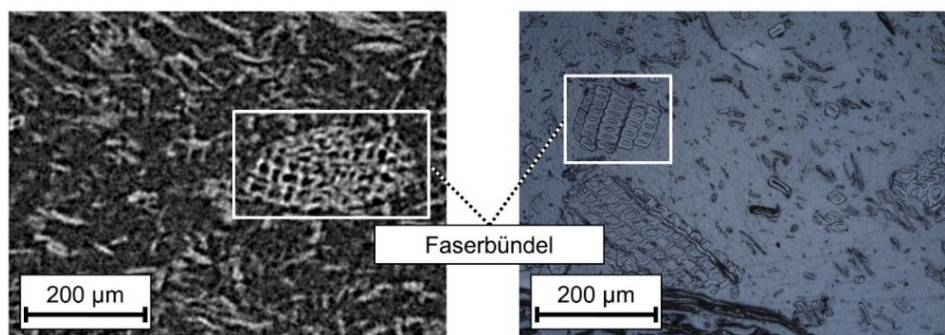
Der Kurvenverlauf im Kraft-Durchbiegungs-Diagramm sowie die optische Beurteilung der Bruchflächen lassen bei allen untersuchten Materialien mit Holzfaserteil auf ein sprödes Bruchverhalten schließen. Abbildung 54 zeigt die maximale Aufschlagskraft ( $F_{\max}$ ) und die Durchbiegung bei  $F_{\max}$  ( $s_{\max}$ ) aus dem Kraft-Weg-Diagramm (Abbildung 53). Bei steigendem Holzanteil nähern sich sowohl  $F_{\max}$  als auch  $s_{\max}$  asymptotisch einem Maximum bzw. Minimum an.

### 6.2.3 Computertomographische Analyse der Prüfkörper

In Abschnitt 6.2.1 wurde bereits festgestellt, dass sich die Lumen der Holzfasern mit Kunststoff füllen. Die zweidimensionale Analyse über Mikroskopie bzw. Kontrastmittelmikroskopie lässt allerdings nur bedingt Rückschlüsse zu. Zum besseren Verständnis der Interaktion von Faser und Matrix wurden computertomographische Analysen durchgeführt (siehe 6.2.3.1 Faser-Matrix-Grenzflächen). Des Weiteren wurde die Faserorientierung im Prüfkörper ermittelt (siehe 6.2.3.2 Faserorientierung). In Abschnitt 6.2.3.3 wird der Faservolumenanteil über die Computertomographie ermittelt.

#### 6.2.3.1 Faser-Matrix-Grenzflächen

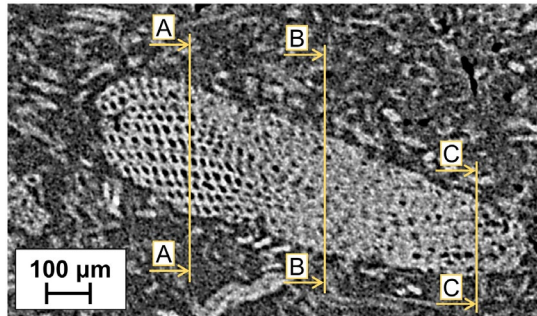
Im Rahmen einer Entwicklungskooperation mit der Firma Werth wurde eine vergleichende Untersuchung von Computertomographie und Mikroskopie durchgeführt (siehe Abbildung 55). Es zeigt sich, dass mittels der Computertomographie ebenfalls Faserbündel und Einzelfasern detektierbar sind. Die Computertomographie ermöglicht im Vergleich zur Mikroskopie eine zerstörungsfreie sowie dreidimensionale Prüfung und hat einen deutlich geringeren Präparationsaufwand.



**Abbildung 55** Vergleichende Darstellung einer Computertomographie (links) und einer Mikroskopie (rechts, Anschliff, koaxiales Hellfeld), PP mit 20 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler

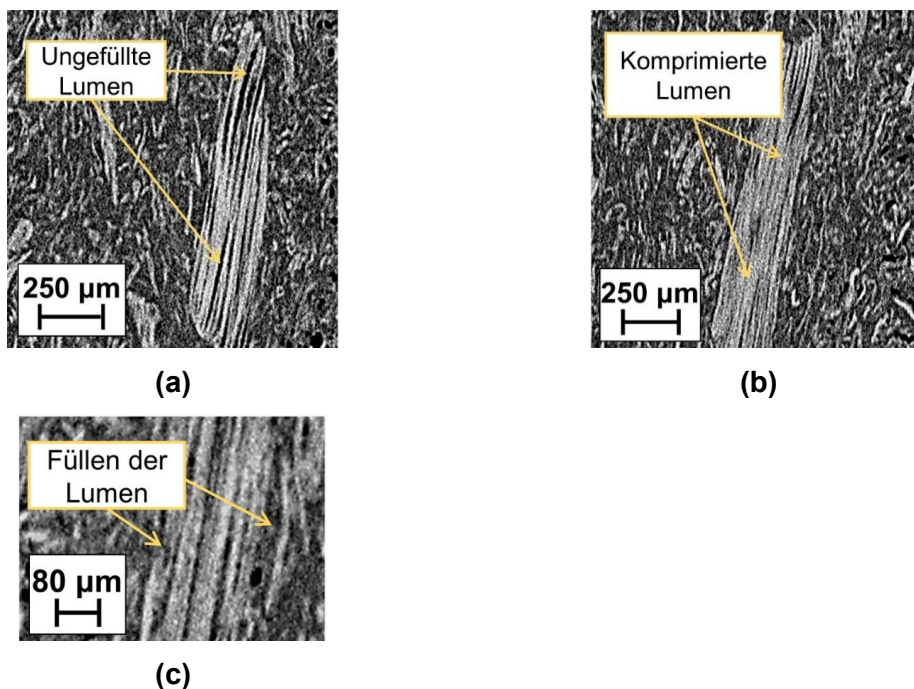
Im Vergleich zur Mikroskopie kann über die Computertomographie die Interaktion von Fasern und Matrix dreidimensional untersucht werden. Am Beispiel der Abbildung 56 konnten vereinzelt Faserbündel gefunden werden, die ungefüllte Lumen enthalten (Schnitt A-A und Abbildung 57a)

und stark komprimierte Lumen (Schnitt B-B und Abbildung 57b) sowie das Füllen der Lumen mit Schmelze zeigen (Schnitt C-C und Abbildung 57c).



**Abbildung 56** Computertomographie, Analysesoftware VGSTUDIO MAX, PP mit 30 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler

Abbildung 57 zeigt die jeweiligen Schnittdarstellungen aus Abbildung 56. Ungefüllte Lumen, komprimierte Lumen und gefüllte Lumen sind deutlich zu erkennen. Wie auch in Abbildung 49 zeigt sich, dass sich die Holzfaserpellets auflösen und homogen in die Matrix einfügen. Die Grenzfläche von Faser zu Matrix weist einen direkten Übergang auf. Durch das Füllen der Lumen geht die Matrix eine formschlüssige Verbindung mit den Holzfasern ein. Im Gegensatz zu Abbildung 49 sind in Abbildung 57a ungefüllte Lumen und in Abbildung 57b komprimierte Lumen zu erkennen.

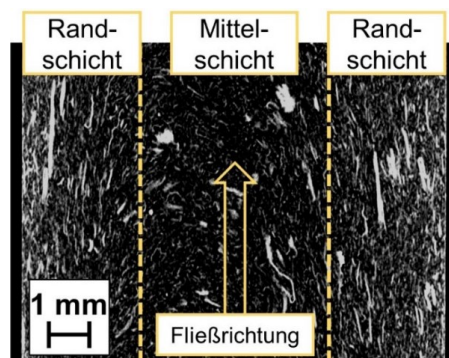


**Abbildung 57** Computertomographie, Analysesoftware VGSTUDIO MAX, PP mit 30 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Schnittdarstellungen aus Abbildung 51, (a) Schnittdarstellung A-A, (b) Schnittdarstellung B-B, (c) Schnittdarstellung C-C



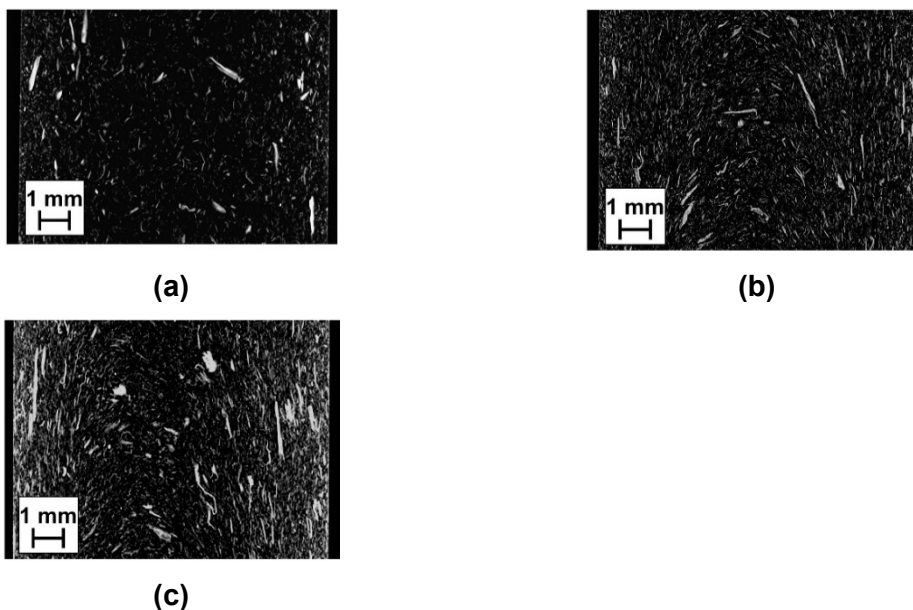
### 6.2.3.2 Faserorientierung

Über den Querschnitt eines Prüfstabs stellt sich eine unterschiedliche Faserorientierung ein. Nachfolgende Abbildung zeigt die Computertomographie von PP mit 30 Gew.-% Holzanteil. Über die Breite des Prüfstabs von 10 mm sind unterschiedliche Faserorientierungen in Rand- und Mittelschicht deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 58). In den Randschichten zeigt sich eine Orientierung in Fließrichtung. Diese Art der Faserorientierung ist bei glasfaserverstärkten Thermoplasten allgemein bekannt [140]. Bei den untersuchten Direkt-Compounds mit steigendem Holzfaserteil zeigt sich derselbe Effekt.



**Abbildung 58** Computertomographie, Analysesoftware VGSTUDIO MAX, PP mit 30 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Faserorientierung in Rand- und Mittelschicht

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei einem Holzfaserteil von 10 und 20 Gew.-% (siehe Abbildung 59). In den Randschichten zeigt sich eine Orientierung in Fließrichtung.



**Abbildung 59** Computertomographie, Analysesoftware VGSTUDIO MAX, Faserorientierung in Mittel- und Randschicht in Abhängigkeit vom Faseranteil, (a) 10 Gew.-% Holzanteil, (b) 20 Gew.-% Holzanteil, (c) 30 Gew.-% Holzanteil

Da nicht alle Fasern in Fließrichtung orientiert sind, können bei der Zugprüfung nicht die maximalen Werte erreicht werden (siehe 6.2.4 Faservolumenanteil und theoretisches Zugmodul).

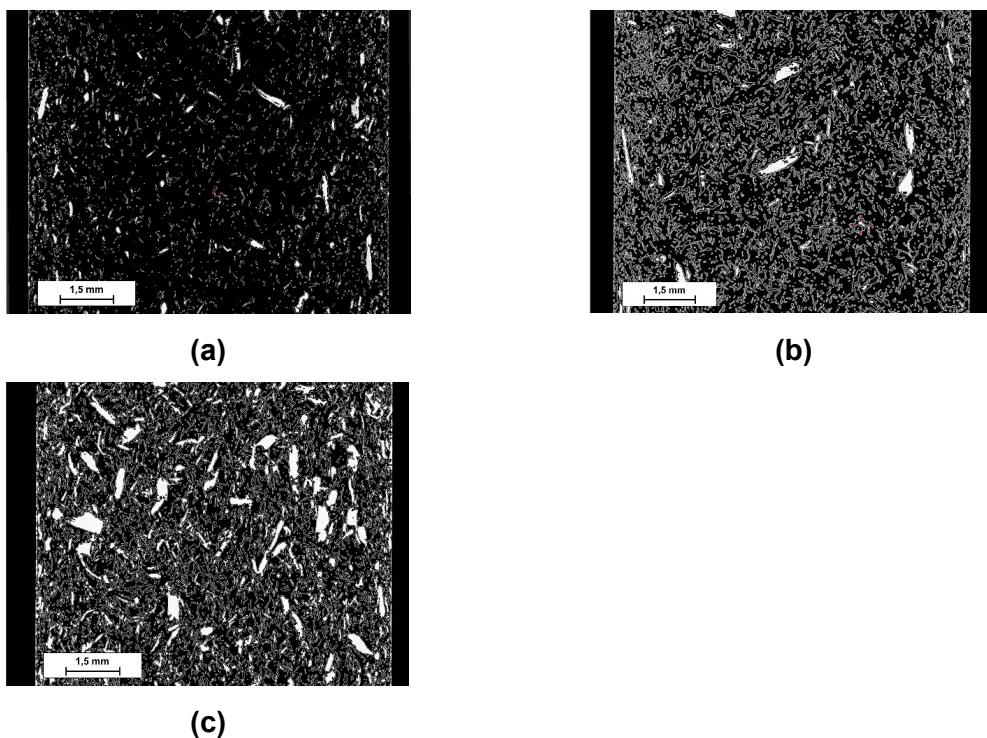
### 6.2.3.3 Faservolumenanteil

Der Faservolumenanteil wird in Abschnitt 6.2.4 in Zusammenhang mit dem theoretischen Zugmodul diskutiert. In diesem Abschnitt wird der Faservolumenanteil messtechnisch anhand der Computertomographie ermittelt. Nachfolgende Tabelle zeigt die Messwerte (siehe Tabelle 10). Das gemessene Volumen der Prüfkörper betrug 30 mm x 10 mm x 4 mm (Höhe, Breite, Tiefe). In Tabelle 10 ist ein Vergleich der Einstellung über die Dosierung in Gew.-% mit dem Faservolumenanteil gemessen über die Computertomographie in Vol.-% aufgelistet.

**Tabelle 10** Faservolumenanteil gemessen mittels Computertomographie, Analysesoftware VGSTUDIO MAX,  $n = 3 \pm SD$

Holzanteil [Gew.-%]	10	20	30
$\phi$ Holzanteil [Vol.-%] (gemessen über Computertomographie)	$10 \pm 1$	$23 \pm 1$	$36 \pm 4$

Die Analyse des Faservolumenanteils ist dreidimensional. Nachfolgende Abbildungen (siehe Abbildung 60) zeigen beispielhafte zweidimensionale Aufnahmen mit Fasererkennung.



**Abbildung 60** Computertomographie, Analysesoftware VGSTUDIO MAX, Faservolumenanteil (a) 10 Gew.-% Holzanteil, (b) 20 Gew.-% Holzanteil, (c) 30 Gew.-% Holzanteil

#### 6.2.4 Faservolumenanteil und theoretisches Zugmodul

Der theoretische Faservolumenanteil lässt sich vom Fasergewichtsanteil mit nachfolgender Gleichung ableiten [20] und wird in Tabelle 11 dargestellt. Die Dichte der Holzfaser bzw. die reine Dichte der Zellwände wurde mit  $1,5 \text{ g/cm}^3$  angenommen (siehe Tabelle 1).

$$\varphi = \frac{\psi}{\psi + (1 - \psi) \times \frac{\rho_{Faser}}{\rho_{Matrix}}} \quad (3)$$

mit	$\varphi$ :	Faservolumenanteil [Vol.-%]
	$\psi$ :	Fasergewichtsanteil (Tabelle 8) [Gew.-%]
	$\rho_{Faser}$ :	Dichte der Holzfaser ( $1,5 \text{ g/cm}^3$ , Tabelle 1)
	$\rho_{Matrix}$ :	Dichte der Matrix ( $0,905 \text{ g/cm}^3$ , 4 Materialien)

Mit dem theoretischen Faservolumenanteil lässt sich der theoretisch maximale Zugmodul parallel zur Faserrichtung errechnen. Die theoretische Betrachtung ist stark vereinfacht unter den Annahmen, dass es sich um eine unidirektionale und endlose Faserverstärkung handelt, die Belastung parallel zur Faser erfolgt, Matrix und Faser isotrope Eigenschaften haben und die Faser-Matrix-Haftung vollkommen ist [20].

$$E_{\parallel} = E_{Faser} \times \varphi + E_{Matrix} \times (1 - \varphi) \quad (4)$$

mit	$E_{\parallel}$ :	Zugmodul des Faserverbands parallel zur Faserrichtung [GPa]
	$E_{Faser}$ :	E-Modul der Faser (40 GPa, Tabelle 1)
	$\varphi$ :	Faservolumenanteil (Tabelle 11) [Vol.-%]
	$E_{Matrix}$ :	E-Modul der Matrix (1352 MPa, Tabelle 8)

Der gemessene Zugmodul ist wesentlich niedriger als der theoretisch mögliche Zugmodul (siehe Tabelle 11). Der Unterschied erklärt sich durch die stark vereinfachten Annahmen bei der Berechnung des theoretischen Zugmoduls. Bei der Verarbeitung können diese vereinfachten Annahmen kaum realisiert werden. Bei direkt compoundingierten Holzfasern handelt es sich um eine diskontinuierliche Faserverstärkung. In Abschnitt 6.2.3.2 (siehe 6.2.3.2 Faserorientierung) zeigt sich, dass die Fasern nicht ideal in Zugrichtung orientiert sind.

**Tabelle 11** Fasergewichtsanteil, theoretischer Faservolumenanteil, theoretischer und gemessener Zugmodul

Holzanteil [Gew.-%]	0	10	20	30
$\varphi$ Holzanteil [Vol.-%]	0	6	13	21
Theoretischer Zugmodul [MPa]	1352	3780	6417	9292
Gemessener Zugmodul [MPa]	1352 ± 20	2142 ± 64	2937 ± 207	3691 ± 109

Tabelle 12 vergleicht den theoretischen Faservolumenanteil (siehe Tabelle 11) und den gemessenen Faservolumenanteil (siehe Tabelle 10). Wie in Abbildung 57 zu sehen ist, sind Lumen der Holzfasern teilweise mit Schmelze gefüllt, teilweise komprimiert und teilweise nicht mit Schmelze gefüllt. Folglich ist die Annahme, den theoretischen Faservolumenanteil mit einer Dichte von  $1,5 \text{ g/cm}^3$  zu berechnen, nicht ideal. Die tatsächliche Dichte der Holzfaser im Faserverbund ergibt sich einerseits aus der Rohdichte und andererseits aus der Dichte der Zellwand. Die Rohdichte von Fichte mit Lumen im darrtrockenen Zustand liegt im Bereich von  $0,42 \text{ g/cm}^3$  [19]. Die Dichte der Zellwand beträgt laut Literatur im Mittel  $1,5 \text{ g/cm}^3$  [13]. Somit ergibt sich der in Tabelle 12 dargestellte Unterschied zwischen Fasergewichtsanteil, theoretischem Faservolumenanteil und dem über die Computertomographie gemessenen Faservolumenanteil.

**Tabelle 12** Fasergewichtsanteil, theoretischer Faservolumenanteil und gemessener Faservolumenanteil

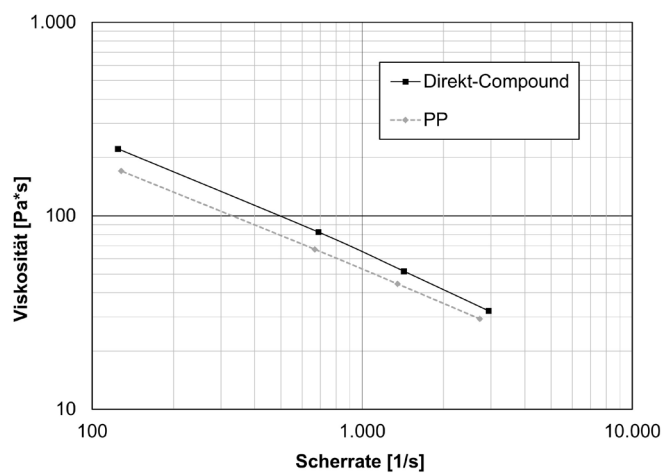
Holzanteil [Gew.-%]	0	10	20	30
$\varphi$ Holzanteil [Vol.-%] (theoretisch)	0	6	13	21
$\varphi$ Holzanteil [Vol.-%] (gemessen über Computertomographie)	0	10 ± 1	23 ± 1	36 ± 4

Die messtechnische Bestimmung des Faservolumenanteils bei holzfaserverstärkten Kunststoffen ist nicht trivial. Die thermische Zersetzung und die inkonstante Dichte widersprechen sich mit einer Bestimmung über Veraschung oder Extraktion. Der gemessene Faservolumenanteil über die Computertomographie ist grundsätzlich kritisch zu betrachten. Die Messungen konnten zwar reproduzierbar und mit einer geringen Standardabweichung durchgeführt werden, jedoch ist ein Einfluss von Prüfgerät und Software nicht auszuschließen. Im Rahmen weiterer Forschung könnte die Untersuchung mit unterschiedlichen Computertomographen verglichen und validiert werden. Bei den untersuchten Werkstoffen gibt der theoretisch ermittelte Faservolumenanteil eine gute erste Näherung, um die Compounds zu beschreiben.

## 6.2.5 Weiterführende Untersuchungen

### 6.2.5.1 Viskositätsmessung

Die Viskositätsmessung mittels Melt-Flow-Rate (MFR) wurde über eine Messung mit einem Hochdruckkapillarviskosimeter (HKV) überprüft. Die HKV-Messung in Abbildung 61 zeigt denselben Trend wie die MFR-Messung in Abbildung 48. Ein Holzanteil von 20 Gew.-% führt zu einer höheren Viskosität über den gesamten Scherratenbereich im Vergleich zum reinen PP. Das Direkt-Compound mit 20 Gew.-% Holzanteil wird für die weiteren Versuche in Abschnitt 6.4 (siehe 6.4 Hybridverbunde, Untersuchungen zur Verbundhaftung) verwendet.



**Abbildung 61** Schmelzviskosität von Polypropylen mit 0 Gew.-% Holzanteil und einem Direkt-Compound mit 20 Gew.-% Holzanteil nach ISO 11443 bei 200 °C

### 6.2.5.2 Thermische Untersuchung

Nachfolgende Tabelle zeigt die Schmelzeenthalpie und Kristallisationsenthalpie von Proben mit steigendem Holzanteil. Es zeigt sich, dass sich ein steigender Holzanteil negativ auf die Schmelzeenthalpie und Kristallisationsenthalpie des Compounds auswirkt (siehe Tabelle 13).

**Tabelle 13** DSC von Proben mit steigendem Holzanteil, Messzyklus Heat/Cool/Heat, Heiz- und Kühlrate von 10 K/min, 25 °C bis 200 °C, Stickstoffatmosphäre

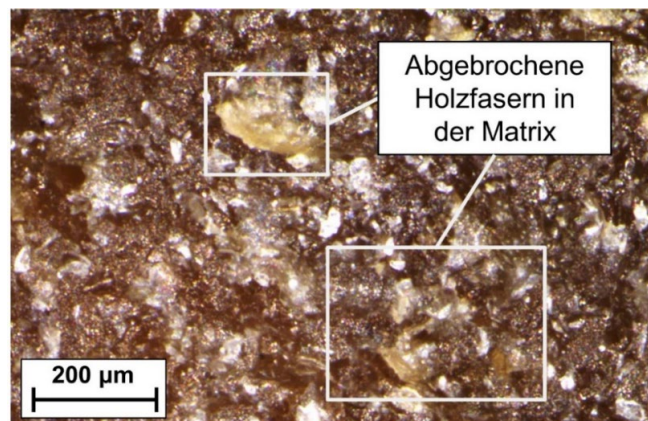
Holzanteil [Gew.-%]	0	10	20	30
Schmelzeenthalpie [J/g]	92 ± 1	85 ± 2	71 ± 1	68 ± 2
Kristallisationsenthalpie [J/g]	101 ± 1	94 ± 1	77 ± 1	73 ± 1

Bezieht man die Messwerte auf den gewichtsmäßigen Matrixanteil der jeweiligen Compounds, bleiben sowohl Schmelzeenthalpie als auch Kristallisationsenthalpie bei steigendem Holzfasernanteil konstant. Der mechanisch verstärkende Effekt der Holzfasern bei Zugmodul und Zugfestigkeit

liegt folglich nicht an einer Nukleierungswirkung der Holzfasern, sondern an der Faserverstärkung (6.2.1 Zugversuch, Viskosität und Dichte).

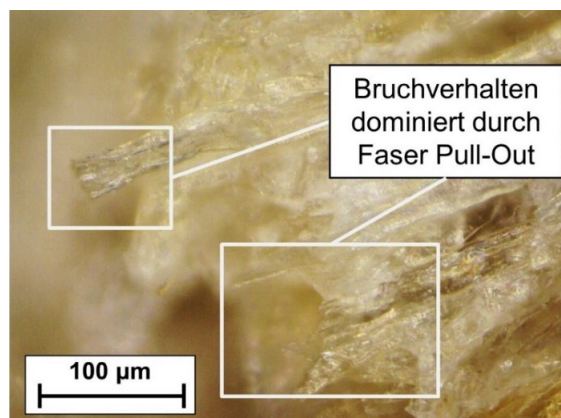
### 6.2.5.3 Mikroskopische Untersuchung der Bruchflächen

Zum tieferen Verständnis der Bruchmechanik wurden die Bruchflächen von Zugprüfstäben nach der Prüfung untersucht. Abbildung 62 zeigt die Bruchfläche von PP mit 30 Gew.-% Holzanteil und Haftvermittler. Die Holzfasern an der Bruchfläche bleiben in der Matrix eingebunden. Daraus lässt sich eine gute Faser-Matrix-Haftung ableiten.



**Abbildung 62** PP mit 30 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Zugprüfstab, Bruchfläche nach Zugprüfung, Mikroskopie mit Auflicht

Im Vergleich zur Probe mit Haftvermittler (siehe Abbildung 62) zeigt die Probe ohne Haftvermittler (siehe Abbildung 63) ein deutlich anderes Bruchbild. Das Bruchverhalten wird durch Faser-Pull-Out dominiert. An der Bruchfläche des Zugprüfstabs werden die Holzfasern aus der Matrix herausgezogen. Daraus lässt sich eine unzureichende Faser-Matrix-Haftung ableiten. Die deutlich schlechtere Mechanik (siehe Tabelle 9) der Proben ohne Haftvermittler wird so verständlich.



**Abbildung 63** PP mit 30 Gew.-% Holzanteil ohne Haftvermittler, Zugprüfstab, Bruchfläche nach Zugprüfung, Mikroskopie mit Mischlicht

### 6.2.6 Zusammenfassung

Ergänzend zum Stand der Wissenschaft und Technik wurde in diesem Abschnitt folgende Hypothese untersucht (**Hypothese 1**):

**Durch Direkt-Compoundierung von Polypropylen mit Holzfasern kann eine Faserverstärkung bzw. eine signifikante Verbesserung der Mechanik in Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit im Vergleich zum Grundpolymer ohne Holzfasern erreicht werden.**

Es konnte gezeigt werden, dass ein steigender Holzanteil zu einer signifikanten Erhöhung der Steifigkeit, Festigkeit und maximalen Schlagkraft führt. Die Holzfasern haben eine Verstärkungswirkung (siehe 6.2.1 Zugversuch, Viskosität und Dichte sowie 6.2.2 Schlagzähigkeitsprüfung). Eine Nukleierungswirkung der Holzfaser konnte als Ursache für die verbesserte Mechanik ausgeschlossen werden (siehe 6.2.5.2 Thermische Untersuchung).

Die Pelletierung der Holzfasern ermöglicht eine einfache Dosierung über die gravimetrische Dosiereinrichtung. Die Holzfaserpellets lösen sich durch die Verarbeitung im Spritzgusscompounder in Faserbündel, Einzelfasern und Feinanteil auf und fügen sich homogen in die Matrix ein (siehe Abbildung 49). So bleibt auch die Kerbschlagzähigkeit bei steigendem Holzfasernanteil im Rahmen der Standardabweichung konstant (siehe 6.2.2 Schlagzähigkeitsprüfung). Die erreichten Werte für Steifigkeit und Festigkeit mit einem Holzfasernanteil von 30 Gew.-% (Abbildung 48) übersteigen die Werte aus dem Projekt FENAFa mit 30 Gew.-% Hanf und Flachs deutlich [44]. Prozess und Materialien aus dem Projekt FENAFa können sehr gut mit den Ergebnissen dieser Untersuchung verglichen werden, da ebenfalls ein Spritzgusscompounder und ähnliche Materialien verwendet wurden. Ein steigender Füllgrad führt außerdem zur Erhöhung der Dichte und der Viskosität. Die Lumen der Holzfasern füllen sich teilweise mit Kunststoff. Die Dichte der Zellwand übersteigt die Dichte des Grundpolymers. So kommt es zum Anstieg der Dichte des Verbundwerkstoffs (siehe Abbildung 48 und Abbildung 49). Durch Untersuchungen mittels Computertomographie wurde diese Vermutung bestätigt. Es konnten Holzfasern sowohl mit gefüllten als auch mit ungefüllten Lumen gefunden werden (siehe 6.2.3).

Der gemessene Faservolumenanteil über die Computertomographie ist grundsätzlich kritisch zu betrachten. Im Rahmen weiterer Forschung könnte die Untersuchung mit unterschiedlichen Computertomographen verglichen und validiert werden. Bei den untersuchten Werkstoffen gibt der theoretisch ermittelte Faservolumenanteil eine gute erste Näherung, um die Compounds zu beschreiben.

## 6.3 Vlieslegung von Holzfaservliesen mit thermoplastischer Matrix

### 6.3.1 Vlieslegung

Zur Vlieslegung von Holzfasern und PP-Fasern wurden die Materialien über eine Airlay-Anlage zu einem Vlies gelegt und über eine Doppelbandheizung zu einem Halbzeug thermisch gebunden. Das Vlies konnte nach der Doppelbandheizung als Rollenware gelagert und transportiert werden (siehe Abbildung 64).

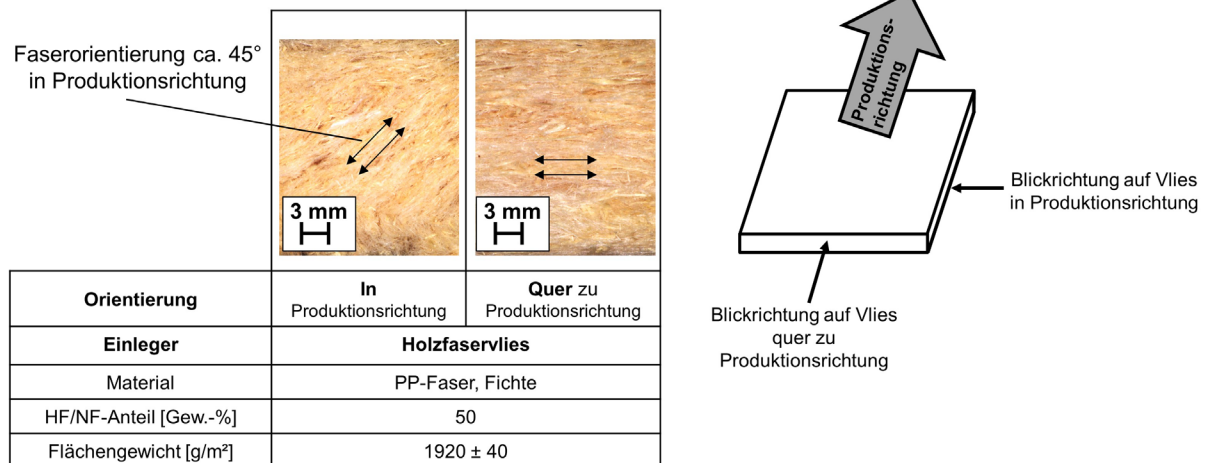


**Abbildung 64** Wickelstation für das Holzfaservlies nach der Doppelbandheizung im Technikum der Autefa Solutions Austria GmbH in Linz

Grundsätzlich ist festzustellen, dass Holzfasern und PP-Fasern über den Airlay-Prozess und der verwendeten Anlagenkonfiguration zu einem Vlies gelegt werden können. Die Vliese können als Rollenware gelagert und transportiert werden. Somit wäre eine Produktion im industriellen Maßstab möglich.

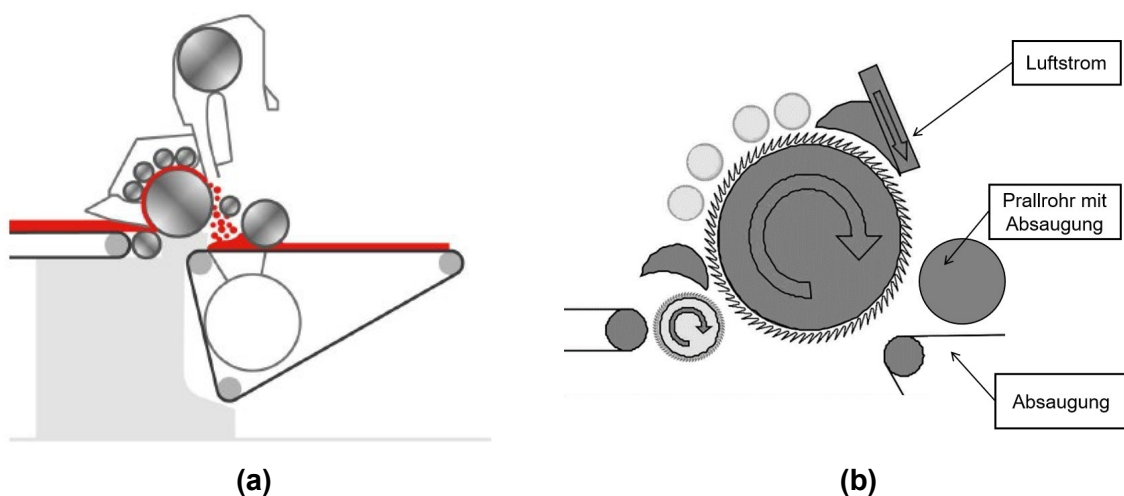
Abbildung 65 zeigt die unkonsolidierten Vliese in Produktionsrichtung und quer zur Produktionsrichtung. Durch die Wirrvlieskarde (siehe 5.3 Vlieslegung) orientieren sich die Fasern in einem Winkel von ca. 45° zur Produktionsrichtung (siehe Abbildung 65, Holzfaservlies, in Produktionsrichtung). Quer zur Produktionsrichtung sind die Fasern parallel und ohne abweichenden Winkel orientiert (siehe Abbildung 65, Holzfaservlies, quer zu Produktionsrichtung). Wie in Abschnitt 6.3.2 Zugprüfung und Abschnitt 6.3.3 Schlagzähigkeitsprüfung gezeigt wird, hat dies auch einen Einfluss auf die Mechanik.





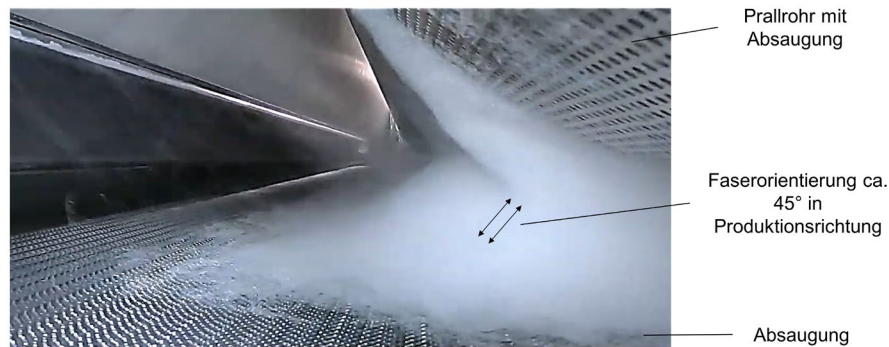
**Abbildung 65** Aufnahmen von unkonsolidierten Vliesen, Holzfaservlies über Airlay-Anlage, Faserorientierung in Produktionsrichtung

Die Faserorientierung in einem Winkel von ca. 45° zur Produktionsrichtung beim Holzfaservlies (siehe Abbildung 65, Holzfaservlies, in Produktionsrichtung) resultiert aus der Anlagenkonfiguration mit Wirrvlieskarde. Nachfolgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau der Wirrvlieskarde (aerodynamische Einheit K12, siehe 5.3 Vlieslegung).



**Abbildung 66** Schematische Darstellung der Wirrvlieskarde, (a) Übersichtliche Darstellung der Einheit (siehe 5.3 Vlieslegung), (b) Detaildarstellung der Wirrvlieskarde [133]

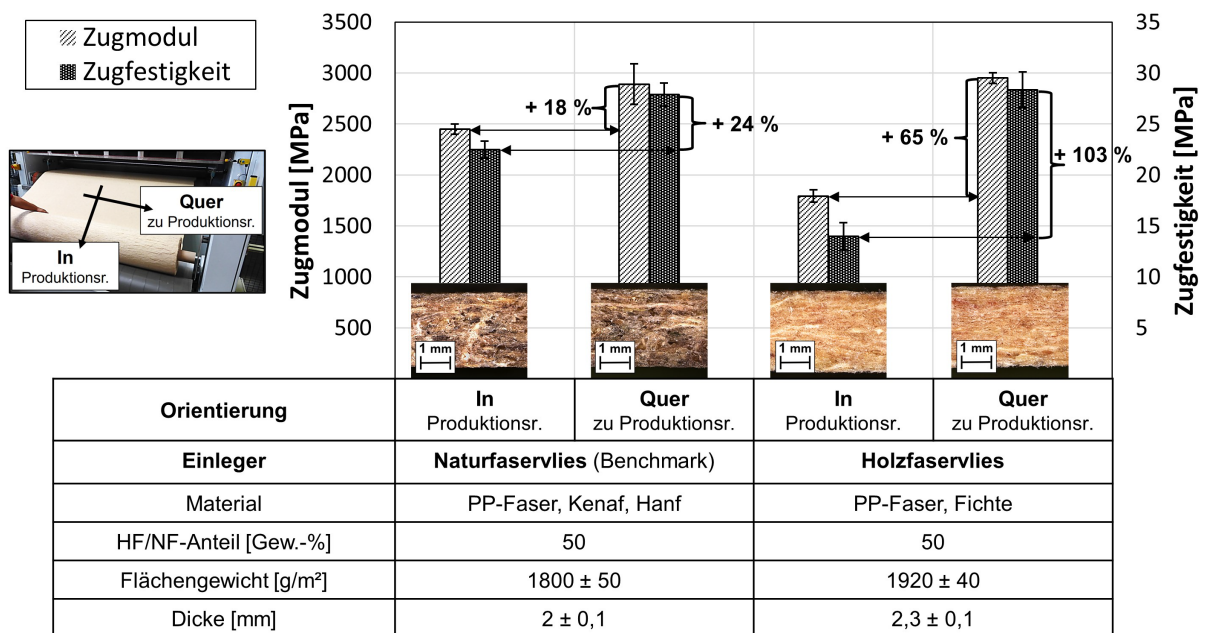
Nachfolgende Abbildung 67 zeigt den Vlieslegeprozess in der Wirrvlieskarde (aerodynamische Einheit K12, siehe 5.3 Vlieslegung) mit einer synthetischen Faser [141]. Die Faserorientierung während der Vliesbildung wird schematisch dargestellt. Diese Faserorientierung resultiert aus diesem Anlagenaufbau (siehe Abbildung 66). Somit erklärt sich die unterschiedliche Faserorientierung in und quer zur Produktionsrichtung der Holzfaservliese in Abbildung 65.



**Abbildung 67** Wirrvlieskarde K12 mit synthetischen Fasern [141], Vliesbildung und schematische Darstellung der Faserorientierung [133,141]

### 6.3.2 Zugprüfung

Die Halbzeuge (siehe 6.3.1 Vlieslegung) wurden mittels einer beheizten und einer gekühlten Presse auf eine Dicke von ca. 2 mm vorkonsolidiert (siehe 5.4 Hybridverbunde). Abbildung 68 zeigt die Werte der Zugprüfung nach ISO 527-4/2 für das Benchmark-Naturfaservlies und das Holzfaservlies mit Fichtefasern.



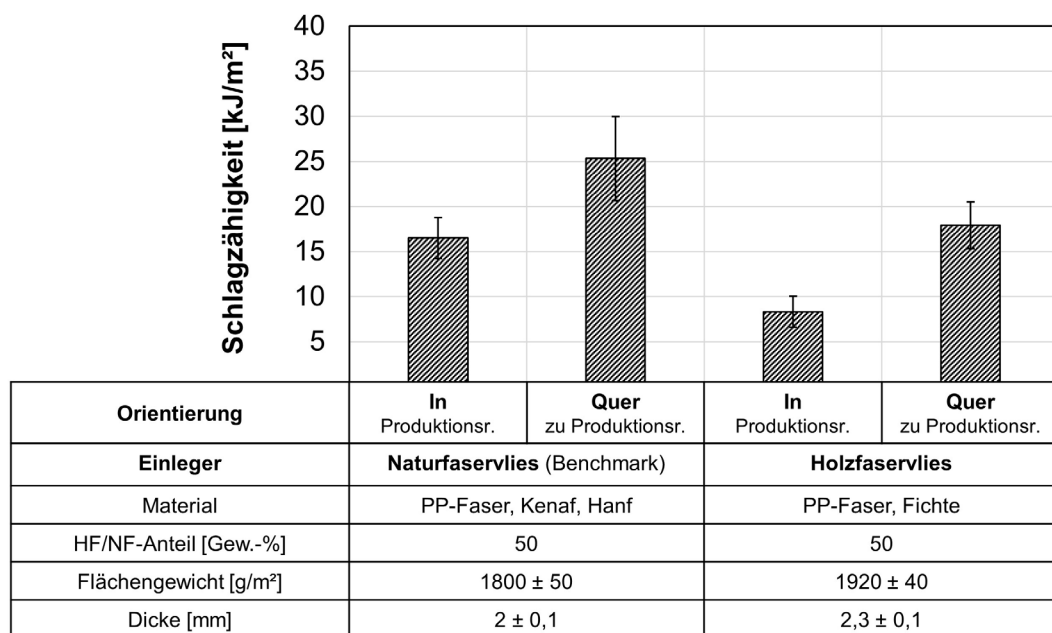
**Abbildung 68** Naturfaservlies (Benchmark) und Holzfaservlies, Prüfkörper in und quer zu Produktionsrichtung, Zugprüfung nach ISO 527-4/2

Die Proben wurden in Produktionsrichtung und quer zur Produktionsrichtung aus dem Vlies entnommen. Die Werte quer zur Produktionsrichtung für Steifigkeit und Festigkeit des Naturfaservlieses sind im Rahmen der Standardabweichung vergleichbar mit denen des Holzfaservlieses. Bei Proben, die in Produktionsrichtung entnommen wurden, zeigen sich starke Unterschiede. Die

Werte weichen beim Holzfaserwvlies in Abhängigkeit von der Produktionsrichtung wesentlich höher voneinander ab als beim Naturfaservlies. Die starke Abweichung in Abhängigkeit von der Produktionsrichtung ergibt sich durch die Faserorientierung im Holzfaserwvlies (siehe Abbildung 65).

### 6.3.3 Schlagzähigkeitsprüfung

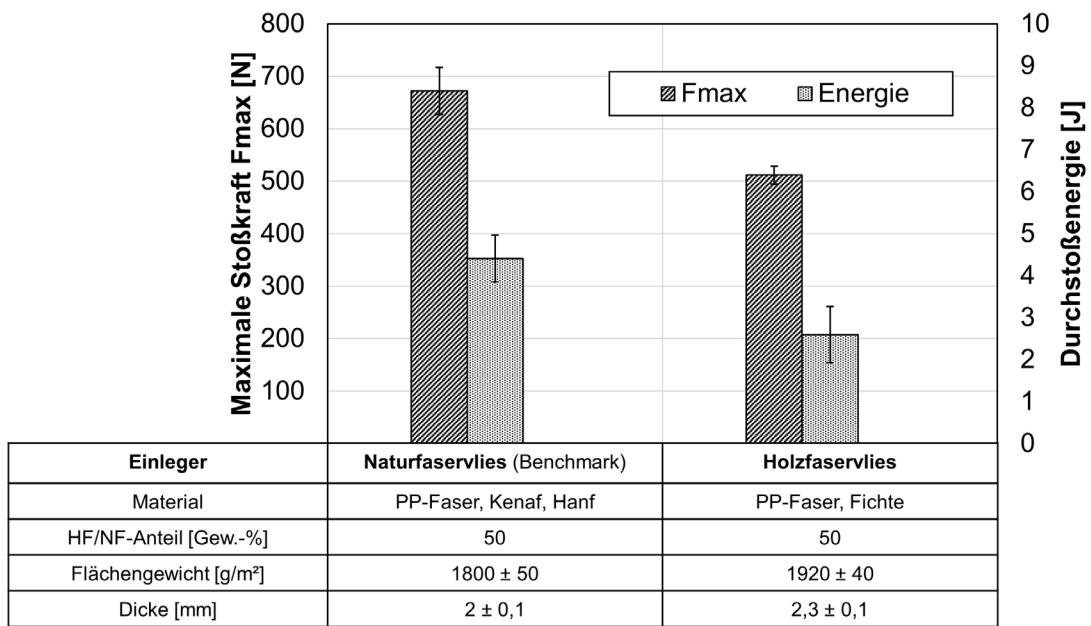
Die Schlagzähigkeit der konsolidierten Naturfaservliese und Holzfaserwvliese (siehe 6.3.2) wurde nach ISO 179-2/1eU (edgewise, ungekerbt) untersucht (siehe Abbildung 69). Wie auch bei der Zugprüfung zeigen die Vliese quer zur Produktionsrichtung deutlich höhere Werte als in Produktionsrichtung.



**Abbildung 69** Naturfaservlies (Benchmark) und Holzfaserwvlies, Prüfkörper in und quer zu Produktionsrichtung, Schlagzähigkeitsprüfung nach ISO 179-2/1eU (edgewise, ungekerbt), Lagerabstand 62 mm

Des Weiteren liegen die Werte des Holzfaserwvlieses hinter dem Naturfaservlies zurück. Bei den grundsätzlich sehr hohen Werten im Vergleich zu spritzgegossenen Proben (siehe 6.2.2 Schlagzähigkeitsprüfung) gilt es zu beachten, dass die Proben ungekerbt waren. Die starke Abweichung in Abhängigkeit von der Produktionsrichtung ergibt sich durch die Faserorientierung im Holzfaserwvlies (siehe Abbildung 65).

Die Vliese wurden außerdem über ein Durchstoßversuch nach ISO 6603-2 untersucht. Bei der dreidimensionalen Prüfung wird sowohl in als auch quer zur Produktionsrichtung geprüft. Der Einfluss der Produktionsrichtungen wird folglich miteinbezogen. Auch hier zeigt das Naturfaservlies deutlich bessere Werte.



**Abbildung 70** Instrumentierter Durchstoßversuch nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4,  $v = 4,4$  m/s,  $m = 9,378$  kg,  $h = 1$  m, mit Schmierung,  $n = 3 \pm SD$

### 6.3.4 Zusammenfassung

Das Airlay-Verfahren ist grundsätzlich geeignet, um die verwendeten Holzfasern mit PP-Fasern zu einem Vlies zu legen. Durch die thermische Bindung über den Doppelbandofen können die Vliese als Rollenware transportiert werden. Die mechanischen Eigenschaften liegen hinter dem vernadelten Naturfaservlies als Benchmark zurück. Die Werte sind jedoch grundsätzlich im selben Bereich. Die Abweichung in und quer zur Produktionsrichtung des Holzfaservlieses entsteht durch die gewählte Anlagenkonfiguration mit aerodynamischer Einheit K12. Die Fasern orientieren sich in Produktionsrichtung in einem abweichenden Winkel (siehe Abbildung 65). Die abweichende Orientierung hat einen negativen Effekt auf die mechanischen Eigenschaften. Dies zeigt sich sowohl bei der Zugprüfung als auch bei der Schlagzähigkeitsprüfung.

Die erfolgreiche Entwicklung thermoplastischer Vliese mit Fichtefasern in diesem Abschnitt ist Grundlage für die weiteren Untersuchungen in Abschnitt 6.4 (siehe 6.4 Hybridverbunde, Untersuchungen zur Verbundhaftung) und Abschnitt 6.5 (siehe 6.5 Hybridverbunde, Untersuchungen an einem praxisnahen Bauteil).

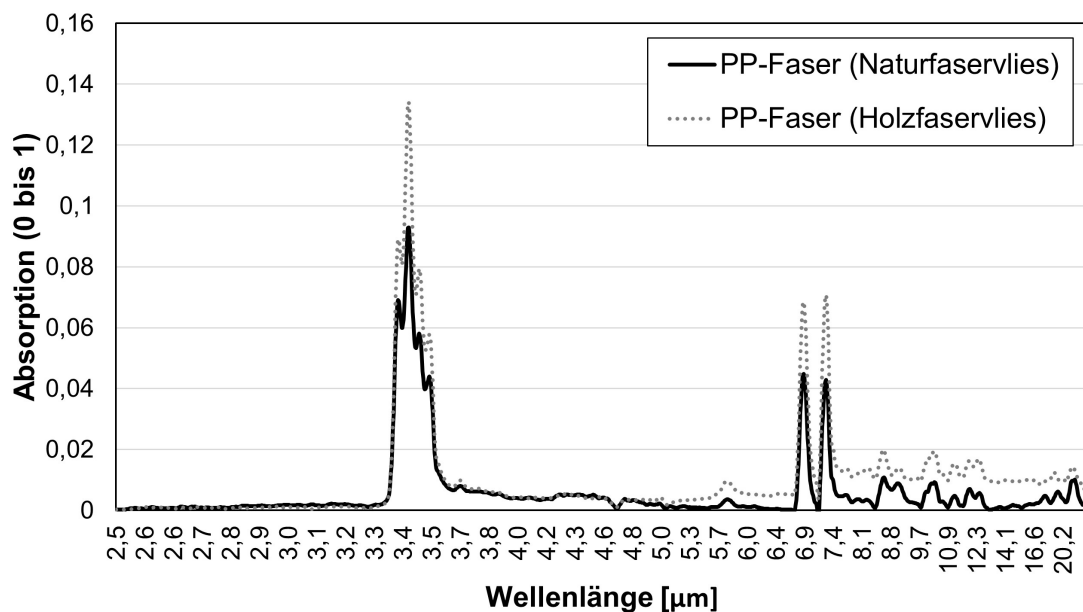
Im Ausblick (siehe Abschnitt 7.3 Ausblick) wird eine alternative Anlagenkonfiguration mit Vernadelung der Vliese besprochen. Erste Vorversuche weisen darauf hin, dass durch die Vernadelung die hohe Abweichung in Abhängigkeit von der Produktionsrichtung deutlich reduziert werden kann (7.3.2 Vlieslegung mit Vernadelung).

## 6.4 Hybridverbunde, Untersuchungen zur Verbundhaftung

### 6.4.1 Grundlegende Prozess- und Parameterstudien

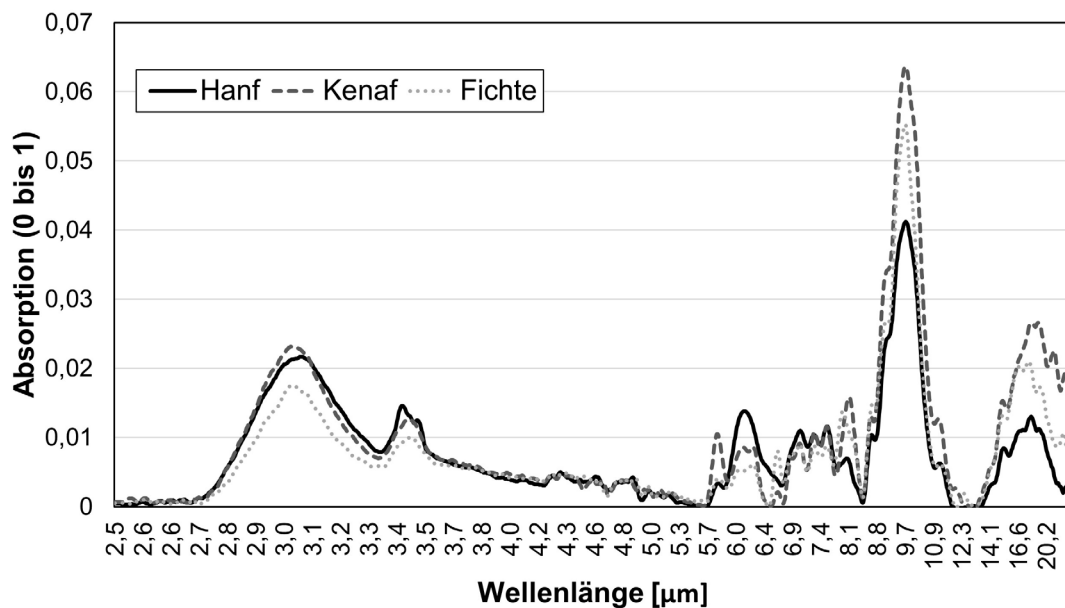
#### 6.4.1.1 Grundlegende Studie zum Aufheizen von Vliesen mittels Infrarotofen

Ein Teil der nachfolgenden Ergebnisse im Abschnitt 6.4 wurde bereits in einer Veröffentlichung im Rahmen des Promotionsvorhabens diskutiert [15]. Das Aufheizen der Vliese wird durch einen Infrarotofen erreicht (siehe 5.4.1). In Abschnitt 6.4.2 (siehe 6.4.2 Einfluss der Kerntemperatur der Vliese auf die Verbundhaftung) wird untersucht, ob eine Erhöhung der Kerntemperatur der Vliese durch einen Infrarotofen direkt vor dem Anspritzen einen Einfluss auf die Verbundhaftung hat. Aufnahmen mittels IR-Spektroskopie zeigen, dass die Absorptionsspektren der PP-Fasern des Naturfaser-Benchmarks nahezu identisch mit den PP-Fasern des Holzfaservlieses sind (siehe Abbildung 71). Es wurden jeweils drei Proben gemessen. Da die Streuung der einzelnen Proben als gering zu bewerten ist, wird in den nachfolgenden Diagrammen jeweils nur eine Kurve pro Material gezeigt.



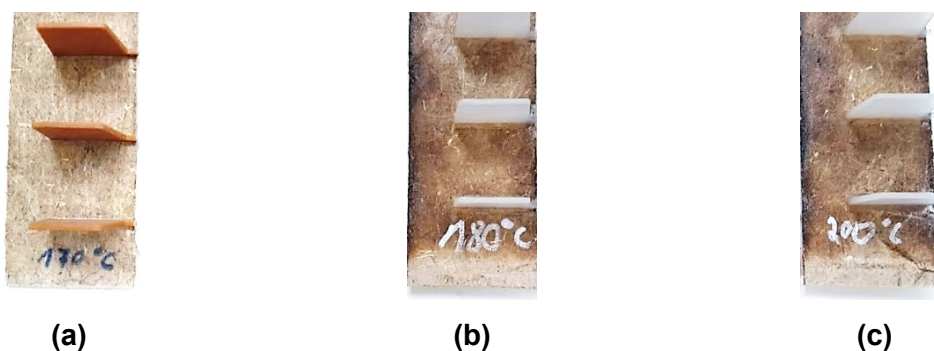
**Abbildung 71** Infrarotspektroskopie (FT-IR, ATR) der PP-Faser aus dem Naturfaservlies (Benchmark) und der PP-Faser aus den Vlieslegeversuchen mit Holzfasern

Des Weiteren sind die Absorptionsspektren der Naturfasern des Benchmark-Vlieses (Hanf, Kenaf) nahezu identisch mit der Holzfaser (Fichte). Dzalto et al. konnten bereits zeigen, dass das Benchmark-Naturfaservlies prozesssicher über Infrarotstrahler zu erwärmen ist [103, 142].



**Abbildung 72** Infrarotspektroskopie (FT-IR, ATR) von Hanf und Kenaf aus dem Naturfaservlies (Benchmark) und von Fichte aus den Vlieslegeversuchen mit Holzfasern

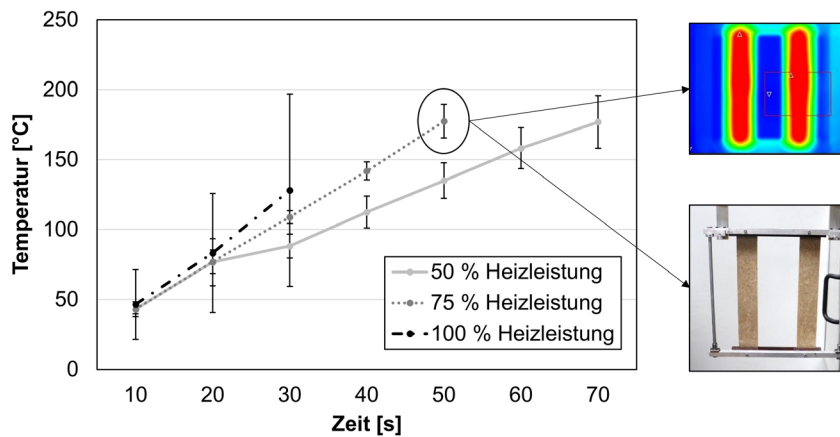
Bei Aufheizversuchen mit dem Infrarotofen wurde die Kerntemperatur mittig im Vlies über ein Thermoelement bestimmt. Als maximale prozesssichere Kerntemperatur konnten 170 °C ermittelt werden. Ab einer Temperatur von 180 °C treten an der Oberfläche des Naturfaservlieses starke Verfärbungen auf (siehe Abbildung 73). Zudem können bei hohen Temperaturen Prozessstörungen auftreten. Die zunehmende thermische Belastung des Vlieses erschwert das Handling. Teilweise rutschte das Vlies aus dem Rahmen. Bei einer Kerntemperatur von 170 °C sind nur leichte optische Veränderungen zu erkennen und das Handling ist prozesssicher möglich.



**Abbildung 73** Benchmark Naturfaservlies, Unterschiedliche Kerntemperaturen über Infrarotofen, (a) Kerntemperatur 170 °C, (b) Kerntemperatur 180 °C, (c) Kerntemperatur 200 °C

Bei Aufheizversuchen mit dem Infrarotofen konnte eine Heizleistung von 75 % als Optimum ermittelt werden (siehe Abbildung 74). Eine Heizleistung von 100 % führte zu stark verkohlten Stellen und zu brennenden Einlegern, weshalb die Aufheizversuche nach 30 Sekunden abgebrochen

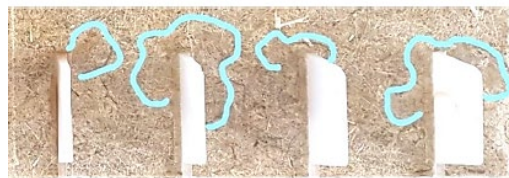
werden mussten. Bei einer Heizleistung von 75 % konnten die Einleger prozesssicher erwärmt werden. Zudem war die Aufheizzeit auf eine Kerntemperatur von 170 °C bei einer Heizleistung von 75 % deutlich niedriger als bei 50 %. Für die weiteren Versuche wird eine Heizleistung von 75 % und eine Kerntemperatur von 170 °C verwendet.



**Abbildung 74** Benchmark-Naturfaservlies, resultierende Kerntemperatur bei unterschiedlicher Heizleistung über Infrarotofen, Infrarotaufnahme und Fotografie der für die weiteren Versuche verwendeten Kerntemperatur von 170°C bei 75 % Heizleistung

#### 6.4.1.2 Material und Verarbeitungsparameter

Bei Vorversuchen zu Material und Verarbeitungsparametern wurden diverse grundsätzliche Zusammenhänge festgestellt. Wenn als Anspritzmaterial reines PP verwendet wird, ist unkontrolliertes Überspritzen aufgrund der niedrigen Viskosität die Folge (siehe Abbildung 75). Durch Anpassung der Prozessparameter kann dieses Problem nur bedingt behoben werden, da Spritzdruck und Nachdruck zu weit reduziert werden müssten, um prozesssicher Teile produzieren zu können. Ab einem Holzanteil von 20 Gew.-% ist die Viskosität des Anspritzmaterials ausreichend reduziert. Überspritzen kann prozesssicher vermieden werden. Der MFR des reinen PP liegt bei  $(24,7 \pm 1,6)$  g/10 min und der MFR des PP mit 20 Gew.-% Holzanteil liegt bei  $(12,4 \pm 1,0)$  g/10 min (siehe Tabelle 8).



**Abbildung 75** Naturfaservlies mit angespritzten Rippen aus reinem PP ohne Holzanteil, die hellblauen Linien markieren starkes und unkontrolliertes Überspritzen im Einleger

Das Anspritzen mit unverstärktem PP hat eine starke Spannungsbildung im Probekörper zur Folge. Abbildung 76 zeigt den Verzug bei einem bei Raumtemperatur mit unverstärktem PP angespritzten Einleger. Eine Erhöhung der Einlegertemperatur verstärkt den Verzug zusätzlich. Die Anspritzgeometrie wurde mit einem Werkzeugeinsatz in derselben Stammform realisiert. Bei einem Holzfaserteil von 20 Gew.-% lässt sich die unterschiedliche Schwindung in diesem Prozess ausreichend angleichen. Eine allgemeiner Zusammenhang ist nicht abzuleiten, da die unterschiedliche Schwindung von vielen weiteren Faktoren abhängt (u. a. Masstemperatur des Anspritzmaterials, Geometrie der angespritzten Struktur, Temperatur der Vliese, Dichte der Vliese, Werkzeugtemperatur).



**Abbildung 76** Vorversuch zur unterschiedlichen Schwindung von Naturfaservliesen, **(a)** angespritzt mit reinem PP, **(b)** angespritzt mit PP und 20 Gew.-% Holzanteil

Bei einem Holzfaserteil von 20 Gew.-% wurde der maximale Spritzdruck und Nachdruck ermittelt, mit dem Überspritzen und Rippenabzeichnungen auf der Sichtseite prozesssicher vermieden werden können. Überspritzen ist möglichst zu vermeiden, da es bei einer Anwendung am Bauteil (z. B. Automobilinterieur) zu Problemen (Optik nach dem Kaschieren, ‚Squeak and Rattle‘) führen kann. Demnach konnten folgende Verarbeitungsparameter für nachfolgende Versuche festgelegt werden:

**Tabelle 14** Verarbeitungsparameter für die Untersuchungen zur Verbundhaftung

Parameter	Wert
Holzfaserteil [Gew.-%]	20
Drehzahl Extruder [1/min]	250
Massedurchsatz [kg/h]	5
Staudruck Extruder [bar]	100
Verarbeitungstemperatur [°C]	170
Spritzdruck [bar]	500
Einspritzgeschwindigkeit [mm/s]	10
Umschaltpunktgesteuerter Nachdruck [mm]	10
Einstufiger Nachdruck [bar]	300
Heißkanal [°C]	170
Werkzeugtemperatur [°C]	40



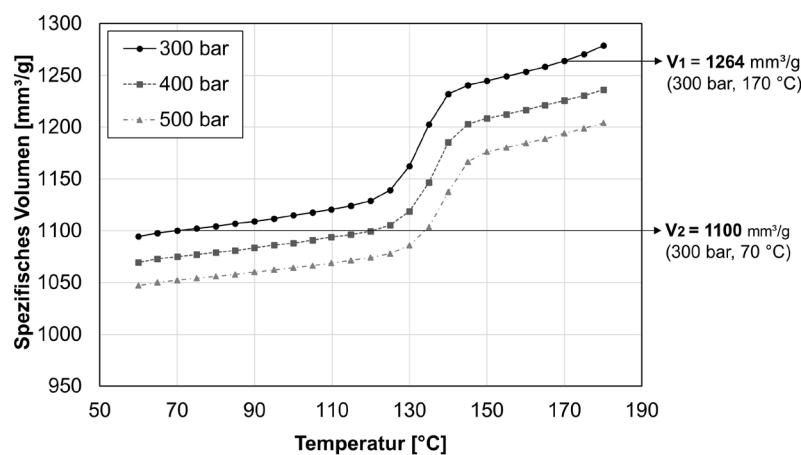
### 6.4.1.3 Rippenabzeichnungen

Bei Rippen mit 20 Gew.-% Holzanteil können Einfallstellen auf der Sichtseite im Vergleich zu reinem PP deutlich reduziert werden. Nachfolgende Abbildung zeigt Naturfaservliese mit Rippen, die mit einer Hochglanzfolie vakuumkaschiert wurden. Abbildung 77a zeigt eine Einfallstelle auf der Sichtseite, bei der die Rippe mit reinem PP angespritzt wurde. Abbildung 77b zeigt einen Prüfkörper, bei dem die Rippen mit PP und 20 Gew.-% Holzanteil angespritzt wurden. Es sind keine Einfallstellen zu erkennen.



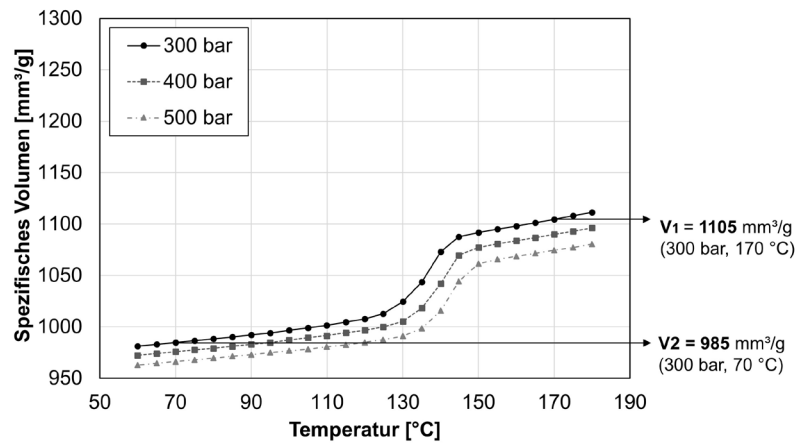
**Abbildung 77** Naturfaservliese mit angespritzten Rippen, anschließend mit einer Hochglanzfolie vakuumkaschiert, **(a)** Naturfaservlies angespritzt mit reinem PP, **(b)** Naturfaservlies angespritzt mit PP mit 20 Gew.-% Holzanteil

Eine PVT-Messung mit beiden Materialien zeigt, dass PP mit 20 Gew.-% Holz eine deutlich geringere Schwindung aufweist. Durch die geringe Schwindung erklären sich die reduzierten Einfallstellen auf der Sichtseite. Nachfolgende Abbildungen zeigen PVT-Messungen von 180 °C bis 60 °C bei drei Druckstufen (300, 400 und 500 bar). 300 bar entspricht dem gewählten Nachdruck und 170 °C der Verarbeitungstemperatur (siehe Tabelle 14).



**Abbildung 78** PVT-Messung von reinem PP, isobar (300, 400 und 500 bar) von 180 °C bis 60 °C

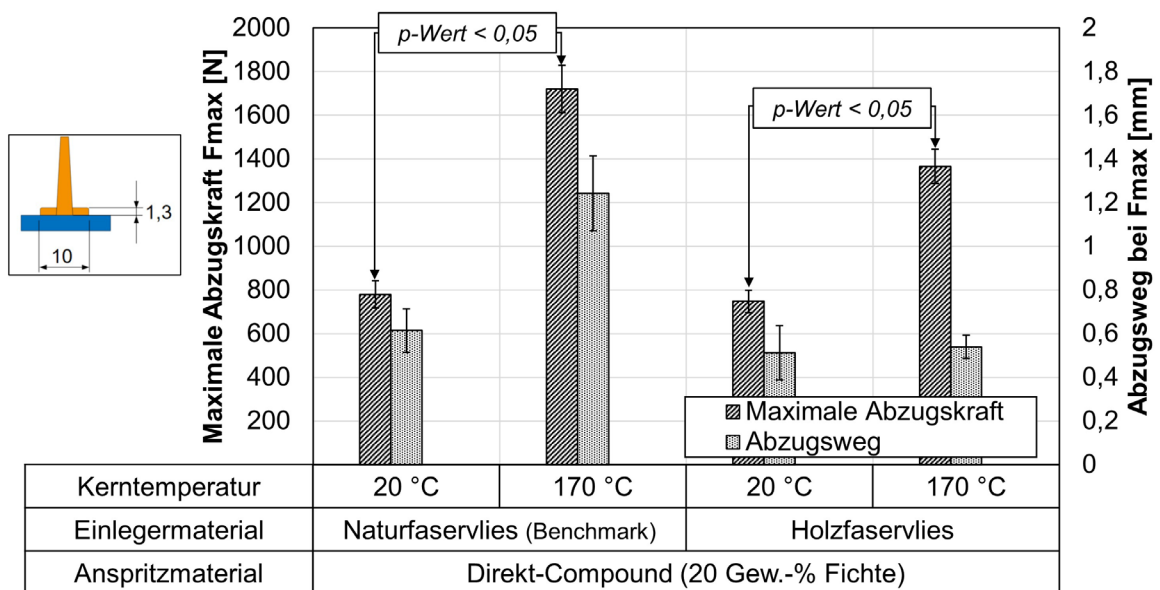
Es zeigt sich, dass PP bei 300 bar und einem Abkühlen von 170 °C auf 60 °C eine deutlich höhere Schwindung aufweist (siehe Abbildung 78) als PP mit 20 Gew.-% Holz bei gleichen Messbedingungen (siehe Abbildung 79).



**Abbildung 79** PVT-Messung von PP mit 20 Gew.-% Holz, isobar (300, 400 und 500 bar) von 180 °C bis 60 °C

### 6.4.2 Einfluss der Kerntemperatur der Vliese auf die Verbundhaftung

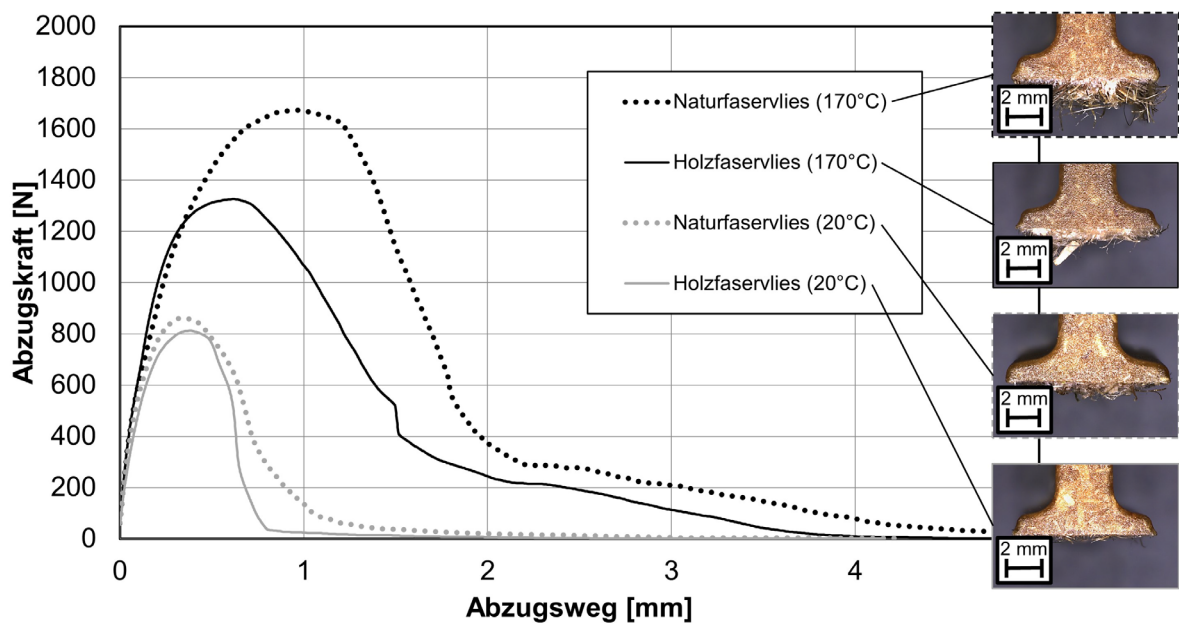
Die Vliese wurden entweder bei Raumtemperatur (20 °C) oder bei einer Kerntemperatur von 170 °C in das Spritzgusswerkzeug eingelegt. Die Erwärmung der Vliese wurde mit einem Infrarotofen durchgeführt (siehe Abschnitt 5.4.1). Abbildung 80 zeigt den Effekt der beiden Kerntemperaturen auf die Verbundhaftung.



**Abbildung 80** Kopf-Zug-Versuch von Rippen mit Fuß bei zwei verschiedenen Kerntemperaturen der Vliese, Anspritzmaterial Direkt-Compound mit 20 Gew.-% Fichte, n = 7 ± SD, p-Wert mit einfaktorieller ANOVA bei  $\alpha = 0,05$

Es zeigt sich, dass durch die Erhöhung der Kerntemperatur der Vliese von 20 °C auf 170 °C vor dem Hinterspritzen die maximale Abzugskraft deutlich gesteigert werden kann. Dies gilt sowohl für Halbzeuge mit Naturfasern als auch für solche mit Holzfasern. Die maximale Abzugskraft für Holzfaservliese liegt mit 170 °C etwas hinter dem Vergleichswert mit Naturfaser zurück. Die Werte liegen allerdings in einem ähnlichen Bereich. Im nicht aufgeheizten Zustand gibt es keinen signifikanten Unterschied.

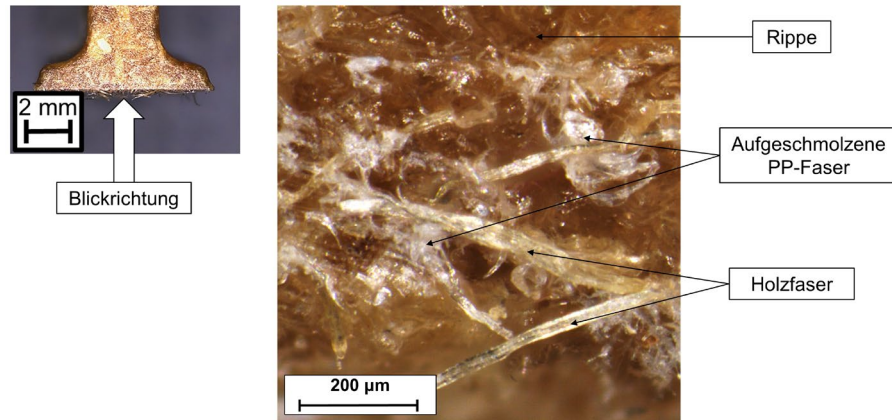
Bei den nicht aufgeheizten Halbzeugen kommt es an der Grenzfläche zwischen Rippe und Vlies zu einem Adhäsionsbruch. Auf den mikroskopischen Bildern in Abbildung 81 sind nach dem Abziehen bei den nicht aufgeheizten Vliesen fast keine Fasern auf den Rippen zu erkennen. Bei beheizten Vliesstoffen kommt es zu einem kohäsiven Versagen innerhalb des Vliesstoffs, wodurch die maximale Abzugskraft deutlich erhöht wird. Nach dem Abzug der erhitzten Vliese sind in beiden Fällen viele Fasern auf den Rippen zu sehen (Abbildung 81). Bei den Halbzeugen mit Naturfasern führt die erhöhte Kerntemperatur bei der Verarbeitung ebenfalls zu einer Veränderung des Abzugswegs (Abbildung 80 und Abbildung 81). Das Bruchverhalten der beim Anspritzen aufgeheizten Vliese wird durch das Halbzeug und nicht durch die Grenzfläche von Rippe zu Vlies bestimmt. Bei den Holzfaservliesen führt dies nicht zu einer Veränderung des Abzugswegs.



**Abbildung 81** Kopf-Zug-Versuch von Rippen mit Fuß bei zwei unterschiedlichen Vlieskern-temperaturen, beispielhafter Kurvenverlauf des Kraft-Weg-Diagramms und mikroskopische Aufnahmen nach dem Abzug

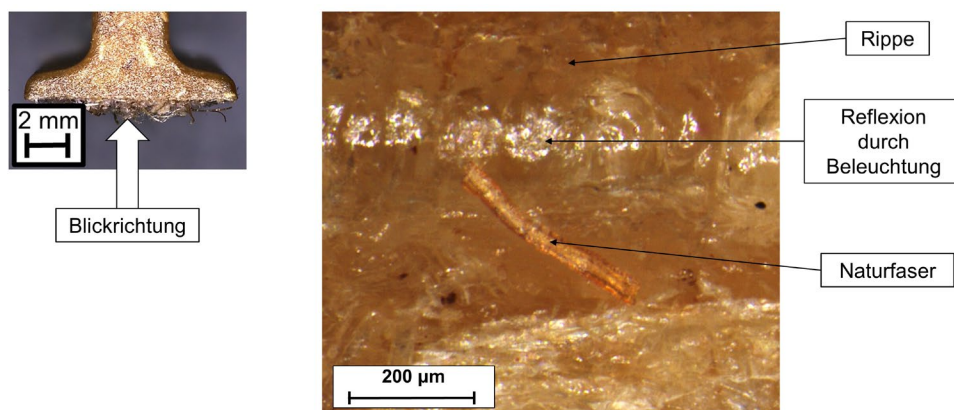
Mikroskopische Aufnahmen mit höherer Vergrößerung und anderem Blickwinkel als in Abbildung 81 bestätigen die Aussagen zum Bruchverhalten. Abbildung 82 zeigt ein Holzfaservlies, das

bei Raumtemperatur angespritzt wurde. Nach dem Kopf-Zug-Versuch ist in der Bruchfläche deutlich die Rippe zu erkennen. Auf der Bruchfläche bzw. der Rippe sind vereinzelt aufgeschmolzene PP-Fasern und aus dem Vlies herausgezogene Holzfasern zu erkennen.



**Abbildung 82** Bruchbild von Rippe mit Fuß, Holzfaservlies angespritzt bei Raumtemperatur, Mikroskopie, Aufsicht

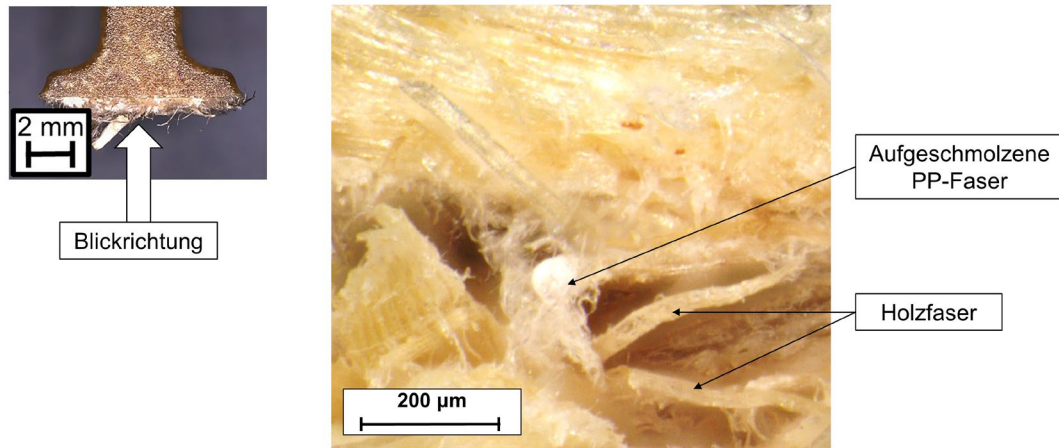
Abbildung 83 zeigt ein Naturfaservlies, das bei Raumtemperatur angespritzt wurde. Nach dem Kopf-Zug-Versuch ist in der Bruchfläche deutlich die Rippe zu erkennen. Auch hier sind vereinzelt aus dem Vlies herausgezogene Naturfasern zu erkennen. In Abbildung 83 handelt es sich um einen nahezu reinen Adhäsionsbruch zwischen Rippe und Vlies. Abbildung 82 zeigt hingegen eine Mischung aus Adhäsionsbruch und Kohäsionsbruch. In beiden Fällen, also sowohl beim Holzfaservlies als auch beim Naturfaservlies, lassen sich Proben mit reinem Adhäsionsbruch wie auch Proben mit Mischbruch finden. Dies variiert auch stark innerhalb einer Rippe. Wie in Abbildung 80 zu sehen ist, ist die Standardabweichung in beiden Fällen als gering zu bewerten.



**Abbildung 83** Bruchbild von Rippe mit Fuß, Naturfaservlies angespritzt bei Raumtemperatur, Mikroskopie, Aufsicht

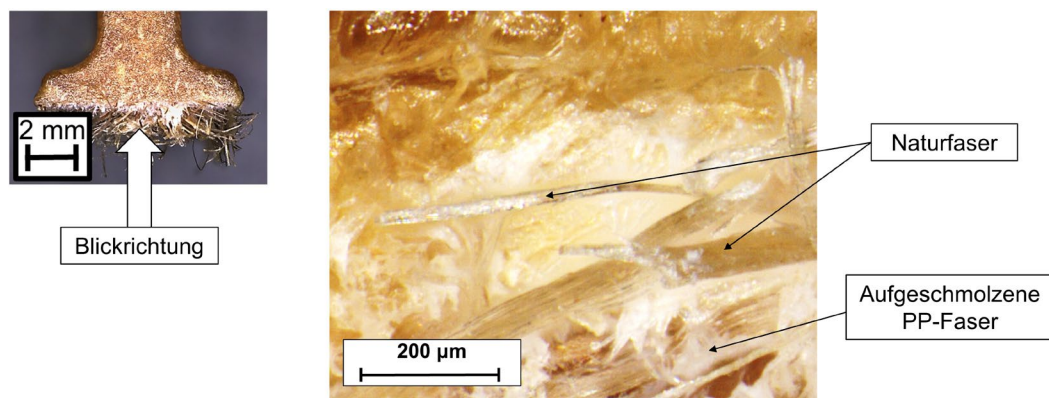
Abbildung 84 zeigt ein Holzfaservlies, das bei einer Kerntemperatur von 170 °C angespritzt wurde. Nach dem Kopf-Zug-Versuch ist in der Bruchfläche nur das Vlies zu erkennen. In der

Bruchfläche des Vlieses lassen sich sowohl aufgeschmolzene PP-Fasern als auch Holzfasern erkennen. Es handelt sich um einen reinen Kohäsionsbruch.



**Abbildung 84** Bruchbild von Rippe mit Fuß, Holzfaservlies angespritzt bei einer Kerntemperatur von 170 °C, Mikroskopie, Auflicht

Abbildung 85 zeigt ein Naturfaservlies, das bei einer Kerntemperatur von 170 °C angespritzt wurde. Wie in Abbildung 84 ist nach dem Kopf-Zug-Versuch in der Bruchfläche nur das Vlies zu erkennen. In der Bruchfläche des Vlieses lassen sich sowohl aufgeschmolzene PP-Fasern als auch Naturfasern erkennen. Es handelt sich um einen reinen Kohäsionsbruch.

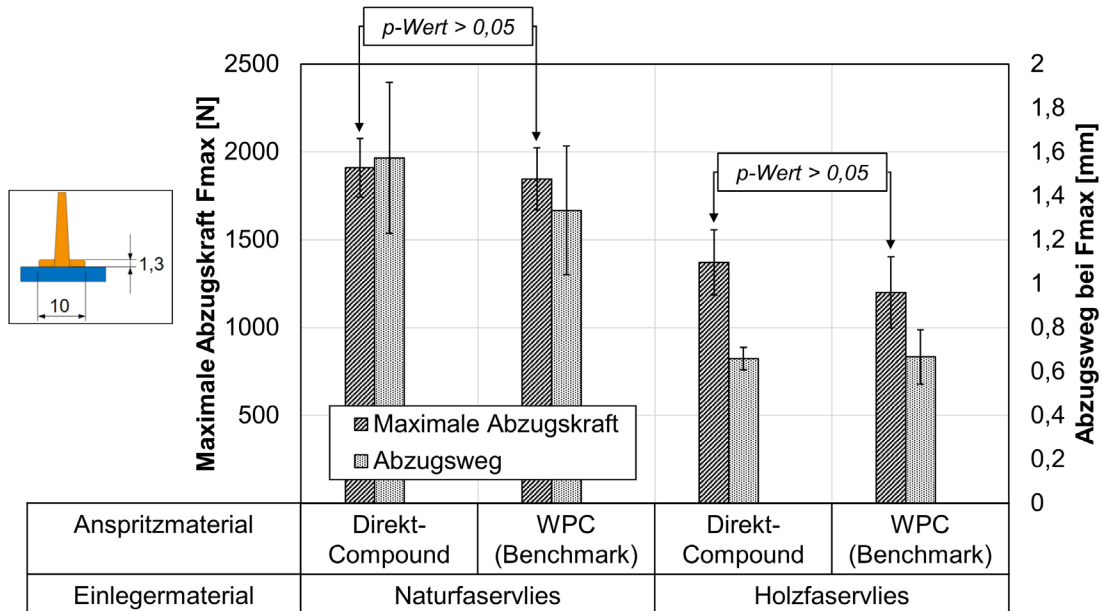


**Abbildung 85** Bruchbild von Rippe mit Fuß, Naturfaservlies angespritzt bei einer Kerntemperatur von 170 °C, Mikroskopie, Auflicht

#### 6.4.3 Einfluss des Anspritzmaterials auf die Verbundhaftung

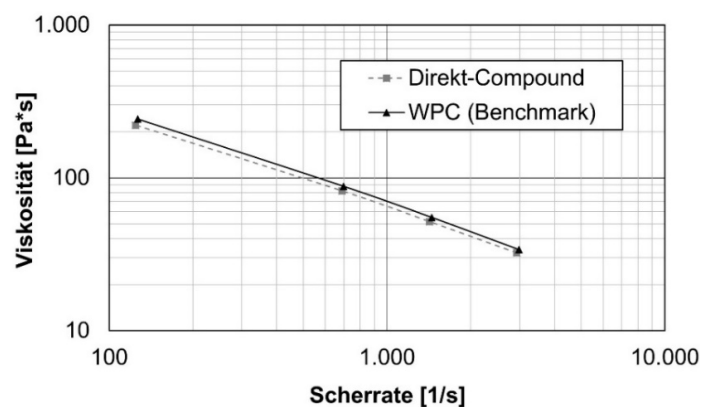
Das folgende Diagramm (Abbildung 86) zeigt den Einfluss von zwei unterschiedlichen Anspritzmaterialien (Direkt-Compound und WPC) auf die Verbundhaftung. Bei den gleichen Halbzeugen haben die unterschiedlichen Anspritzmaterialien keinen signifikanten Einfluss auf die maximale Abzugskraft. Dies ist zu erwarten, da die Schmelzviskosität beider Materialien (Abbildung 87) über den gesamten Schergeschwindigkeitsbereich ähnlich ist. Dennoch ist der Vergleich relevant,

da in Abschnitt 6.5 (siehe 6.5 Hybridverbunde, Untersuchungen an einem praxisnahen Bauteil) aus technischen Gründen nur das WPC verwendet werden kann.



**Abbildung 86** Kopf-Zug-Versuch von Rippen mit Fuß und zwei Anspritzmaterialien, Kerntemperatur der Vliese bei 170 °C vor dem Einlegen in die Form,  $n = 7 \pm SD$ ,  $p$ -Wert mit einfaktorieller ANOVA bei  $\alpha = 0,05$

In Abbildung 86 zeigt sich in allen Fällen ein kohäsives Versagen innerhalb der Vliese. Bei beiden Anspritzmaterialien liegen die mechanischen Werte von Holzfaservliesen leicht hinter dem Naturfaser-Benchmark zurück. Abbildung 87 zeigt die Messung der Schmelzviskosität der beiden verwendeten Anspritzmaterialien.

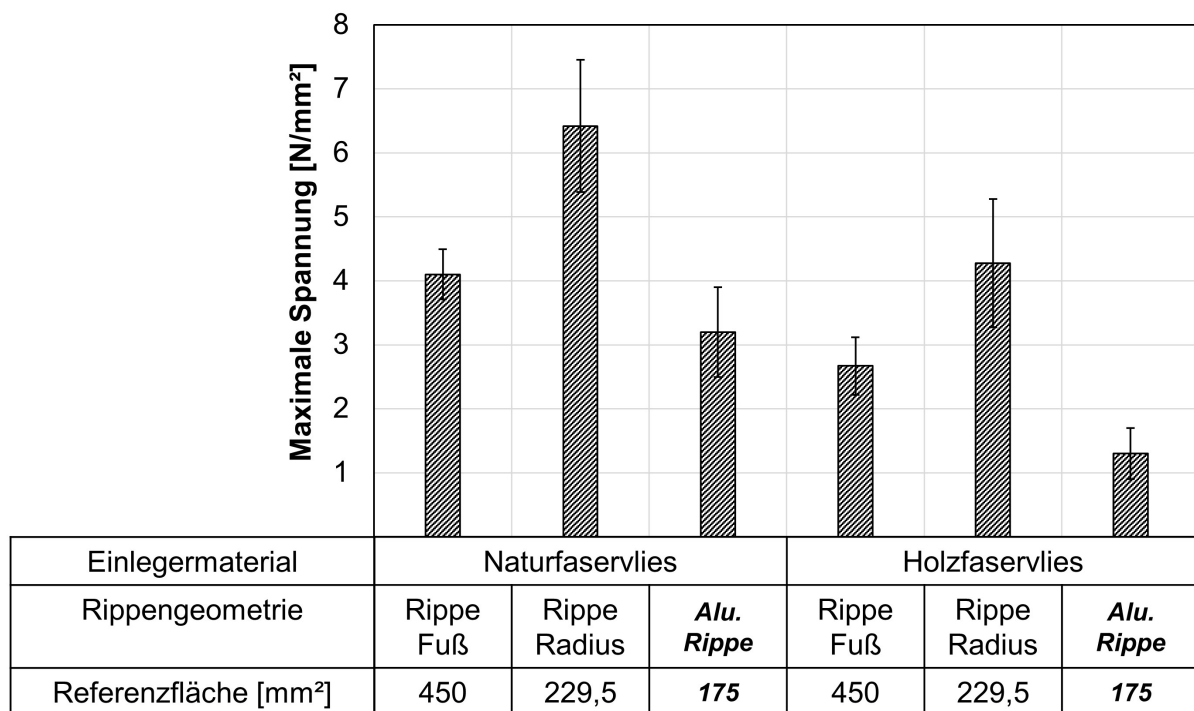


**Abbildung 87** Schmelzviskosität der beiden Spritzgussmaterialien nach ISO 11443 bei 200 °C, bei beiden Materialien wurden gespritzte Proben zerschnitten, drei Stunden lang bei 80 °C im Umluftofen getrocknet und dann gemessen

Der MFR-Wert des Direkt-Compounds liegt bei  $(12 \pm 1)$  g/10 min und der des WPC bei  $(20 \pm 1)$  g/10 min (Tabelle 3). Trotz der unterschiedlichen MFR-Werte zeigt die Viskositätsmessung mit einem Hochdruckkapillarrheometer, dass die Viskositäten im für den Spritzgussprozess relevanten Scherratenbereich nahezu identisch sind (Abbildung 87). Folglich gibt es bei den gleichen Halbzeugen keinen signifikanten Unterschied der Anspritzmaterialien bezogen auf die maximale Abzugskraft. Die Versuche in 6.5 (siehe 6.5 Hybridverbunde, Untersuchungen an einem praxisnahen Bauteil) wurden im Technikum der FRIMO Sontra GmbH auf einer Standardspritzgussmaschine durchgeführt. Folglich wurde nur das WPC verwendet.

#### 6.4.4 Einfluss der Rippengeometrie auf die Verbundhaftung

Zum Vergleich der beiden Rippengeometrien (siehe 5.4.1) wird in Abbildung 88 nicht die maximale Kraft, sondern die maximale Spannung dargestellt. Beide Rippengeometrien wurden mit einer geklebten Aluminiumrippe verglichen. Abbildung 89 zeigt beispielhafte Rippen nach dem Abzugstest.

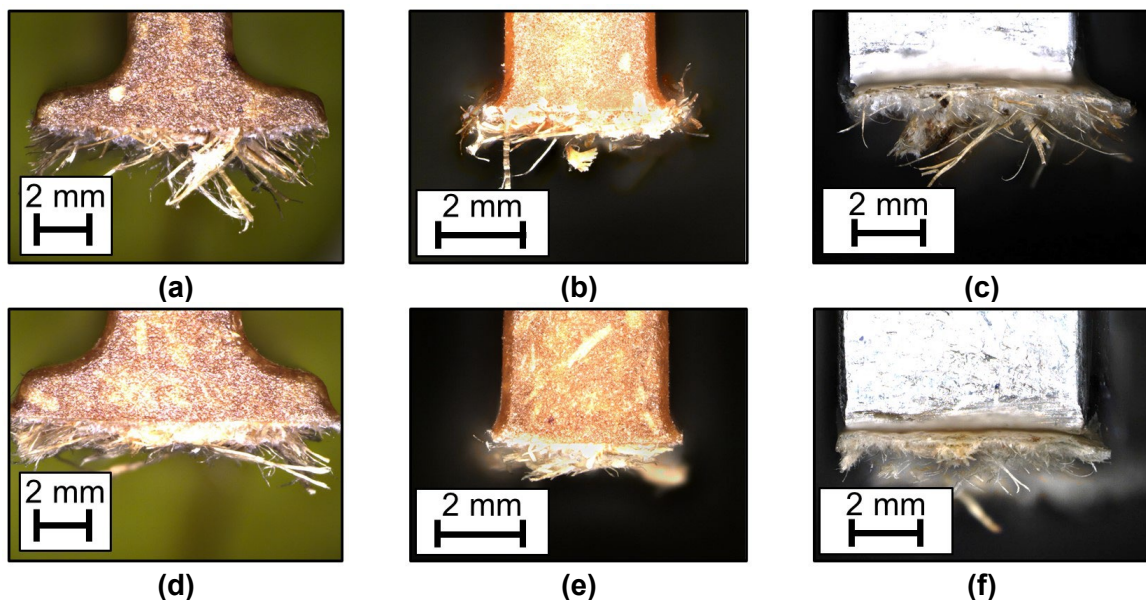


**Abbildung 88** Kopf-Zug-Versuch mit zwei Rippengeometrien und beiden Vliesstoffen, Kerntemperatur der Vliese vor dem Einlegen in die Form bei 170 °C,  $n = 5 \pm SD$ , Spritzgussmaterial Direkt-Compound mit 20 Gew.-% Holzanteil

Die maximale Spannung errechnet sich aus der maximalen Abzugskraft bezogen auf die jeweilige Referenzfläche (siehe Abbildung 37). Die Bezugsflächen sind in Abbildung 88 aufgeführt. Für einen weiteren Vergleich wurde eine rechteckige Aluminiumrippe (Alu. Rippe) mit Cyanacrylat auf die Vliese geklebt. Es ist zu erkennen, dass die Rippen mit Radius deutlich höhere Spannungen

übertragen als die Rippen mit Fuß. Beide Rippengeometrien weisen höhere Werte auf als die geklebten Proben. In jedem Fall trat das Versagen innerhalb des Vlieses auf. Folglich verbessert sich die Verbundfestigkeit zwischen Rippe und Vliesstoff durch das Hinterspritzen. Die Verbundhaftung der Rippen ist höher als die reine Querzugfestigkeit des Vlieses (geklebte Proben mit Aluminiumrippe). Die Verbesserung der Verbundhaftung durch Hinterspritzen hängt von der Rippengeometrie ab.

In jedem Fall kommt es zu einem kohäsiven Bruchbild innerhalb der Vliese. Dies bedeutet, dass die Vliese der schwächste Teil des Verbunds sind. Die Zugfestigkeit des Direkt-Compounds als Anspritzmaterial von  $(42 \pm 3)$  MPa (Tabelle 3) übersteigt die auf das Vlies übertragenen Spannungen (Abbildung 88). Abbildung 89 zeigt beispielhafte Rippen nach dem Abzugstest.



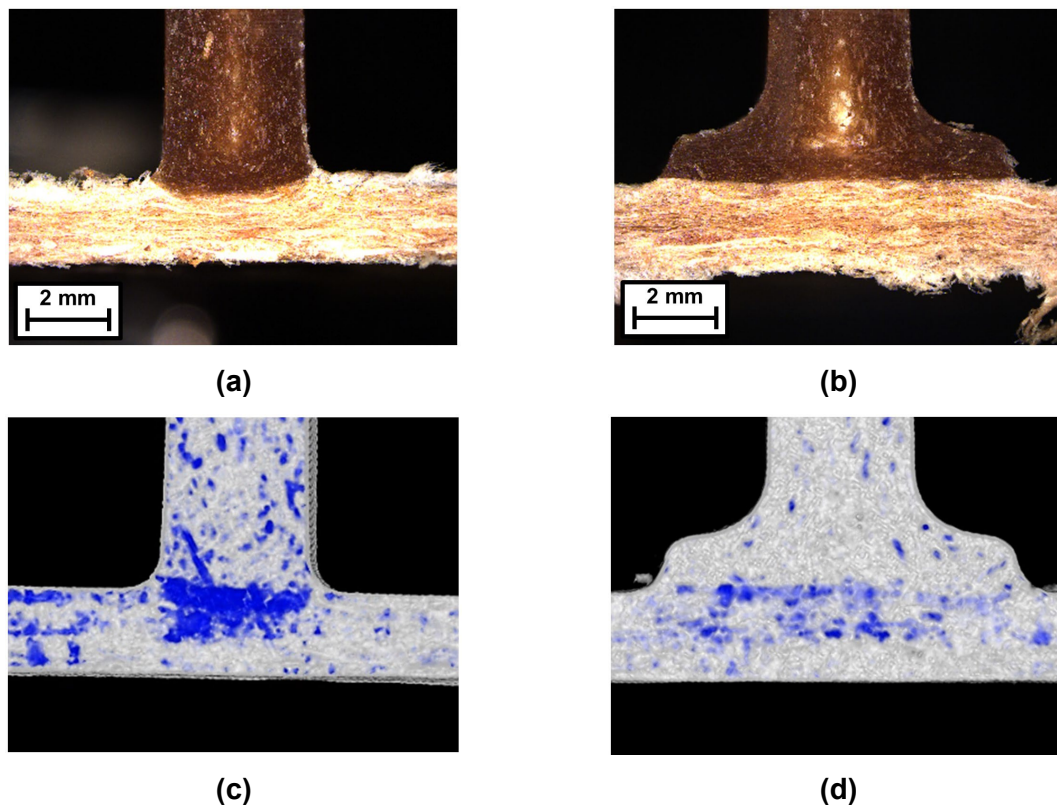
**Abbildung 89** Exemplarische Rippen nach dem Kopf-Zug-Versuch aus Abbildung 88, Auflichtmikroskopie, (a-c) Rippen mit Naturfaservliesen, (d-f) Rippen mit Holzfaservliesen, (a, d) Rippen mit Fuß, (b, e) Rippen mit Radius, (c, f) aufgeklebte Aluminiumrippen

Abbildung 90 zeigt die Veränderung im Übergangsbereich von Rippe zu Vlies. Dargestellt sind Mikrotomschnitte der beiden Rippengeometrien (a, b) und die entsprechenden Computertomographieaufnahmen (c, d). Es ist zu erkennen, dass bei den schmalen Rippen mit Radius (a, c) der Spritzdruck konzentrierter auf das Vlies wirken kann. Direkt unterhalb der Rippe findet sich eine höhere Dichte aufgrund einer Verdichtung durch den Spritzdruck (c), die blau hervorgehoben ist.

In beiden Computertomographieaufnahmen zeigt die Farbe Schwarz die geringste Dichte (den Hintergrund), Grau und Weiß zeigen eine leicht ansteigende Dichte und Blau die höchste Dichte. Unterhalb der Rippe mit Fuß ist im Computertomographiebild (d) nur ein leichter Anstieg der

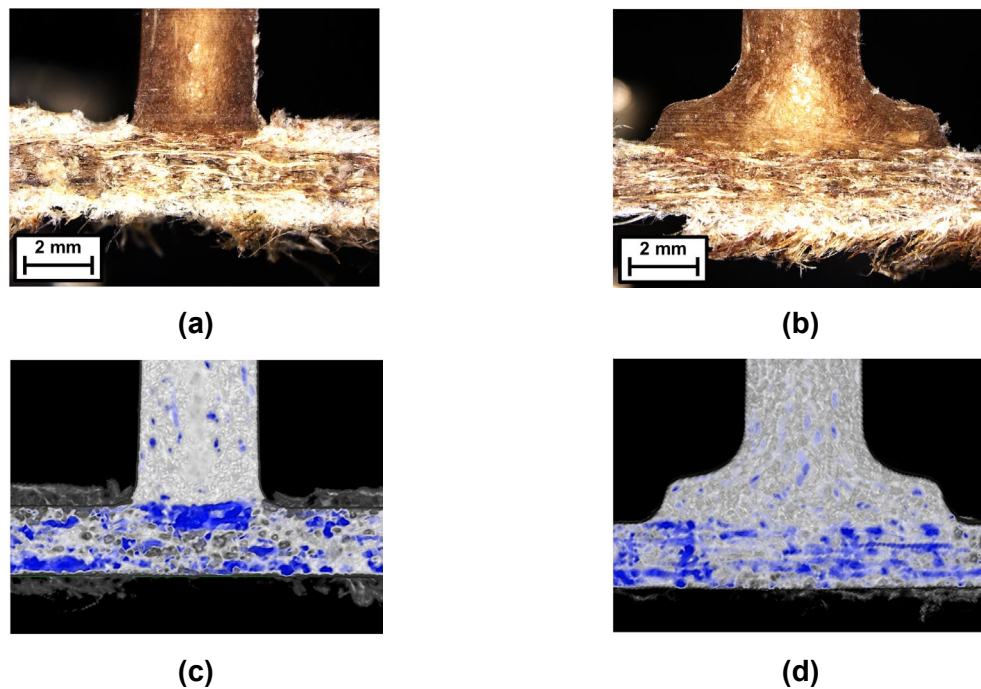


Dichte des Vlieses zu erkennen. Die Zunahme der Dichte unterhalb der Rippen führt zu einer besseren Bindung. Dadurch können höhere Spannungen übertragen werden. Folglich übertragen die beiden angespritzten Rippen höhere Spannungen als die aufgeklebte Aluminiumrippe. Außerdem überträgt die Rippe mit Radius höhere Spannungen als die Rippe mit Fuß, weil der Spritzdruck auf eine kleinere Fläche wirken kann (Abbildung 88). Beim Projekt FENAFa wurde ein ähnlicher Trend bei verschiedenen Materialien festgestellt. Breitere Rippen führten zu einer Abnahme der Verbundfestigkeit [105].



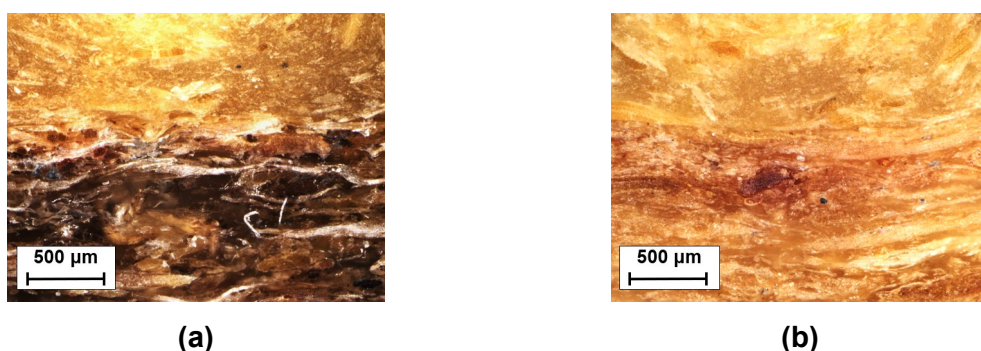
**Abbildung 90** Holzfaservlies angespritzt mit Direkt-Compound (a) Rippe mit Radius Mikrotomschnitt, Auflichtmikroskopie, (b) Rippe mit Fuß Mikrotomschnitt, Auflichtmikroskopie, (c) Rippe mit Radius, Computertomographie, (d) Rippe mit Fuß, Computertomographie, in beiden Computertomographiebildern zeigt Schwarz die geringste Dichte (Hintergrund), Grau und Weiß eine leicht zunehmende Dichte und Blau die maximale Dichte

Die vergleichende Untersuchung von Mikrotomschnitt und Computertomographie wurde mit den Prüfkörpern mit Naturfaservlies wiederholt (siehe Abbildung 91). Es zeigt sich derselbe Trend wie in Abbildung 90 bei den Holzfaservliesen. Dargestellt sind Mikrotomschnitte der beiden Rippengeometrien (a, b) und die entsprechenden Computertomographieaufnahmen (c, d). Auch bei den Naturfaservliesen zeigt sich eine deutliche Zunahme der Dichte im Vlies unterhalb der Rippen in Abhängigkeit von der Rippengeometrie. Folglich können im Vergleich zur verklebten Aluminiumrippe deutlich höhere Spannungen übertragen werden.



**Abbildung 91** Naturfaservlies angespritzt mit Direkt-Compound **(a)** Rippe mit Radius Mikrotomschnitt, Auflichtmikroskopie, **(b)** Rippe mit Fuß Mikrotomschnitt, Auflichtmikroskopie, **(c)** Rippe mit Radius, Computertomographie, **(d)** Rippe mit Fuß, Computertomographie, in beiden Computertomographiebildern zeigt Schwarz die geringste Dichte (Hintergrund), Grau und Weiß eine leicht zunehmende Dichte und Blau die maximale Dichte

Bei einem Vergleich mit starker Vergrößerung von Holzfaservlies zu Naturfaservlies bei gleicher Rippengeometrie ist optisch kein Unterschied zu erkennen. Abbildung 92 zeigt die jeweiligen Vliese mit Rippen und Radius. Sowohl beim Natur- als auch beim Holzfaservlies ist ein direkter Übergang von Rippe zu Vlies zu erkennen. Ein Einfließen der Matrix in das Vlies oder Entmischungseffekte des Anspritzmaterials konnten nicht beobachtet werden.



**Abbildung 92** Naturfaservlies und Holzfaservlies angespritzt mit Direkt-Compound, Rippe mit Radius, Anschliff, Auflichtmikroskopie, **(a)** Naturfaservlies, **(b)** Holzfaservlies

In Kombination mit den Computertomographieaufnahmen (siehe Abbildung 90 und Abbildung 91) lässt sich die Aussage bestätigen, dass die Zunahme der Dichte unterhalb der Rippen zu einer besseren Anbindung führt. Somit können höhere Spannungen übertragen werden.

#### 6.4.5 Zusammenfassung

Ergänzend zum Stand der Wissenschaft und Technik wurde in diesem Abschnitt folgende Hypothese untersucht (**Hypothese 2**):

**Die Verbundhaftung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfasern wird beeinflusst durch Prozessparameter, Anspritzmaterial und Rippengeometrie.**

Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die Rippengeometrie als auch Prozessparameter (Kerntemperatur der Vliese) einen signifikanten Einfluss auf die Verbundhaftung haben. Die Variation des Anspritzmaterials (WPC und Direkt-Compound) hatte keinen signifikanten Einfluss.

Die Kerntemperatur beeinflusst die Verbundhaftung hinterspritzter Rippen stark. Bei einer Kerntemperatur von 170 °C kann die Abzugskraft bei Hybridverbunden mit Holzfaservliesen von etwa 800 N auf fast 1400 N gesteigert werden. Bei nicht aufgeheizten Halbzeugen kommt es an der Grenzfläche zwischen Rippe und Vlies zu einem Adhäsionsbruch. Auf den mikroskopischen Bildern in Abbildung 81 sind nach dem Abziehen bei den nicht aufgeheizten Vliesen fast keine Fasern auf den Rippen zu erkennen. Bei beheizten Vliesstoffen kommt es zu einem kohäsiven Versagen innerhalb des Vliesstoffs, wodurch die maximale Abzugskraft deutlich erhöht wird. Als Anspritzmaterialien wurden ein WPC und ein Direkt-Compound mit jeweils 20 Gew.-% Holzanteil verglichen. Beide Anspritzmaterialien zeigen keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Verbundhaftung.

Die Rippengeometrie hat ebenfalls einen starken Einfluss auf die Verbundhaftung. Rippen mit Radius übertragen deutlich höhere Spannungen als Rippen mit Fuß. Beide Rippengeometrien weisen höhere Werte auf als die geklebten Proben (siehe Abbildung 88). In jedem Fall trat das Versagen innerhalb des Vlieses auf. Folglich verbessert sich die Verbundfestigkeit zwischen Rippe und Vliesstoff durch das Hinterspritzen. Die Verbundhaftung der Rippen ist höher als die reine Querszugfestigkeit des Vlieses (aufgeklebte Rippen). Die Verbesserung der Verbundhaftung durch das Hinterspritzen hängt somit von der Rippengeometrie ab.

Über Mikroskopie und Computertomographie konnte eine Veränderung der Dichte unterhalb der Rippen festgestellt werden (siehe Abbildung 90). Es ist zu erkennen, dass bei den schmaleren Rippen mit Radius der Spritzdruck konzentrierter auf das Vlies wirken kann. Der Anstieg der Dichte

unterhalb der Rippen im Vlies führt zu einer besseren Bindung. Dadurch können höhere Spannungen übertragen werden. Folglich übertragen die beiden angespritzten Rippen höhere Spannungen als die aufgeklebte Aluminiumrippe. Außerdem überträgt die Rippe mit Radius höhere Spannungen als die Rippe mit Fuß, da der Spritzdruck auf eine kleinere Fläche wirken kann (Abbildung 88). Beim Projekt FENAFa wurde ein ähnlicher Trend bei verschiedenen Materialien festgestellt. Breitere Rippen führten zu einer Abnahme der Verbundfestigkeit [105]. Nachfolgende Tabelle gibt eine zusammenfassende Übersicht über die signifikanten Effekte.

**Tabelle 15** Zusammenfassende Darstellung der signifikanten Effekte aus den Untersuchungen zur Verbundhaftung

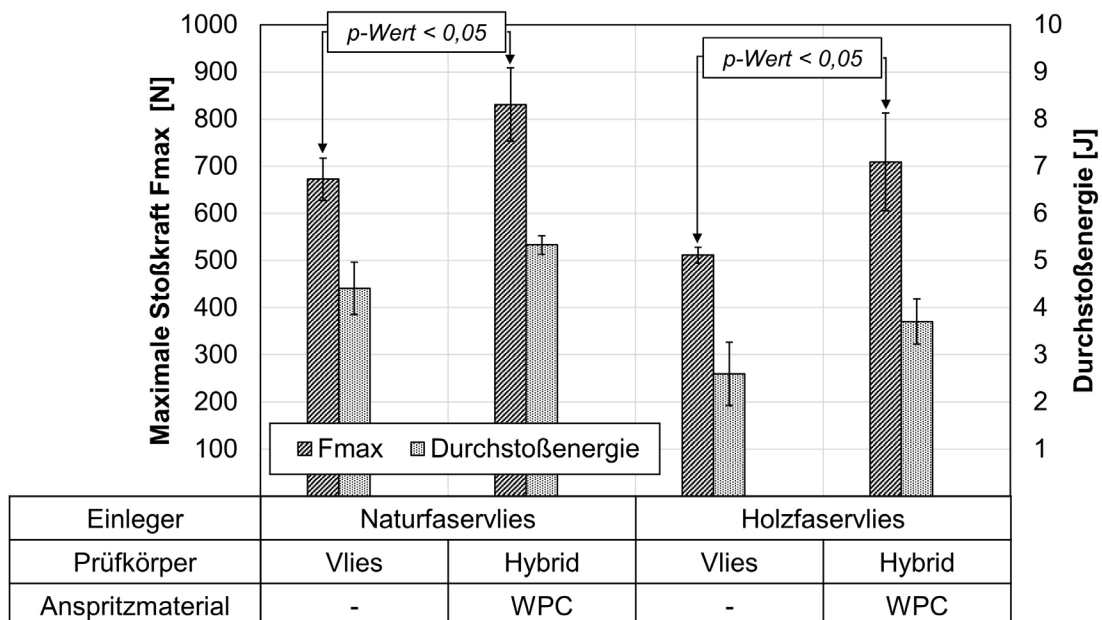
Parameter		Effekt	Verweis
Holzfasernanteil im Anspritzmaterial [Gew.-%]	↑	führt zu	Überspritzen, Verzug, Einfallstellen ↓ Siehe 6.4.1
Kerntemperatur der Vliese beim Anspritzen [°C]	↑		Verbundhaftung [MPa] ↑ Siehe 6.4.2
Anbindungsfläche der Rippe [mm <sup>2</sup> ]	↑		Verbundhaftung [MPa] ↓ Siehe 6.4.4

## 6.5 Hybridverbunde, Untersuchungen an einem praxisnahen Bauteil

### 6.5.1 Einfluss der Hybridisierung von Vliesstoffen auf das Impact-Verhalten

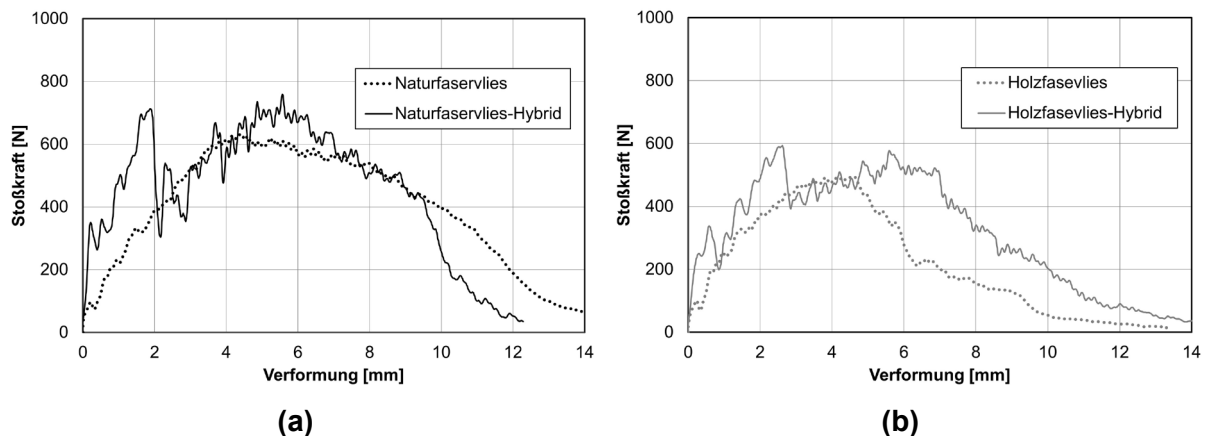
Ein Teil der nachfolgenden Ergebnisse im Abschnitt 6.5 wurde bereits in einer Veröffentlichung im Rahmen des Promotionsvorhabens diskutiert [15]. Das hybride Verfahren des Hinterspritzens kann für die Funktionalisierung flacher Halbzeuge wie Vliesstoffe eingesetzt werden. So können beispielsweise Versteifungsrippen und Schraubdome angespritzt sowie Randbereiche ausgeformt werden. Das folgende Diagramm zeigt, dass das Hinterspritzen mit WPC auch das Verhalten bei schlagartiger Beanspruchung verbessern kann. In diesem Abschnitt wurden unkonsolidierte Vliese über eine Heizpresse auf eine Kerntemperatur von 170 °C erwärmt und direkt in das Spritzgusswerkzeug eingelegt.

Für die Materialprüfung wurde der mittlere Teil des Probekörpers entnommen und mit einem Durchstoßversuch geprüft (siehe 5.4.2). Abbildung 93 zeigt die maximale Kraft und die Durchstoßenergie des reinen Vliesstoffs und des jeweiligen Hybrids. Es ist zu erkennen, dass die Vliesstoffe mit Rippen (Hybrid) im Vergleich zu den Vliesstoffen ohne Rippen deutlich höhere maximale Kräfte und Energien aufnehmen können. Die höhere maximale Kraft und Energie während der multiaxialen schlagartigen Belastung sind geeignete Indikatoren für die Verbundhaftung unter Schlagbeanspruchung.



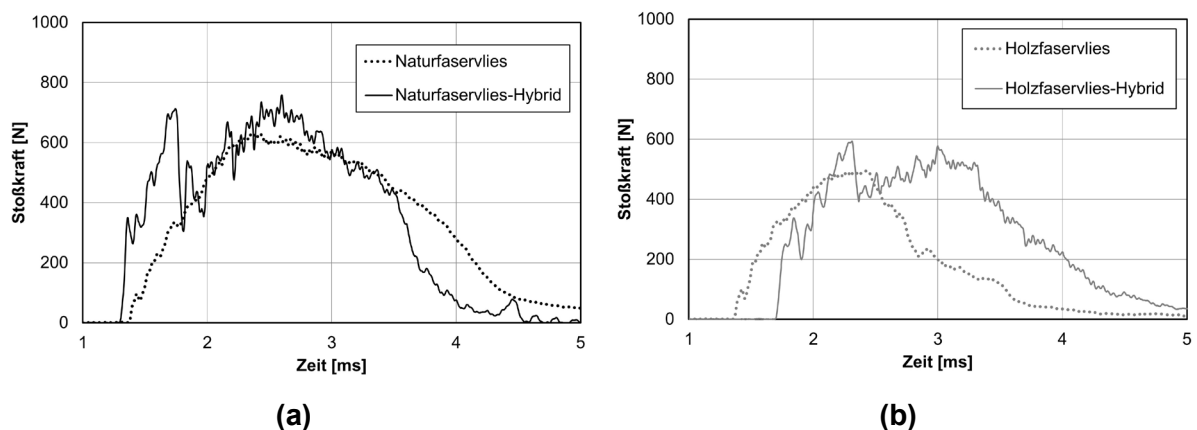
**Abbildung 93** Instrumentierter Durchstoßversuch nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4,  $v = 4,4$  m/s,  $m = 9,378$  kg,  $h = 1$  m, mit Schmierung,  $n = 3 \pm SD$ , beide Materialien wurden als Vliese und als Hybrid mit Rippen geprüft, p-Wert mit einfaktorier ANOVA bei  $\alpha = 0,05$

Abbildung 94 zeigt eine beispielhafte Kurve für jede Probe. Der Kurvenverlauf von Kraft und Verformung des reinen Vliesstoffs wird durch die Rippen im Hybrid überlagert. Die Rippen führen zu einer höheren maximalen Schlagkraft und einer höheren Energieabsorption bei ähnlicher Verformung. Der Benchmark mit Naturfasern zeigt etwas höhere Werte (Abbildung 94a) im Vergleich zu den Proben mit Holzfasern (Abbildung 94b).



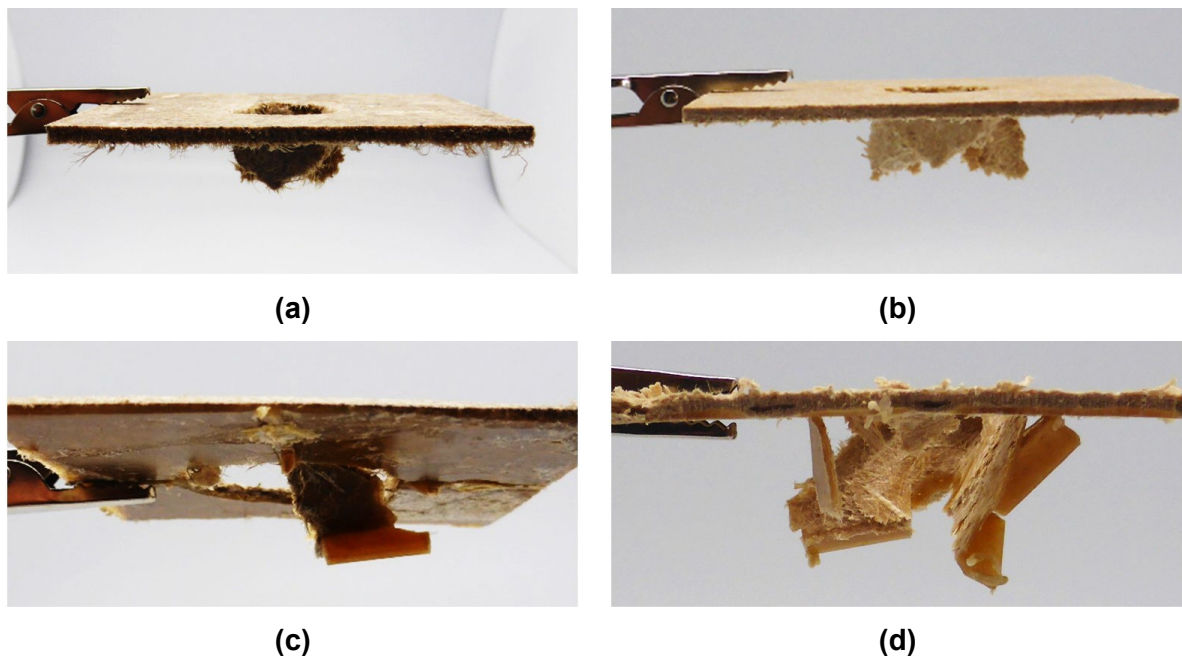
**Abbildung 94** Instrumentierter Durchstoßversuch nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4,  $v = 4,4 \text{ m/s}$ ,  $m = 9,378 \text{ kg}$ ,  $h = 1 \text{ m}$ , mit Schmierung, beispielhafter Kurvenverlauf, beide Materialien wurden als Vliese und als Hybrid mit Rippe geprüft, **(a)** Naturfaservlies und Hybrid, **(b)** Holzfaservlies und Hybrid, Darstellung über die Verformung

Im Vergleich zur Darstellung über die Verformung (siehe Abbildung 94) zeigt die Darstellung über die Zeit ein ähnliches Bild (siehe Abbildung 95). Die Kraft fällt nach 4 bis 5 ms komplett ab. Nach 5 ms sind die Prüfkörper sowohl bei den Vliesen als auch bei den Hybriden komplett durchstoßen. Der komplette Durchstoß dauert von ca. 1 ms bis ca 5 ms.



**Abbildung 95** Instrumentierter Durchstoßversuch nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4,  $v = 4,4 \text{ m/s}$ ,  $m = 9,378 \text{ kg}$ ,  $h = 1 \text{ m}$ , mit Schmierung, beispielhafter Kurvenverlauf, beide Materialien wurden als Vliese und als Hybrid mit Rippe geprüft, **(a)** Naturfaservlies und Hybrid, **(b)** Holzfaservlies und Hybrid, Darstellung über die Zeit

Die folgende Abbildung zeigt die jeweiligen Prüfkörper nach dem Durchstoßversuch. Bei den Vliesstoffen ist ein sauberer Durchstoß zu erkennen (Abbildung 96a und b). Im Falle der Hybride ist das Bruchverhalten spröde (Abbildung 96c und d). Dennoch sind die maximal aufgenommenen Kräfte und die absorbierte Energie bei den Hybriden deutlich höher (Abbildung 93 und Abbildung 94). Die Rippen nach dem Durchstoß werden in den meisten Fällen komplett abgesprengt (siehe z. B. Abbildung 96c). Trotzdem führen die angespritzten Rippen im Moment des Aufpralls im Hybrid zu einer höheren Energieaufnahme. Dies wird im ersten Kraftanstieg im Kraft-Weg- oder Kraft-Zeit-Diagramm deutlich (siehe Abbildung 94 und Abbildung 95).



**Abbildung 96** Beispielhafte Prüfkörper nach dem Durchstoßversuch, (a) Naturfaservlies, (b) Holzfaservlies, (c) Naturfaservlies mit Verstärkungsrippe (Hybrid), (d) Holzfaservlies mit Verstärkungsrippe (Hybrid)

### 6.5.2 Analyse der Bruchbilder

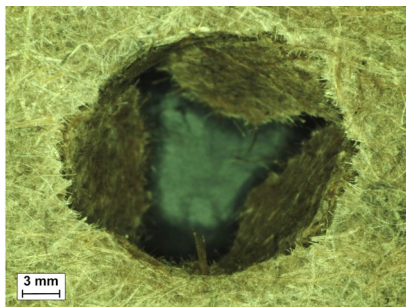
Zur Analyse der Bruchflächen wurden mikroskopische Aufnahmen der Prüfkörper vorgenommen (siehe Abbildung 97 und Abbildung 98). Dabei wurden die Flächen über einen Polygonzug über die Software des Smartzoom 5 Mikroskops (siehe 5.5 Weitere Materialprüfungen) vermessen.

Tabelle 16 zeigt die Mittelwerte der jeweiligen Bruchflächen. Das Naturfaservlies und das Holzfaservlies zeigen im Mittelwert nahezu identische Bruchflächen. Das Holzfaservlies hat dabei eine wesentlich höhere Standardabweichung. Die jeweiligen Hybride weisen im Mittelwert eine leicht höhere Bruchfläche auf, wobei der Holzfaservlies-Hybrid einen deutlichen größeren Wert als der Naturfaservlies-Hybrid hat.

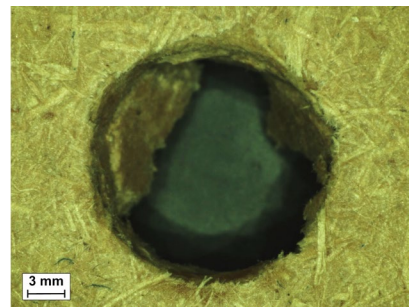
**Tabelle 16** Bruchflächen von Prüfkörpern nach dem Durchstoßversuch, die unregelmäßige Bruchfläche wurde über einen Polygonzug (Smartzoom 5) ermittelt,  $n = 3 \pm SD$

	Naturfaservlies	Holzfaser-vlies	Naturfaser-vlies-Hybrid	Holzfaser-vlies-Hybrid
<b>Fläche [mm<sup>2</sup>]</b>	345 ± 14	347 ± 63	367 ± 58	408 ± 79

Nachfolgende Abbildungen (siehe Abbildung 97 und Abbildung 98) zeigen beispielhaft mikroskopische Aufnahmen der Bruchflächen. Auf Basis dieser Aufnahmen wurden die Bruchflächen in Tabelle 16 ermittelt. Abbildung 97 zeigt das Naturfaservlies und das Holzfaser-vlies. Obwohl das Holzfaser-vlies (siehe Abbildung 97b) im Vergleich zum Naturfaservlies (siehe Abbildung 97a) eine klare Bruchkante zeigt, ist die Standardabweichung beim Holzfaser-vlies (siehe Tabelle 16) deutlich größer.



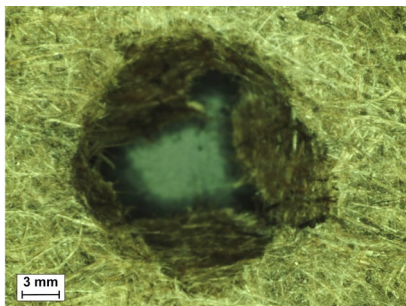
(a)



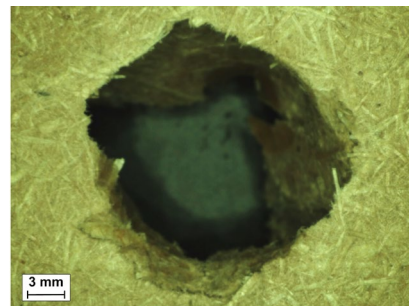
(b)

**Abbildung 97** Beispielhafte mikroskopische Aufnahmen der Bruchflächen, (a) Naturfaservlies, (b) Holzfaser-vlies

Abbildung 98 zeigt den Naturfaservlies-Hybrid und den Holzfaser-vlies-Hybrid. Die Hybrid Prüfkörper haben im Mittel eine leicht größere Bruchfläche im Vergleich zu den Vliesen. Es zeigt sich ein ähnliches Bild der Bruchflächen. Der Unterschied ist vor allem im ersten Kraftanstieg bei ca. 2 mm Verformung im Kraft-Weg-Diagramm zu erkennen (siehe Abbildung 94).



(a)



(b)

**Abbildung 98** Beispielhafte mikroskopische Aufnahmen der Bruchflächen, (a) Naturfaservlies-Hybrid, (b) Holzfaser-vlies-Hybrid



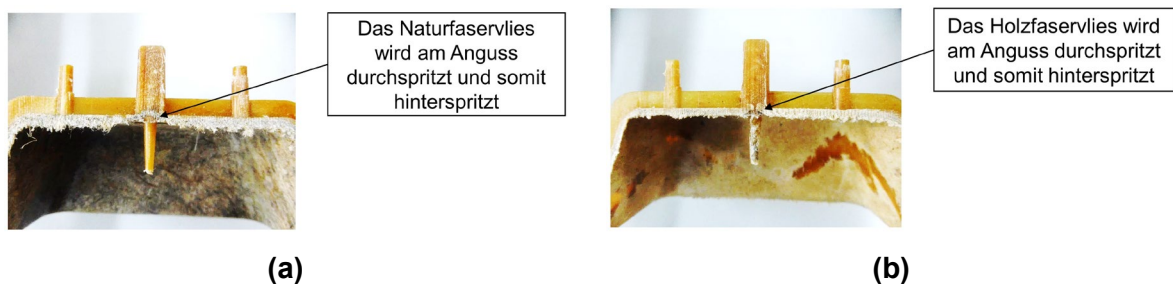
### 6.5.3 Umformverhalten der Vliese im Hybridverfahren

Bei industriellen Anwendungen der Vliesstoffe in hybriden Verarbeitungsverfahren werden die Halbzeuge meist umgeformt und in einem Schritt hinterspritzt. In Abschnitt 6.5 untersuchte Prüfkörper wurden umgeformt und direkt hinterspritzt (siehe Abbildung 99). Durch das Umformen und Hinterspritzen sind die Vliesstoffe einer höheren Belastung ausgesetzt als die Vliesstoffe in Abschnitt 6.4 (siehe 6.4 Hybridverbunde, Untersuchungen zur Verbundhaftung), die nicht umgeformt wurden.



**Abbildung 99** Prüfkörper mit Naturfaservlies (Vordergrund) und Holzfaservlies (Hintergrund)

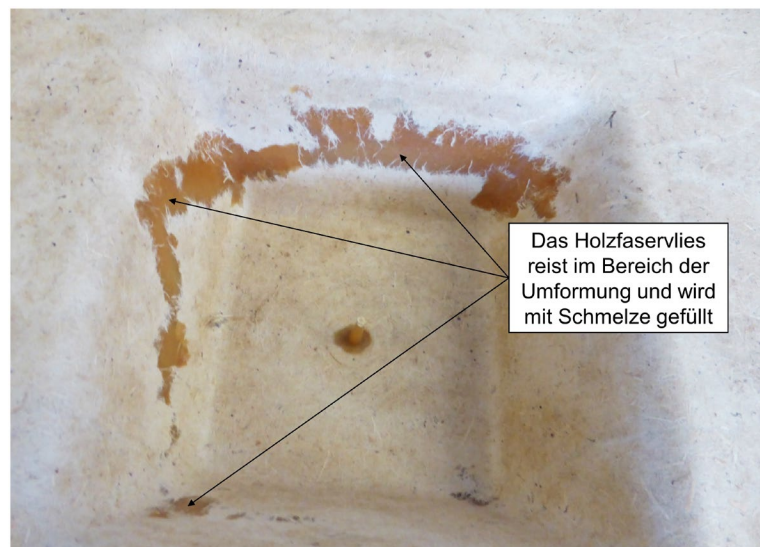
Das Vlies wird im Werkzeug umgeformt, der Anschnitt führt mittig auf das Vlies, welches von der Kunststoffschmelze durchspritzt und auf der Auswerferseite hinterspritzt wird. Abbildung 100 zeigt Prüfkörper, die direkt am Anguss in zwei Teile gesägt wurden. Sowohl beim Natur- als auch beim Holzfaservlies ist zu erkennen, wie die Schmelze das Vlies durchströmt. In Angussnähe zeigt keines der beiden Vliese Risse oder andere unerwünschte Nebeneffekte.



**Abbildung 100** Prüfkörper im Bereich des Angusses, (a) Prüfkörper mit Naturfaservlies, (b) Prüfkörper mit Holzfaservlies

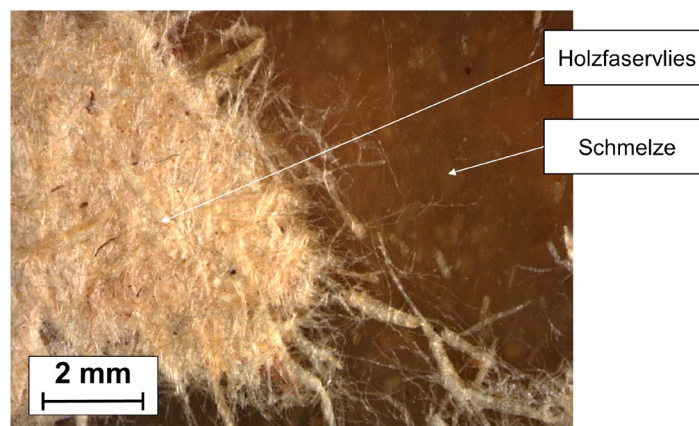
Wie in Abbildung 100 des Weiteren zu sehen ist, kommt es im Holzfaservlies im Bereich der Umformung zu Rissen im Holzfaservlies, die mit Schmelze gefüllt werden (siehe Abbildung 100b). Im

Fall des Naturfaservlieses sind keine Risse im Bereich der Umformung zu erkennen (siehe Abbildung 100a). Abbildung 101 zeigt die Risse im HolzfaserVLies im Bereich der Umformung deutlich. In einem Serienprozess würde dieses Bauteil als Ausschuss klassifiziert werden, da sich auch nach nachgelagerten Prozessen (z. B. Kaschierung) optische Mängel auf der Sichtseite zeigen können. Zudem steigt die Gefahr, dass es in einer Verbausituation zu unerwünschter Geräuschbildung kommt („Squeak and Rattle“). Ein geringerer Spritzdruck kann diesbezüglich nicht als Lösungsoption aufgeführt werden, da sonst das VLies im Anguss nicht durchspritzt werden würde.



**Abbildung 101** Prüfkörper mit HolzfaserVLies im Bereich der Umformung

Das VLies reißt an einigen Stellen im Bereich der Umformung auf. Die Schmelze füllt die Risse. Abbildung 102 zeigt den Übergang von VLies zu Schmelze an einem Riss im Bereich der Umformung.

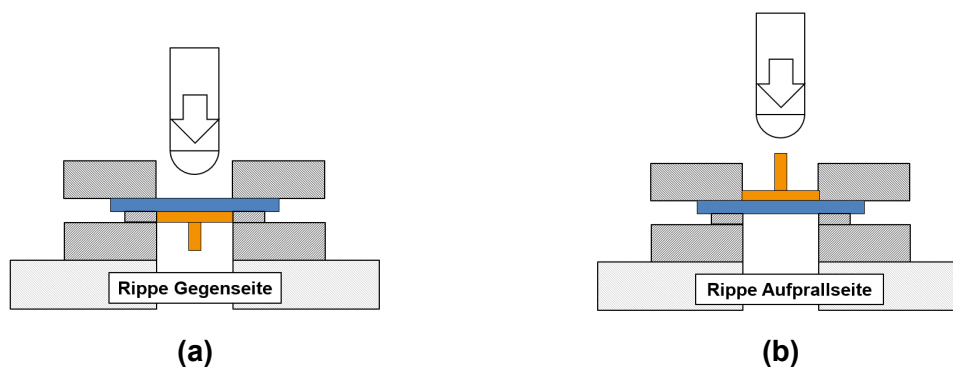


**Abbildung 102** Prüfkörper mit HolzfaserVLies im Bereich der Umformung, Mikroskopie, Auflicht

## 6.5.4 Weiterführende Untersuchungen

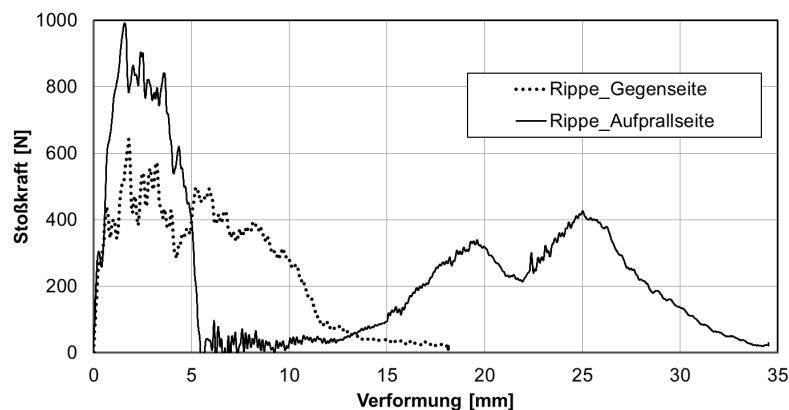
### 6.5.4.1 Variation der Aufprallseite

Der Durchstoßversuch wird in Abschnitt 5.4.2 (siehe 5.4.2 Untersuchungen an einem praxisnahen Bauteil) beschrieben. Die Rippe wurde auf der Gegenseite der Aufprallseite positioniert (Abbildung 103a, Rippe Gegenseite). Im Vergleich dazu wurden Versuche mit Rippen auf der Aufprallseite durchgeführt (Abbildung 103b, Rippe Aufprallseite). Dies würde der Belastung bei Seiten-crash einer Türverkleidung im Automobilinterieur in Verbausituation entsprechen.



**Abbildung 103** Variation der Aufprallseite beim Durchstoßversuch

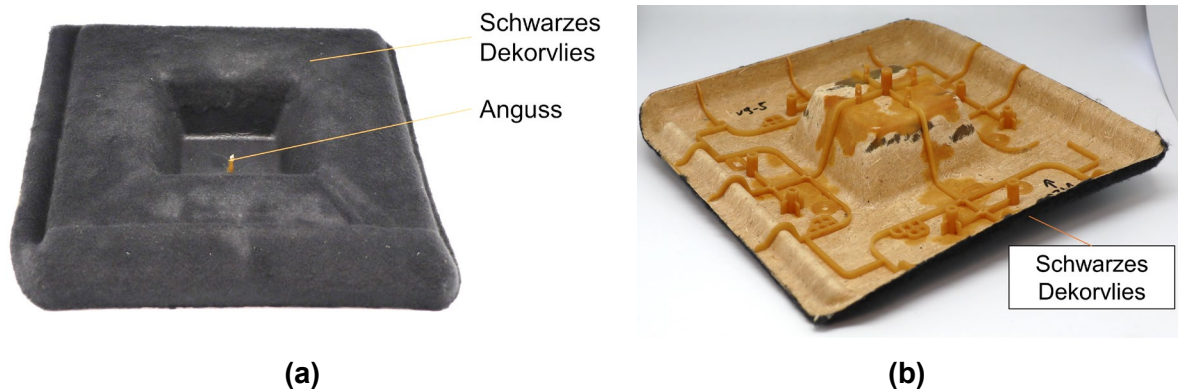
Nachfolgende Abbildung zeigt zwei exemplarische Kurven für den jeweiligen Versuchsaufbau. Das Kraft-Verformungs-Diagramm zeigt einen deutlich unterschiedlichen Verlauf. Bei weiteren Durchstoßversuchen mit der Rippe auf der Aufprallseite konnten die Ergebnisse nur schwer reproduziert werden. Eine geringe Abweichung in der Einspannung der Rippe führte zu stark unterschiedlichen Ergebnissen. Folglich wurde diese Materialcharakterisierung als nicht zielführend bewertet.



**Abbildung 104** Instrumentierter Durchstoßversuch nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4,  $v = 4,4 \text{ m/s}$ ,  $m = 9,378 \text{ kg}$ ,  $h = 1 \text{ m}$ , mit Schmierung, beispielhafter Kurvenverlauf bei Variation der Aufprallseite

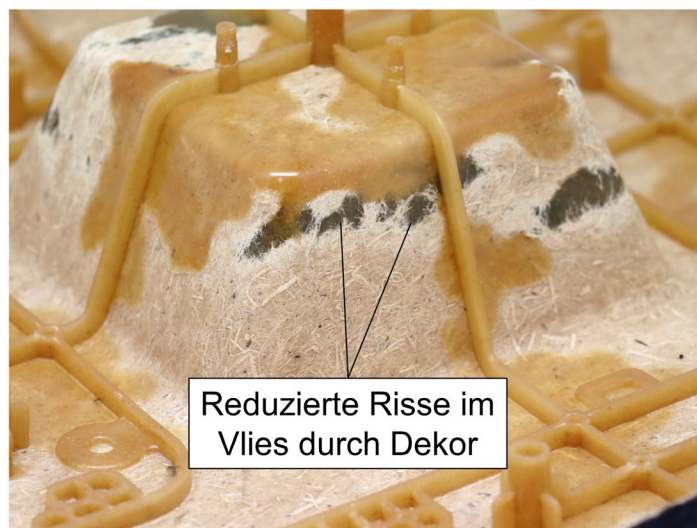
#### 6.5.4.2 One-Shot-Verfahren und Optimierung des Umformverhaltens

Die grundsätzliche Verarbeitbarkeit der Materialkombination im One-Shot-Verfahren wurde überprüft. Dazu wurde in die Heißpresse zusätzlich ein schwarzes Dekorvlies aus Polypropylen mit einem Flächengewicht von  $180 \text{ g/m}^2$  in die Heißpresse und anschließend mit in das Werkzeug gelegt (siehe Abbildung 105).



**Abbildung 105** Prüfkörper mit Holzfaservlies und zusätzlichem schwarzem Dekorvlies aus Polypropylen, (a) Vorderseite, (b) Rückseite

Eine erste Versuchsreihe legt nahe, dass Risse im Bereich der Umformung durch das Dekorvlies reduziert werden können (siehe Abbildung 106). Die Verarbeitung der Materialkombination im One-Shot-Verfahren ist grundsätzlich möglich und könnte durch die Reduzierung der Risse im Bereich der Umformung prozesstechnische Vorteile bieten. Weitere Aussagen zur industriellen Umsetzung im One-Shot-Verfahren können im Rahmen der Arbeit nicht getroffen werden.



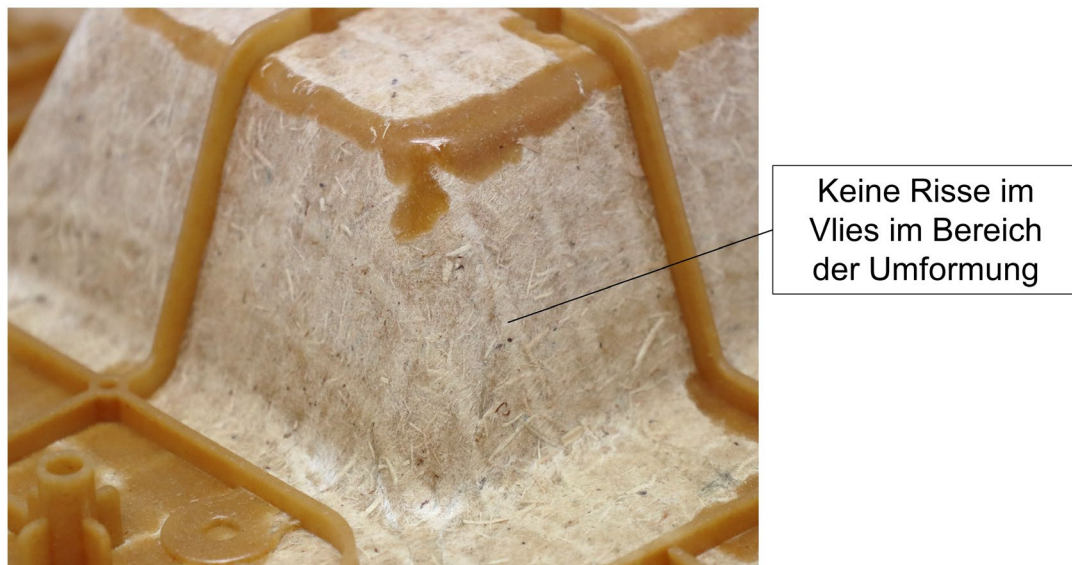
**Abbildung 106** Prüfkörper mit Holzfaservlies und zusätzlichem schwarzem Dekorvlies, Rückseite

In einem weiteren Vorversuch wurde das Holzfaserwolle in Dickenrichtung in zwei Teile geschnitten, in der Mitte ein Flachsgewebe eingelegt und anschließend analog verarbeitet. Es wurde ein  $0^\circ/90^\circ$  Flachsgewebe mit  $240 \text{ g/m}^2$  verwendet. Die Flachsfäden hatten  $3000 \text{ Tex}$  und die Maschenweite des Gewebes betrug  $12 \text{ mm}$  (siehe Abbildung 107). Es zeigt sich, dass aufgrund des erhöhten Flächengewichts von Vlies und Gewebe der Einleger nicht ideal durchspritzt werden konnte. Das Bauteil ist trotz maximalen Spritzdrucks nicht komplett gefüllt.



**Abbildung 107** Prüfkörper mit Holzfaserwolle und zusätzlichem Flachsgewebe, (a) Vorderseite, (b) Rückseite

Ein erster Vorversuch legt nahe, dass durch die Verwendung eines zusätzlichen Gewebes in der Mitte des Vlieses die Risse im Bereich der Umformung vermieden werden können (siehe Abbildung 108).



**Abbildung 108** Prüfkörper mit Holzfaserwolle und zusätzlichem Flachsgewebe, Rückseite

### 6.5.5 Zusammenfassung

Ergänzend zu Abschnitt 6.4 (siehe 6.4 Hybridverbunde, Untersuchungen zur Verbundhaftung) wurde der Einfluss der Hybridisierung der Vliesstoffe an einem praxisnahen Bauteil auf das Impact-Verhalten und deren Umformverhalten im Hybridverfahren untersucht (**Hypothese 2**).

Das hybride Verfahren des Hinterspritzens kann für die Funktionalisierung flacher Halbzeuge wie Vliesstoffe eingesetzt werden. So können beispielsweise Versteifungsrippen und Schraubdome angespritzt sowie Randbereiche ausgeformt werden. Es wurde gezeigt, dass durch das Hinterspritzen mit WPC das Verhalten des gesamten Prüfkörpers bei schlagartiger Beanspruchung verbessern kann (siehe 6.5.1 Einfluss der Hybridisierung von Vliesstoffen auf das Impact-Verhalten). Hinterspritzte Vliesstoffe mit Rippen können im Vergleich zu Vliesstoffen ohne Rippen deutlich höhere maximale Kräfte und Durchstoßenergien aufnehmen. Der Benchmark mit Naturfasern zeigt in beiden Fällen im Vergleich zu Proben mit Holzfasern leicht bessere Werte. Die sich verbessernde maximale Kraft und Energie während der multiaxialen schlagartigen Belastung sind gute Indikatoren für die Verbundhaftung unter Schlagbeanspruchung.

Das Umformverhalten der Holzfaservliese zeigt teilweise problematische Bereiche (siehe 6.5.3 Umformverhalten der Vliese im Hybridverfahren). Teilweise traten Risse im Bereich der größten Umformung auf. In einem Serienprozess würde dieses Bauteil als Ausschuss klassifiziert werden, da sich auch nach nachgelagerten Prozessen (z. B. Kaschierung) optische Mängel auf der Sichtseite zeigen können. Zudem steigt die Gefahr, dass es in einer Verbausituation zu unerwünschter Geräuschbildung kommt („Squeak and Rattle“). In Abschnitt 6.5.4.2 (siehe 6.5.4.2 One-Shot Verfahren und Optimierung des Umformverhaltens) wurde gezeigt, dass sowohl die Verwendung eines Dekorvlieses im One-Shot-Verfahren als auch die Verwendung eines zusätzlichen Gewebes in der Mitte des Vlieses das Umformverhalten deutlich verbessern.

## 6.6 Ökologischer Vergleich von Natur- und Holzfasern

### 6.6.1 Rahmenbedingungen

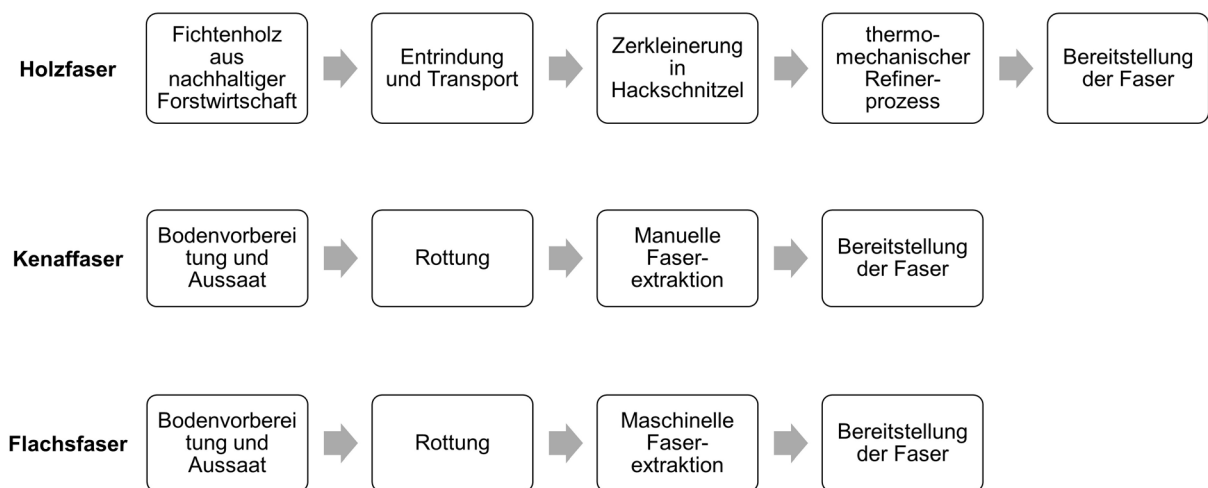
Zum ökologischen Vergleich von Natur- und Holzfasern wurde an der TH Rosenheim in Zusammenarbeit mit Theresa Pscherer und Prof. Sandra Krommes eine vergleichende Ökobilanzierung durchgeführt. Der Vergleich zu Ökobilanzierungen aus dem Stand der Wissenschaft und Technik (siehe Abschnitt 2.7) ist nur bedingt möglich. Schmiedel et al. geben nur das Erderwärmungspotential der unterschiedlichen Fasern an (siehe Abbildung 29). Dabei wird Kenaf als besonders ökologisch vorteilhaft bewertet. Genauere Informationen zur verwendeten Methode sind nicht bekannt [115]. Bei nachfolgender vergleichenden Ökobilanzierung werden die gleichen Kategorien wie nach Sommerhuber et al. verglichen (siehe Abschnitt 2.7) [121]. Die nachfolgende Bilanzierung bildet die Systemgrenze ‚cradle-to-(factory)-gate‘ ab. Sie umfasst also die Rohstoffgewinnung, den Transport und die Faserproduktion. Die Ergebnisse wurden mit der Datenbank ecoinvent und der Software openLCA mit der Wirkungsabschätzung CML-IA baseline gewonnen. Innerhalb der Bilanzierung wurden die ökologischen Auswirkungen, die sich aus der Herstellung der benötigten Maschinerie bzw. produktionsbedingten Infrastruktur ergeben, nicht in die Bilanzierung aufgenommen. Es wurden lediglich die für den Produktionsprozess benötigten Materialien, Rohstoffe, Betriebsmittel, Hilfsmittel und Energie berücksichtigt. Klöpffer und Grahl geben ausführliche Informationen zu den Wirkungskategorien, die nachfolgend diskutiert und in Abbildung 110 sowie Abbildung 111 verglichen werden [143]. Es werden Holzfasern, Kenaffasern und Flachsfasern verglichen. Hanffasern konnten nicht in die vergleichende Ökobilanzierung aufgenommen werden, da für diese keine vergleichbaren Daten vorlagen.

Die ökobilanzielle Betrachtung der **Holzfasern** beginnt mit der Bereitstellung von Fichtenholz aus nachhaltiger Forstwirtschaft in Deutschland. Dieses wird vor Ort im Wald entrindet und zur Fabrik transportiert. Hier erfolgt die Zerkleinerung des Holzes in Hackschnitzel. Innerhalb eines thermo-mechanischen Refinerprozesses erfolgen der Faseraufschluss, die Trocknung, die Rückgewinnung von Chemikalien sowie eine interne Abwasserbehandlung. Die Betrachtung endet mit der Bereitstellung der Faser.

Die ökobilanzielle Betrachtung der **Kenaffasern** beginnt mit der Vorbereitung des Bodens für die Aussaat in Indien. Die Verwendung von Pestiziden und Düngemittel innerhalb des Pflanzenbaus wird berücksichtigt. Nach der Ernte der Kenafpflanze erfolgt die Fasergewinnung, die manuell von Hand durchgeführt wird. Der erste Schritt ist die Rottung. Hierfür werden Kenafbündel in stehendes oder langsam fließendes Wasser getaucht. Nach mehrtägigem Eintauchen lösen sich

die Kenaffasern vom Stängel und werden aus diesem extrahiert. Der Stängel wird zum Nebenprodukt. Innerhalb der ecoinvent-Datenbank erfolgt für dieses Nebenprodukt keine Allokation, sondern eine Prozessaufteilung. Damit liegen die Stängel außerhalb der Systemgrenze und werden nicht mitbilanziert. Die Fasern werden anschließend in der Sonne getrocknet. Die ökobilanzielle Betrachtung der Kenaffaser endet mit der Gewinnung der Kenaffaser aus den gerotteten Pflanzen.

Die ökobilanzielle Betrachtung der **Flachsfaser** beginnt mit der Vorbereitung des Bodens für die Aussaat in Indien. Die Verwendung von Pestiziden und Düngemittel innerhalb des Pflanzenbaus wird berücksichtigt. Nach der Ernte der Flachsfaser erfolgt die Fasergewinnung. Der Prozess der Rottung ist mit der Kenaffaser vergleichbar. Die Extrahierung der Faser aus dem Stängel erfolgt maschinell. Die ökobilanzielle Betrachtung endet mit der Extrahierung der Flachsfasern aus den gerotteten Pflanzen. Nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die betrachteten Prozesse der jeweiligen Fasern.



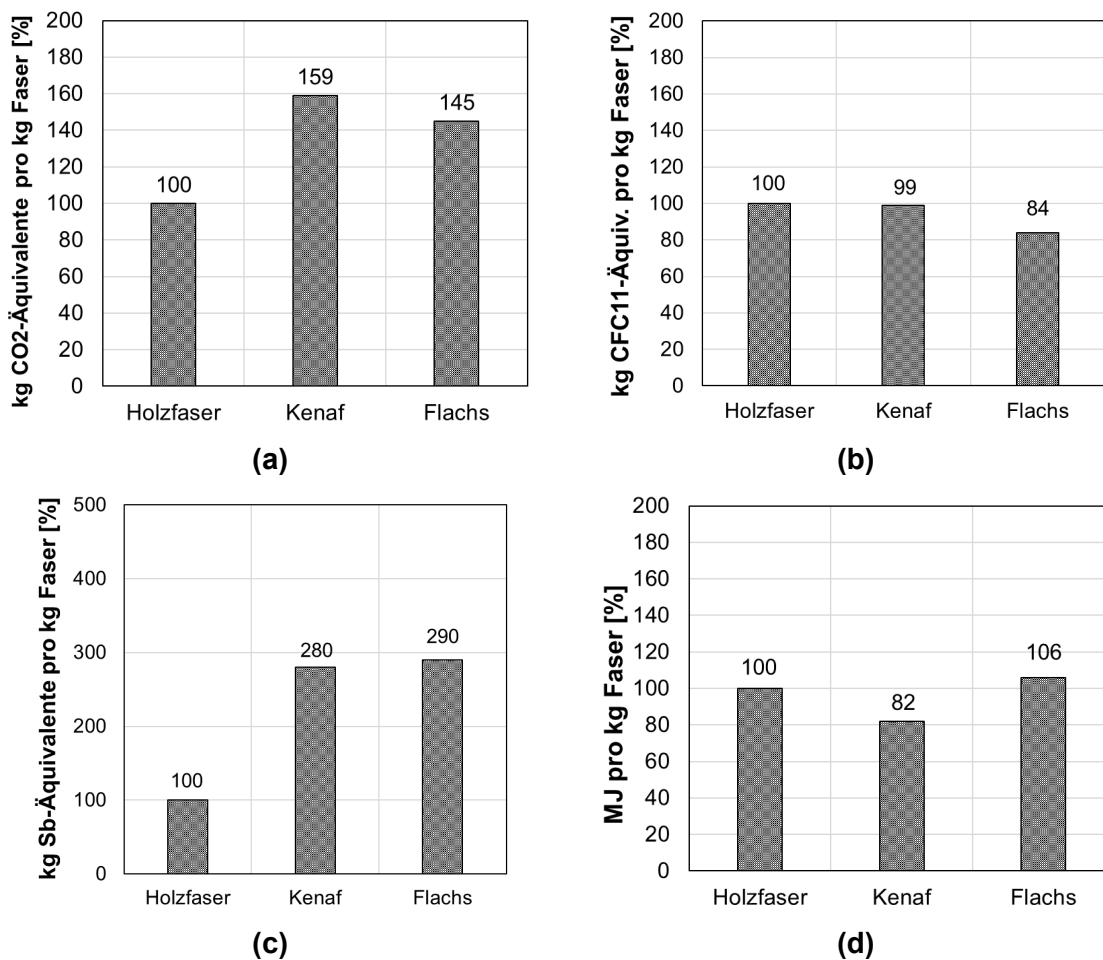
**Abbildung 109** Überblick über die betrachteten Prozesse der jeweiligen Fasern

### 6.6.2 Vergleichende Ökobilanzierung

Abbildung 110 zeigt eine vergleichende Ökobilanzierung von Holz-, Kenaf- und Flachsfasern. Es werden das Erderwärmungspotential, der Abbau der Ozonschicht, die Erschöpfung abiotischer Ressourcen und die Erschöpfung abiotischer Ressourcen inklusive fossiler Brennstoffe verglichen. Holzfasern zeigen in der Kategorie Erderwärmungspotential und Erschöpfung abiotischer Ressourcen deutlich bessere Werte als die Naturfasern. Die größten Beiträge für das Erderwärmungspotential halten bei Kenaf und Flachs vor allem die eingesetzten Düngemittel und die nach der Ernte anfallenden Samen und Halme. Samen und Halme werden üblicherweise als Energieholz



verbrannt. Innerhalb des ecoinvent-Datensatzes wird ein Mix verschiedener Abfallbehandlungen angenommen und bilanziert. Der Mix setzt sich aus den Technologien 28 % offene Verbrennung, 51 % offene Deponie, 21 % unhygienische Deponie zusammen und verursacht die erhöhten Treibhausgasemissionen. Bei Holz ist die Gewinnung der benötigten Energie im Refinerprozess maßgeblich für die Höhe des Wertes verantwortlich. Bei nachfolgenden Diagrammen in Abbildung 110 und Abbildung 111 werden die relativen Werte im Vergleich zur Holzfaser dargestellt. In Tabelle 17 sind die absoluten Werte zu finden.



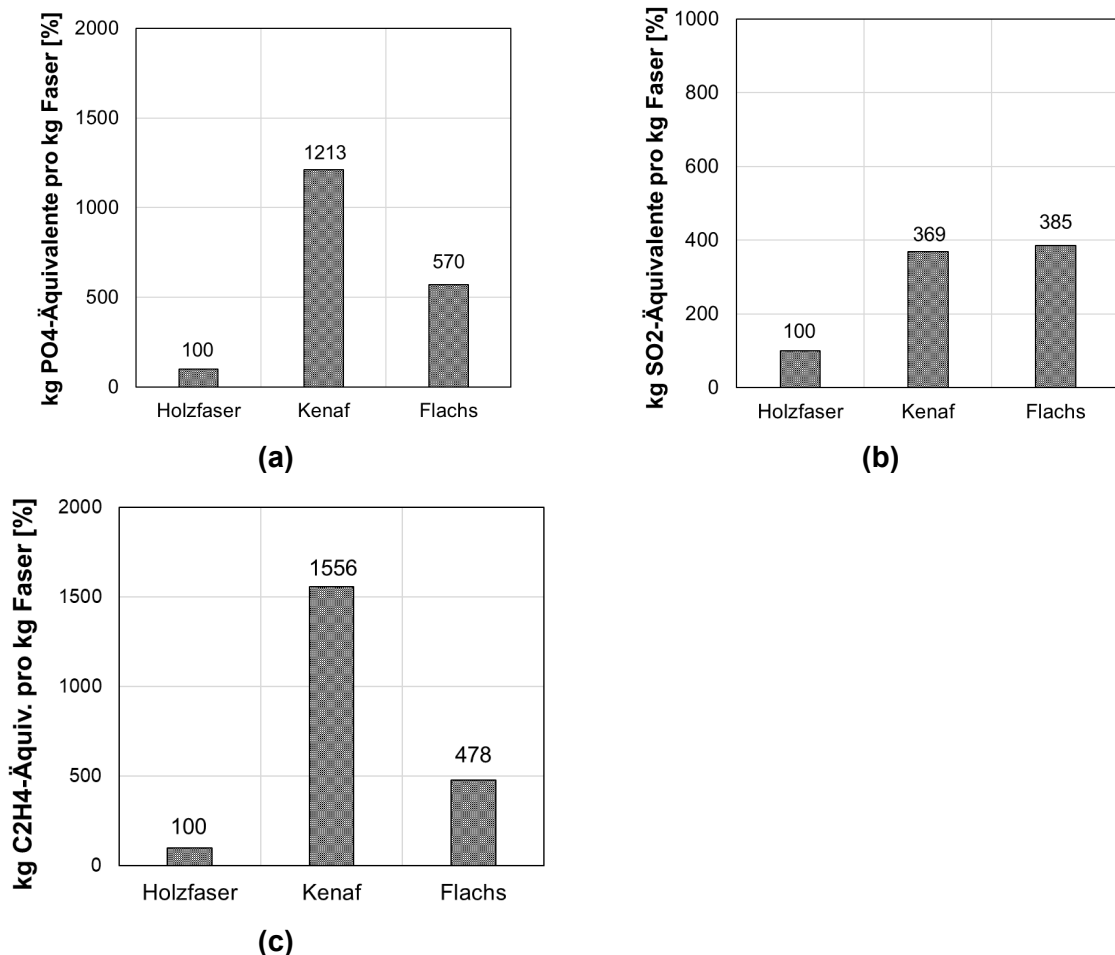
**Abbildung 110** Vergleichende Ökobilanzierung von Holzfasern, Kenaf und Flachs, **(a)** Erderwärmungspotential, **(b)** Abbau der Ozonschicht, **(c)** Erschöpfung abiotischer Ressourcen, **(d)** Erschöpfung abiotischer Ressourcen inklusive fossiler Brennstoffe

In der Kategorie Abbau der Ozonschicht zeigt Kenaf leicht und Flachs deutlich bessere Werte. Dies liegt in erster Linie am hohen Elektrizitätsbedarf des thermo-mechanischen Aufschlussprozesses der Holzfaser. In der Kategorie Erschöpfung abiotischer Ressourcen inklusive fossiler Brennstoffe ist bei der Holzfaser ebenfalls die benötigte Elektrizität ausschlaggebend. Bei Kenaf und Flachs

sind hierbei die eingesetzten Düngemittel (Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumdünger) bzw. deren Herstellung wesentlich.

Neben den Kategorien in Abbildung 110 vergleicht die Abbildung 111 zusätzlich die Überdüngung von Böden, die Übersäuerung von Böden und die Oxidantienbildung (bodennahes Ozon, auch bekannt als Sommersmog). Bei diesen Kategorien zeigt die Holzfaser deutlich bessere Werte als die Naturfasern.

Innerhalb der drei Wirkungskategorien in Abbildung 111 sind die Verbrennungsprozesse der holzartigen Stängel sowie der Einsatz von Düngemitteln maßgeblich für die Umweltauswirkungen von Kenaf und Flachs. Bei der Holzfaser ist der Wert hauptsächlich auf die Gewinnung der benötigten Elektrizität zurückzuführen.



**Abbildung 111** Vergleichende Ökobilanzierung von Holzfaser, Kenaf und Flachs, (a) Überdüngung, (b) Übersäuerung, (c) Oxidantienbildung

Des Weiteren gilt zu beachten, dass bei dieser vergleichenden Ökobilanzierung der Transport zu nachgelagerten Prozessen (z. B. Vlieslegung) nicht berücksichtigt wurde. Unter der Annahme,

dass nachgelagerte Prozesse in Deutschland stattfinden, würde sich der Transport der Naturfasern von Indien nach Europa negativ auf die Bilanz der Naturfasern auswirken.

Bei Holzfasern gäbe es die Möglichkeit, anstatt frisch geschlagene Stämme zu Hackschnitzeln und Fasern zu verarbeiten, anfallende Hackschnitzel (Nebenprodukte) aus anderen holzverarbeitenden Industrien zu beziehen (z. B. Herstellung von Brettsperrholz, Holzmöbeln und Sperrholz) und diese in den Refinerprozess zu integrieren. Dies könnte sich positiv auf die Bilanz der Holzfaser auswirken.

**Tabelle 17** Vergleichende Ökobilanzierung von Holzfasern, Kenaf und Flachs, absolute Werte zu Abbildung 110 und Abbildung 111

	<b>Holzfaser</b>	<b>Kenaf</b>	<b>Flachs</b>
<b>Erderwärmungspotential</b> [kg CO <sub>2</sub> -Äquiv. pro kg Faser]	0,92	1,47	1,34
<b>Abbau der Ozonschicht</b> [kg CFC11-Äquiv. pro kg Faser]	5,98E-08	5,90E-08	5,04E-08
<b>Erschöpfung abiotischer Ressourcen</b> [kg Sb-Äquiv. pro kg Faser]	3,52E-06	9,86E-06	1,02E-05
<b>Erschöpfung abiotischer Ressourcen inklusive fossiler Brennstoffe</b> [MJ pro kg Faser]	10,6	8,7	11,2
<b>Überdüngung</b> [kg PO <sub>4</sub> -Äquiv. pro kg Faser]	0,0034	0,042	0,020
<b>Übersäuerung</b> [kg SO <sub>2</sub> -Äquiv. pro kg Faser]	0,0050	0,019	0,019
<b>Oxidantienbildung</b> [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -Äquiv. pro kg Faser]	0,00018	0,0028	0,00086

### 6.6.3 Zusammenfassung

Abschließend kann somit festgestellt werden, dass die Ökobilanz von Holzfasern mit Naturfasern konkurrieren kann und unter Umständen sogar Vorteile bietet. Aufbauend auf dieser Untersuchung könnte als nächster Schritt eine umfassende vergleichende Produktbilanzierung an einem konkreten Bauteil (z. B. Türverkleidung) im industriellen Maßstab vorgenommen werden. Dabei müssten Unterschiede in den nachgelagerten Prozessen (Materialkombination, Vlieslegung, Aufheizverhalten, Hinterspritzen etc.) betrachtet werden. Es gälte unter anderem Liefer- und Transportwege mitzubedenken und Energieverbräuche direkt an den Maschinen in der Produktion zu ermitteln. Eine umfassende vergleichende Produktbilanzierung kann im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden, da die relevanten Prozesse größtenteils im Labor und nur teilweise im industriellen Maßstab durchgeführt wurden.

Bei einer vergleichenden Produktbilanzierung müssten zudem unterschiedliche mechanische Kennwerte berücksichtigt werden. Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt wurde, weisen thermoplastische Hybridverbunde mit Naturfasern teilweise leicht bessere mechanische Kennwerte auf. Folglich könnte bei einem Bauteil unter Umständen ein Naturfaservlies mit einem geringeren Flächengewicht im Vergleich zum Holzfaservlies verwendet werden. Dies hätte einen Einfluss auf die vergleichende Produktbilanzierung.

Álvarez-del-Castillo et al. haben in ihrer Studie die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der jeweiligen Materialien (z. B. glasfaserverstärktes Polypropylen) berücksichtigt, um die äquivalente Masse jeder industriellen Anwendung zu berechnen und die Nutzungsphase und das Ende des Lebenszyklus in die Ökobilanz miteinzubeziehen [144].

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel dieser Arbeit war die **prozess- und materialtechnische Entwicklung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfaserverstärkung**. Dabei wurden Holzfasern mit einem Refiner über ein thermo-mechanisches Aufschlussverfahren selbst hergestellt und über einen Spritzgusscompounder direkt verarbeitet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zusätzlich die Technologie des Vlieslegens in Zusammenarbeit mit der Firma Autefa Solutions Austria GmbH genutzt (siehe 3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit).

Es wurden zwei Hypothesen definiert, die den aktuellen Stand der Forschung ergänzen. In Abschnitt 2.9 (siehe 2.9 Zusammenfassung Stand der Forschung und Ableitung der Hypothesen) wurde dargestellt, wie sich die untersuchten Hypothesen vom bisherigen Stand der Forschung ableiten.

#### 7.1.1 Hypothese 1 (Direkt-Compoundierung)

Zu **Hypothese 1 (Direkt-Compoundierung)** wurden ergänzend zum Stand der Wissenschaft und Technik Holzfasern (Fichtefasern) aus einem thermo-mechanischen Aufschlussprozess (Refiner) auf einem Spritzgusscompounder direkt compoundiert. Folgende Hypothese wurde untersucht: **Durch Direkt-Compoundierung von Polypropylen mit Holzfasern kann eine Faserverstärkung bzw. eine signifikante Verbesserung der Mechanik in Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit im Vergleich zum Grundpolymer ohne Holzfasern erreicht werden.** Es konnte gezeigt werden, dass ein steigender Holzanteil zu einer signifikanten Erhöhung der Steifigkeit, Festigkeit und maximalen Schlagkraft führt. Die Holzfasern haben eine Verstärkungswirkung.

Die Pelletierung der Holzfasern ermöglicht eine einfache Dosierung über die gravimetrische Dosiereinrichtung. Die Holzfaserpellets lösen sich durch die Verarbeitung im Spritzgusscompounder in Faserbündel, Einzelfasern und Feinanteil auf und fügen sich homogen in die Matrix ein (siehe Abbildung 49). So bleibt auch die Kerbschlagzähigkeit bei steigendem Holzfasergehalt im Rahmen der Standardabweichung konstant (siehe 6.2.2 Schlagzähigkeitsprüfung). Ein steigender Füllgrad führt außerdem zur Erhöhung der Dichte und der Viskosität. Die Lumen der Holzfasern füllen sich teilweise mit Kunststoff. Die Dichte der Zellwand übersteigt die Dichte des Grundpolymers. So

kommt es zum Anstieg der Dichte des Verbundwerkstoffs (siehe Abbildung 48) [7]. Durch Untersuchungen mittels Computertomographie wurde diese Vermutung bestätigt. Es konnten Holzfasern sowohl mit gefüllten als auch mit ungefüllten Lumen gefunden werden (siehe 6.2.3).

### 7.1.2 Hypothese 2 (Hybridverbunde)

Ergänzend zum Stand der Wissenschaft und Technik wurde zu **Hypothese 2** die **Verbundhaftung** thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfasern auf grundlegende Effekte untersucht. Die Verbundhaftung von Vliesstoffen mit Holzfasern (Fichte) und Vliesstoffen mit Naturfasern (Kenaf, Hanf) in thermoplastischen Hybridverbunden wurde über einen Kopf-Zug-Versuch ermittelt. Folgende Hypothese wurde untersucht: **Die Verbundhaftung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfasern wird beeinflusst durch Prozessparameter, Anspritzmaterial und Rippengeometrie**. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die Rippengeometrie als auch Prozessparameter (Kerntemperatur der Vliese) einen signifikanten Einfluss auf die Verbundhaftung haben. Die Variation des Anspritzmaterials (WPC und Direkt-Compound) hatte keinen signifikanten Einfluss. Thermoplastische Hybridverbunde mit Holzfaservliesen können mit dem Benchmark aus Naturfasern konkurrieren. Hybridverbundwerkstoffe mit Holzfasern zeigen etwas niedrigere, aber durchaus vergleichbare Werte [15].

Die Kerntemperatur der Vliese beeinflusst die Verbundhaftung von hinterspritzten Rippen stark. Bei nicht aufgeheizten Halbzeugen kommt es an der Grenzfläche zwischen Rippe und Vlies zu einem Adhäsionsbruch. Bei beheizten Vliesstoffen kommt es zu einem kohäsiven Versagen innerhalb des Vliesstoffs, wodurch die maximale Abzugskraft deutlich erhöht wird. Als Anspritzmaterialien wurden ein WPC und ein Direkt-Compound mit jeweils 20 Gew.-% Holzanteil verglichen und zeigten keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Verbundhaftung.

Die Rippengeometrie hat ebenfalls einen starken Einfluss auf die Verbundhaftung. Rippen mit Radius übertragen deutlich höhere Spannungen als Rippen mit Fuß. Beide Rippengeometrien weisen höhere Werte auf als die geklebten Proben. In jedem Fall trat das Versagen innerhalb des Vlieses auf. Folglich verbessert sich die Verbundfestigkeit zwischen Rippe und Vliesstoff durch das Hinterspritzen. Die Verbundhaftung der Rippen ist höher als die reine Querkzugfestigkeit des Vlieses (geklebte Proben). Die Verbesserung der Verbundhaftung durch das Hinterspritzen hängt somit von der Rippengeometrie ab.

Über Mikroskopie und Computertomographie konnte eine Zunahme der Dichte unterhalb der Rippen festgestellt werden. Es ist zu erkennen, dass bei den schmalen Rippen mit Radius der

Spritzdruck konzentrierter auf das Vlies wirken kann. Die Zunahme der Dichte unterhalb der Rippen führt zu einer besseren Bindung. Dadurch können höhere Spannungen übertragen werden. Folglich übertragen die beiden angespritzten Rippen höhere Spannungen als die aufgeklebte Aluminiumrippe. Außerdem überträgt die Rippe mit Radius höhere Spannungen als die Rippe mit Fuß, weil der Spritzdruck auf eine kleinere Fläche wirken kann.

Ergänzend zu **Hypothese 2** wurde an einem praxisnahen Bauteil der Einfluss der Hybridisierung der Vliesstoffe auf das Impact-Verhalten und deren Umformverhalten im Hybridverfahren untersucht. Das hybride Verfahren des Hinterspritzens kann für die Funktionalisierung flacher Halbzeuge wie Vliesstoffe eingesetzt werden. So können beispielsweise Versteifungsrippen und Schraubdome angespritzt sowie Randbereiche ausgeformt werden.

Es wurde gezeigt, dass durch das Hinterspritzen mit WPC das Verhalten des gesamten Prüfkörpers bei schlagartiger Beanspruchung verbessert werden kann. Hinterspritzte Vliesstoffe mit Rippen können im Vergleich zu Vliesstoffen ohne Rippen deutlich höhere maximale Kräfte und Durchstoßenergien aufnehmen. Der Benchmark mit Naturfasern zeigt in beiden Fällen im Vergleich zu Proben mit Holzfasern leicht bessere Werte. Die sich verbessernde maximale Kraft und Energie während der multiaxialen schlagartigen Belastung sind gute Indikatoren für die Verbundhaftung unter Schlagbeanspruchung.

Das Umformverhalten der Holzfaservliese zeigt teilweise problematische Bereiche. Teilweise traten Risse im Bereich der größten Umformung auf. In Abschnitt 6.5.4.2 (siehe 6.5.4.2 One-Shot Verfahren und Optimierung des Umformverhaltens) wurde gezeigt, dass sowohl die Verwendung eines Dekorvlieses im One-Shot-Verfahren als auch die Verwendung eines zusätzlichen Gewebes in der Mitte des Vlieses das Umformverhalten deutlich verbessern.

### 7.1.3 Technische Ziele

Es konnte ein grundlegender Prozess zur Herstellung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfasern entwickelt werden.

- **Holzfasern aus Fichte** aus einem **thermo-mechanischen Aufschlussverfahren** eignen sich sowohl für die Direkt-Compoundierung als auch für die Vlieslegung. Die Verarbeitungsparameter (160 °C, 5,2 bar Sättigungsdampfdruck für drei Minuten, Mahlscheibe 12XASR01) sollten von der verwendeten Laboranlage (12"-Laborrefiner, Typ 12 1CP, Andritz) auf eine industrielle Anlage übertragbar sein. Dies gälte es jedoch im Rahmen weiterer Untersuchungen zu überprüfen.

- Zur **Direkt-Compoundierung von Holzfasern** eignet sich ein Spritzgusscompounder mit Seitenbeschickung. Die Pelletierung der Holzfasern ermöglicht eine einfache Dosierung über die Standarddosiereinrichtung. Die Holzfasern müssen vor der Verarbeitung vorge-trocknet werden (3 h bei 80 °C). Ein Staudruck von 60 bar im Extruder und eine Verarbei-tungstemperatur von 170 °C ermöglichen eine schonende Verarbeitung der Holzfasern. Um die Verarbeitungstemperatur niedrig wählen zu können, empfiehlt sich ein leichtflie-ßender Thermoplast (z. B. Polypropylen Homopolymer HJ120UB von Borealis, MFR Wert von 75 g/10 min bei 230 °C und 2,16 kg Prüfgewicht). Zur Verbesserung der Mechanik empfiehlt sich ein Haftvermittler (z. B. Maleinsäureanhydrid gepfropftes Polypropylen Copolymer, Firma BYK Additives, Typenbezeichnung SCONA TPPP 8112 GA).
- Zur **Vlieslegung thermoplastischer Vliese mit Holzfasern** eignet sich das Airlay-Ver-fahren. Im Airlay-Verfahren empfiehlt es sich, die thermoplastische Matrix in Faserform einzubringen. Die PP-Faser des Typs E 4219 von IFG Asota mit einer Länge von 18 mm und einem Titer von 2,2 dtex eignet sich dafür. Eine Airlay-Anlage mit folgenden Einheiten ist für die Verarbeitung zu empfehlen: Faservoröffnung und Dosierung, Rüttelschachtspei-ser, Vorvliesbildner, Wirrvlieskarde mit aerodynamischer Einheit, Doppelbandofen. Durch die thermische Bindung der Materialien im Doppelbandofen (180 °C) kann das Halbzeug als Rollenware gelagert und transportiert werden, was eine Skalierung im in-dustriellen Maßstab ermöglichen würde.
- Zur Herstellung von **Hybridverbunden mit Holzfaserverstärkung** eignen sich die ent-wickelten thermoplastischen Vliese mit Holzfasern. Zur Verarbeitung können die Vliese entweder vorkonsolidiert über einen Infrarotofen oder unkonsolidiert über eine Heiz-presse erwärmt werden. Als Anspritzmaterial mit Holzfasern eignet sich sowohl ein Di-rekt-Compound als auch ein handelsübliches WPC. Bei einem Holzfaserteil von 20 Gew.-% im Anspritzmaterial können unkontrolliertes Überspritzen, Verzug und Ein-fallstellen reduziert werden. Bei der Entwicklung eines Hybridbauteils sollten Rippenge-ometrien möglichst schmal gestaltet werden. Zu empfehlen ist die Anbindung der Rippen über Radien. Bei Bauteilen mit starkem dreidimensionalen Umformgrad kann es bei ther-moplastischen Holzfaservliesen zu Problemen kommen. Die Verwendung eines Dekorv-lieses im One-Shot-Verfahren oder auch die Verwendung eines zusätzlichen Gewebes in der Mitte des Vlieses kann das Umformverhalten deutlich verbessern.



#### 7.1.4 Schlussfolgerung

Holzfasern stellen eine vielversprechende Alternative zu Naturfasern für Anwendungen in thermoplastischen Hybridverbunden dar. Im Rahmen der vergleichenden Ökobilanzierung konnte festgestellt werden, dass die Ökobilanz von Holzfasern mit Naturfasern konkurrieren kann und unter Umständen sogar Vorteile bietet.

In dieser Arbeit konnte ein grundlegender Prozess entwickelt werden, der sich zur Herstellung von thermoplastischen Hybridverbunden mit Holzfasern eignet. Holzfasern aus einem thermomechanischen Aufschlussprozess eignen sich sowohl für die Direkt-Compoundierung als auch für die Vlieslegung. Beide Wege der Weiterverarbeitung zu Hybridverbunden (über Infrarotöfen und über Heizpresse) werden als geeignet bewertet. Bei einer eventuellen Bauteilentwicklung kann je nach Stückzahl ein passender Prozess gefunden werden. Im Bezug zu dieser Anwendung sind Infrarotöfen mit deutlich geringeren Kosten verbunden als Heizpressen.

Des Weiteren konnten in dieser Arbeit grundlegende mechanische Kennwerte des Direkt-Compounds und der Hybridverbunde ermittelt werden. Ein grundlegendes Verständnis der Wirkzusammenhänge aus Prozess und Material wurde herausgearbeitet. Die Erkenntnisse können als Basis weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen dienen und Grundlage für erste Bauteilentwicklungen sein. Mit einem Direkt-Compound oder WPC ist es möglich, Hybridverbundwerkstoffe als Einstofflösung mit heimischen Rohstoffen herzustellen, da für Vliese und das Anspritzmaterial die gleiche Holzfaser verwendet werden kann. Thermoplastische Hybridverbunde mit Holzfaservliesen stellen daher eine vielversprechende Alternative zu Naturfasern in technischen semi-strukturellen Anwendungen dar. Potentielle Wachstumsmärkte für Biocomposites sind vor allem der Bausektor, der Automobilsektor sowie kleine neue Elektroautohersteller [6].

## 7.2 Summary and Conclusions

The aim of this work was the **development of thermoplastic hybrid composites with wood fiber reinforcement in terms of process and material technology**. Wood fibers were produced by a refiner using a thermo-mechanical pulping process. The fibers were directly processed by an injection molding compounder. In this work, the technique of non-woven laying was additionally used in cooperation with the company Autefa Solutions Austria GmbH (see 3 Zielsetzung und Struktur der Arbeit).

Two hypotheses were defined, which complement the current state of research. In section 2.9 (see 2.9 Zusammenfassung Stand der Forschung und Ableitung der Hypothesen), it was shown how the hypotheses are derived from the current state of research.

### 7.2.1 Hypothesis 1 (direct-compounding)

Regarding hypothesis 1 (direct-compounding), wood fibers (spruce fibers) from a thermo-mechanical pulping process (refiner) were directly compounded on an injection molding compounder, supplementing the state of the art in science and technology. The following hypothesis was investigated: **Direct compounding of polypropylene with wood fibers leads to fiber reinforcement respectively significant mechanical improvement in stiffness, strength and impact resistance compared to the base polymer without wood fibers**. It has been shown that increasing wood content leads to a significant increase in stiffness, strength and maximum impact force. The wood fibers have a reinforcing effect.

The pelletization of the wood fibers allows easy metering via the gravimetric metering device. When processed in the injection molding compounder, the wood fiber pellets dissolve into fiber bundles, individual fibers and fines and blend homogeneously into the matrix (see Abbildung 49). Thus, the notched impact strength also remains constant within the standard deviation as the wood fiber content increases (see 6.2.2 Schlagzähigkeitsprüfung). An increasing filler content also leads to an increase in density and viscosity. The lumens of the wood fibers partially fill with plastic. The density of the cell wall exceeds the density of the base polymer. Thus, the density of the composite material increases (see Abbildung 48) [7]. Investigations using computer tomography confirmed this assumption. Wood fibers with filled as well as unfilled lumens could be found (see 6.2.3).

### 7.2.2 Hypothesis 2 (hybrid composites)

Supplementing the state of the art in science and technology, the bond strength of thermoplastic hybrid composites with wood fibers was investigated for basic effects in relation to hypothesis 2.

The bond strength of non-wovens with wood fibers (spruce) and non-wovens with natural fibers (kenaf, hemp) in thermoplastic hybrid composites was determined via a head-pull test. The following hypothesis was investigated: **The bond strength of thermoplastic hybrid composites with wood fibers is influenced by process parameters, injection material and rib geometry.** It was shown that both rib geometry and process parameters (core temperature of the non-wovens) have a significant influence on the bond strength. The variation of the injection material (WPC and direct compound) had no significant influence. Thermoplastic hybrid composites with wood fiber non-wovens can compete with the natural fiber benchmark. Hybrid composites with wood fibers show slightly lower but quite comparable values [15].

The core temperature of the non-wovens strongly influences the bond strength of back-molded ribs. In unheated semifinished products, adhesion failure occurs at the interface between the rib and the non-woven. In heated non-wovens, cohesive failure occurs within the non-woven, significantly increasing the maximum pull-off force. As injection materials, a WPC was compared with a direct compound each with 20 wt.-% wood content, which showed no significant difference in terms of bond strength.

The rib geometry also has a strong influence on the bond strength. Ribs with radius transmit significantly higher stresses than ribs with foot. Both rib geometries showed higher values than the glued specimens. In each case, failure occurred within the non-woven. Consequently, the bond strength between rib and non-woven improves with back injection molding. The composite bond strength of the ribs is higher than the pure transverse tensile strength of the non-woven (glued specimens). Thus, the improvement of bond strength by back molding depends on the rib geometry.

Via microscopy and computed tomography, an increase in density below the ribs was observed. It can be seen that with the narrower ribs with radius, the injection pressure can act more concentrated on the non-woven. The increase in density below the ribs leads to a better bond. As a result, higher stresses can be transmitted. Consequently, the two back-injected ribs transmit higher stresses than the glued-on aluminum rib. In addition, the rib with radius transmits higher stresses than the rib with foot, because the injection pressure can act on a smaller area.

Complementary to hypothesis 2, the influence of the hybridization of the non-wovens on the impact behavior and their forming behavior in the hybrid process was investigated on a practical component. The hybrid process of back injection can be used for the functionalization of flat semifinished products such as non-wovens. For example, stiffening ribs and screw domes can be injected and edge areas can be formed.

It has been shown that back-injection with WPC can improve the behavior of the entire test specimen under impact loading. Back-injected non-wovens with ribs can absorb significantly higher maximum forces and penetration energies compared to non-wovens without ribs. The benchmark with natural fibers shows slightly better values in both cases compared to samples with wood fibers. The improving maximum force and energy during multiaxial impact loading are good indicators of bond strength under impact loading.

The forming behavior of the wood fiber non-wovens shows problematic areas in some cases. In some cases, cracks occurred in the area of greatest deformation. In section 6.5.4.2 (see 6.5.4.2 One-Shot-Verfahren und Optimierung des Umformverhaltens), it was shown that both the use of a decorative non-woven in the one-shot process and the use of an additional fabric in the center of the non-woven significantly improve the forming behavior.

### 7.2.3 Technical goals

A basic process for the production of thermoplastic hybrid composites with wood fiber could be developed.

- **Wood fibers** from **spruce** from a **thermo-mechanical pulping process** are suitable for both direct compounding and non-woven production. The processing parameters (160 °C, 5.2 bar saturated vapor pressure for 3 minutes, grinding disk 12XASR01) should be transferable from the laboratory plant used (12"-laboratory refiner, type 12 1CP, Andritz) to an industrial plant. However, this would need to be verified in the course of further investigations.
- An injection molding compounder with side feeding is suitable for **direct compounding of wood fibers**. The pelletization of the wood fibers enables simple metering via the standard metering device. The wood fibers must be pre-dried before processing (3 h at 80 °C). A back pressure of 60 bar in the extruder and a processing temperature of 170 °C allow gentle processing of the wood fibers. To be able to select a low processing temperature, an easy-flow thermoplastic is recommended (e.g. polypropylene homopolymer HJ120UB from Borealis, MFR value of 75 g/10 min at 230 °C and 2.16 kg test weight). To improve the mechanical properties, a coupling agent is recommended (e.g. maleic anhydride grafted polypropylene copolymer, BYK Additives company, type designation is SCONA TPPP 8112 GA).
- The **airlay process** is suitable for laying **thermoplastic non-wovens with wood fibers**. In the airlay process, it is recommended to use the thermoplastic matrix in fiber form. The

PP fiber type E 4219 from IFG Asota with a length of 18 mm and a titer of 2.2 dtex is suitable for this purpose. An air-lay system with the following units is recommended for processing: fiber pre-opening and metering, vibrating chute feeder, pre-fleece former, random card with aerodynamic unit, double belt oven. Due to the thermal bonding of the materials in the double belt oven (180 °C), the semi-finished product can be stored and transported in rolls, which would allow scaling on an industrial scale.

- For the production of **hybrid composites with wood fiber reinforcement**, the developed thermoplastic non-wovens with wood fibers are suitable. For processing, the non-wovens can be heated either pre-consolidated via an infrared oven or unconsolidated via a heating press. Both a direct compound and a commercially available WPC are suitable as injection material. With a wood fiber content of 20 wt.-% in the injection material, uncontrolled overmolding, warpage and sink marks can be reduced. When developing a hybrid component, rib geometries should be designed as narrow as possible. It is advisable to connect the ribs via radii. In components with a high degree of three-dimensional forming, thermoplastic wood fiber non-wovens can cause problems. The use of a decorative fleece in the one-shot process or even the use of an additional fabric in the center of the non-woven can significantly improve the forming behavior.

#### 7.2.4 Conclusions

Wood fibers represent an interesting alternative to natural fibers for applications in thermoplastic hybrid composites. In comparative life cycle assessment, it was found that the life cycle assessment of wood fibers can compete with natural fibers and may even offer advantages.

In this work, it was possible to develop a basic process that is suitable for the production of thermoplastic hybrid composites with wood fibers. Wood fibers from a thermo-mechanical pulping process are suitable for both direct compounding and non-woven production. Both routes for further processing into hybrid composites (via infrared oven and via heating press) are evaluated as promising. In the event of component development, a suitable process can be found depending on the number of units. In relation to this application, infrared ovens are associated with significantly lower costs than heating presses.

Furthermore, basic mechanical properties of the direct compound and the hybrid composites could be determined in this work. A basic understanding of the interactions between process and material was obtained. The findings can serve as a basis for further scientific investigations and form the basis for initial component developments. With a direct compound or WPC, it is possible to produce hybrid composites as a single-material solution with domestic raw materials, since the

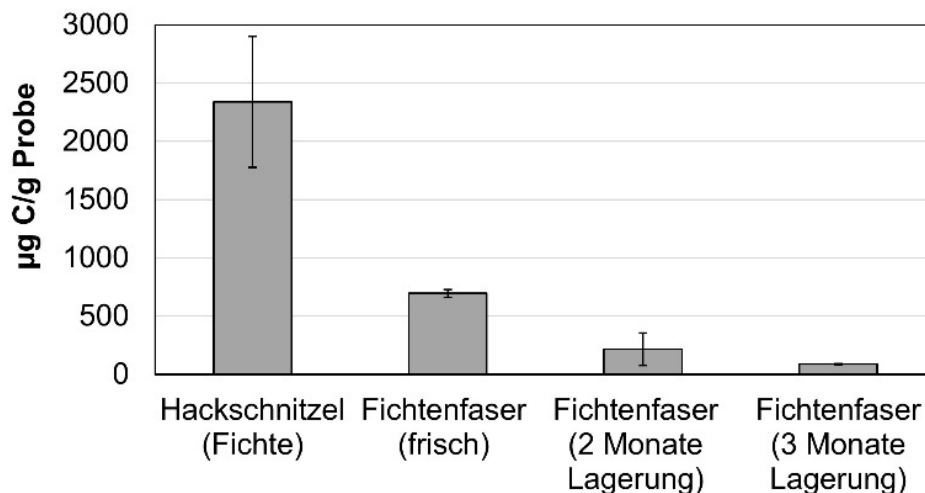
same wood fiber can be used for non-wovens and the injection material. Thermoplastic hybrid composites with wood fiber non-wovens therefore represent an interesting alternative to natural fibers in technical semi-structural applications. Potential growth markets for biocomposites are mainly the construction sector, the automotive sector and small new electric car manufacturers [6].

### 7.3 Ausblick

#### 7.3.1 Emissionen von Volatile Organic Compounds (VOCs) bei Holzfasern

In Vorversuchen wurden erste Emissionsmessungen von Volatile Organic Compounds (VOCs) von Holz, Holzfasern und Vliesstoffen mit Holzfasern ermittelt. Es sollte eine erste Einschätzung getroffen werden, ob der typische Grenzwert im Automobilinterieur von  $50 \mu\text{g C/g}$  eingehalten werden kann [145].

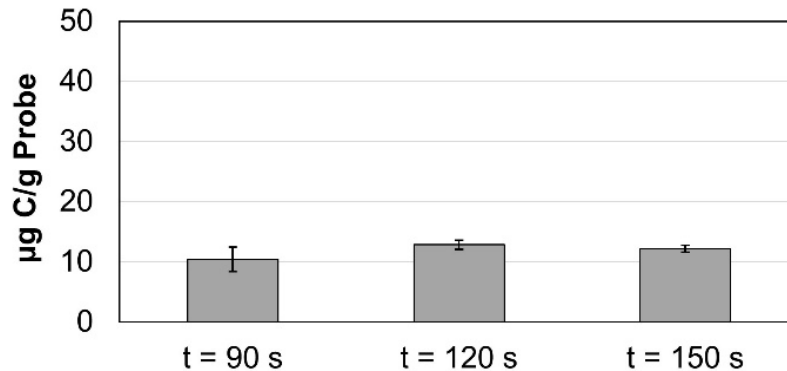
Dazu wurden zunächst unterschiedliche Holzproben nach VDA 277 gemessen. Abbildung 112 zeigt die Emissionen von frischen Hackschnitzeln aus Fichte und Fichtefasern nach unterschiedlicher Lagerdauer. Es zeigt sich ein klarer Trend, dass die Emissionen von VOCs nach der VDA 277 über den Refinerprozess und mit zunehmender Lagerdauer deutlich abnehmen. Fichtefasern nach zwei Monaten Lagerung haben einen Wert von  $(220 \pm 140) \mu\text{g C/g}$ . Nach drei Monaten Lagerung reduziert sich der Wert bereits auf  $(90 \pm 3) \mu\text{g C/g}$ .



**Abbildung 112** Erste Vorversuche zu Emissionen nach VDA 277 zur Lagerdauer von Holzfasern,  $n = 3 \pm \text{SD}$

In einem weiteren Vorversuch wurden Fichtefasern mit einer Lagerdauer von zwei Monaten händisch zu Vliesen gelegt, konsolidiert und deren Emissionen ermittelt (siehe Abbildung 113). Dabei

wurden 50 Gew.-% Holzfasern und 50 Gew.-% PP-Fasern verwendet. Es zeigt sich, dass unabhängig von der untersuchten Presszeit der kritische Grenzwert von  $50 \mu\text{g C/g}$  für das Automobilinterieur eingehalten werden kann.

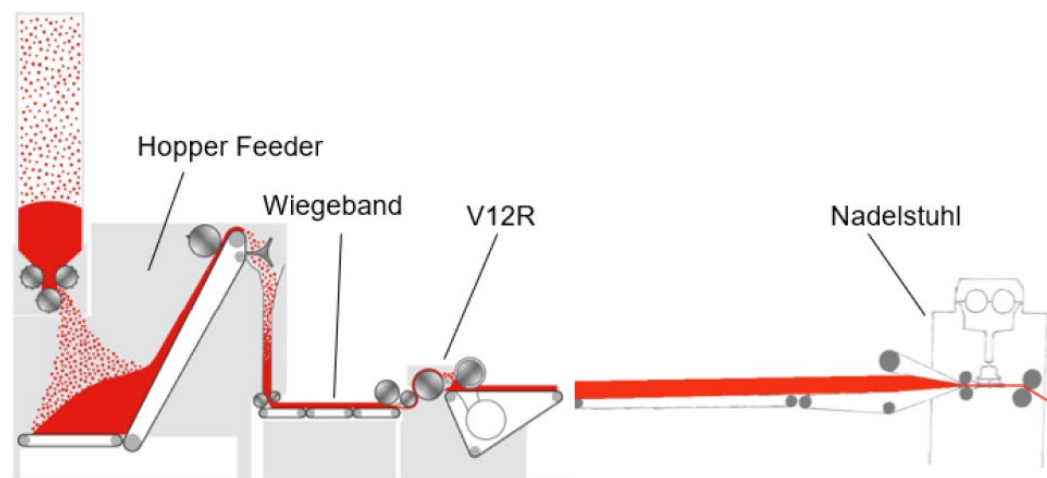


**Abbildung 113** Erste Vorversuche zu Emissionen nach VDA 277 zur Pressdauer von handlich gelegten Vliesen mit Holzfasern, 50 Gew.-% Holzfasern und 50 Gew.-% PP-Fasern, Presstemperatur  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n = 3 \pm \text{SD}$

Diese ersten Ergebnisse lassen darauf schließen, dass für Vliesstoffe mit Holzfasern nötige Emissionswerte für das Automobilinterieur erfüllbar erscheinen. Wiedl et al. geben für ein Direkt-Compound mit Polypropylen und 30 Gew.-% Fichtefasern einen Wert von  $(99,2 \pm 9,8) \mu\text{g C/g}$  an [47]. Dieser Wert wäre deutlich über dem Grenzwert. Zum besseren Verständnis der Wirkzusammenhänge müssten hierzu weitere tiefergehende Untersuchungen durchgeführt werden.

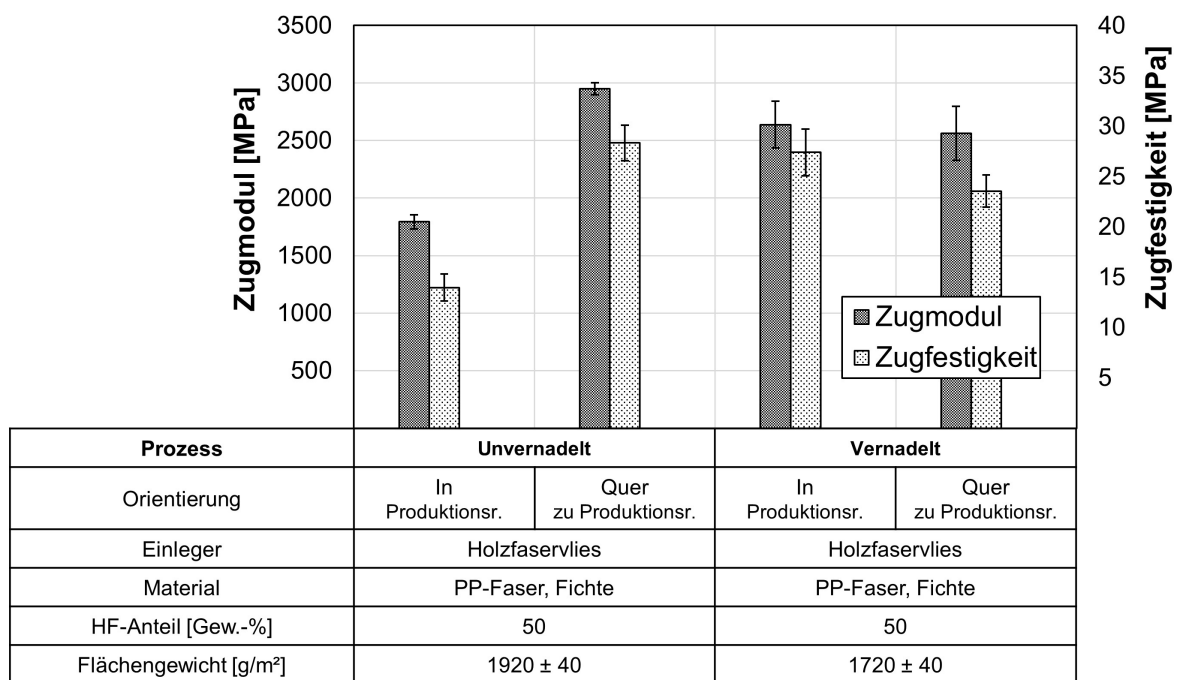
### 7.3.2 Vlieslegung mit Vernadelung

In Vorversuchen wurde die Vernadelung von Holzfaservliesen untersucht. Dazu wurde eine andere Anlagenkonfiguration als in dieser Arbeit verwendet (siehe Abbildung 35). Nachfolgende Abbildung zeigt die Anlagenkonfiguration zur Vlieslegung mit Nadelstuhl [54].



**Abbildung 114** Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus zur Vlieslegung mit Vernadelung [54]

Nachfolgende Abbildung zeigt den Vergleich von Zugmodul und Zugfestigkeit vernadelter und unvernadelter Holzfaservliese, die in dieser Arbeit verwendet wurden. Unvernadelte Vliese zeigen eine hohe Abweichung der Mechanik in und quer zur Produktionsrichtung (siehe 6.3 Vlieslegung von Holzfaservliesen mit thermoplastischer Matrix). Erste Vorversuche weisen darauf hin, dass durch die Vernadelung diese hohe Abweichung stark reduziert werden kann (siehe Abbildung 115). Die Vernadelung hat zudem den Vorteil, dass kein Doppelbandofen nötig ist, um eine Transportfähigkeit der Vliese als Rollenware zu gewährleisten. Zum besseren Verständnis der Wirkzusammenhänge und für eine optimale Anlagenkonfiguration müssten hierzu weitere tiefere Untersuchungen durchgeführt werden.



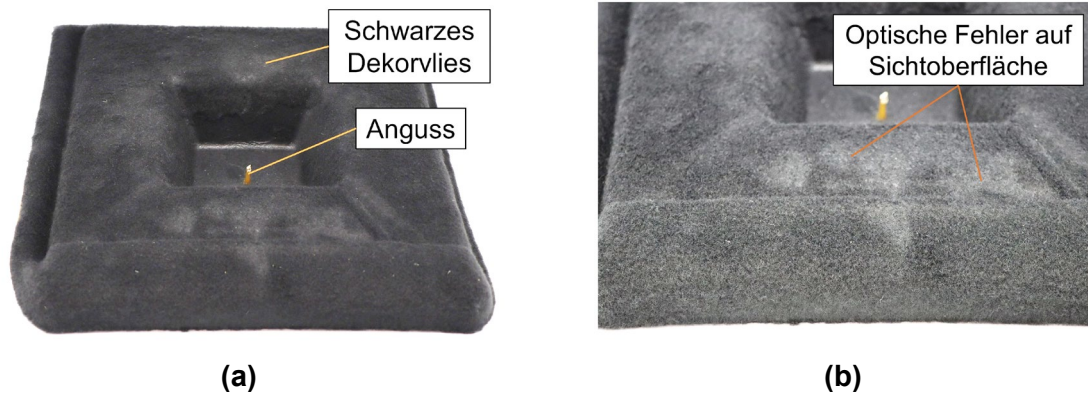
**Abbildung 115** Holzfaservlies unvernadelt und vernadelt, Prüfkörper in und quer zu Produktionsrichtung, Zugprüfung nach ISO 527-4/2

### 7.3.3 One-Shot-Verfahren

In Abschnitt 6.5.4.2 wurde bereits gezeigt, dass das One-Shot-Verfahren grundsätzlich möglich ist. Hinsichtlich einer Serienanwendung und einer eventuellen Anwendung als Sichtbauteil wären weitere tiefere Untersuchungen nötig, um das Zusammenspiel der Materialkombination, der Prozesse und der Prozessparameter eingehender zu analysieren (siehe Abbildung 116). Des Weiteren müssten klassische Anforderungen aus dem Automobilinterieur untersucht werden



(z. B. Klimawechseltests). Wie bereits im Stand der Technik gezeigt, gehen neue Trends bei Hybridverbunden mit Naturfasern in Richtung sichtbarer Naturfaseroberflächen (siehe 2.6.2 Hybridbauteile mit Holz- und Naturfasern).



**Abbildung 116** Prüfkörper mit Holzfaservlies und zusätzlichem schwarzen Dekorvlies aus Polypropylen, **(a)** Vorderseite und Sichtseite, **(b)** optische Fehler auf der Sichtseite

Aufbauend auf der Ökobilanzierung in dieser Arbeit (siehe 6.6 Ökologischer Vergleich von Natur- und Holzfasern) könnte als nächster Schritt eine umfassende vergleichende Produktbilanzierung an einem konkreten Bauteil (z. B. Türverkleidung) im industriellen Maßstab vorgenommen werden. Dabei müssten Unterschiede in den nachgelagerten Prozessen (Materialkombination, Vlieslegung, Aufheizverhalten, Hinterspritzen etc.) betrachtet werden. Es gälte unter anderem Liefer- und Transportwege mitzubersichtigen und Energieverbräuche direkt an den Maschinen während der Produktion zu ermitteln.

Bei einer Bauteilproduktion (z. B. Türverkleidung) fallen in der Regel Produktionsabfälle (z. B. Stanzabfälle) an. Diese könnten durch ein In-House-Recycling wieder in den Prozess integriert werden. Stanzabfälle der Vliesstoffe werden zu Flakes geschreddert. Flakes können in den Spritzgusscompounder zu einem gewissen Anteil zudosiert werden. Theoretisch bestünde diese Möglichkeit auch als End-of-Life-Recycling. Dies ist mit den bekannten Problemen, z. B. Verunreinigungen, verbunden. Bei Türverkleidungen ohne zusätzliche Kaschierung (Natur- oder Holzfasersichtoberflächen) ist dies allerdings denkbar.

Abschließend lässt sich sagen, dass Holzfasern eine geeignete Alternative zu Naturfasern für Anwendungen in thermoplastischen Hybridverbunden darstellen. Holzfasern ermöglichen eine Einstofflösung, die mechanischen Eigenschaften sind vielversprechend und die Ökobilanz bietet unter Umständen Vorteile (siehe 7.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen). Die in diesem Abschnitt 7.3 gezeigten Punkte, bieten diverse Ansätze, die wissenschaftlichen Untersuchungen weiterzuführen und Bauteilentwicklungen zu konkretisieren.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Bledzki, A.K.; Faruk, O.; Sperber, V.E.: Cars from Bio-Fibres; *Macromolecular Materials and Engineering*; Volume 291; S. 449-457; 2006  
<https://doi.org/10.1002/mame.200600113>
- [2] Müssig, J.: *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*; JohnWiley & Sons; Chichester; United Kingdom; 2010  
<https://doi.org/10.1002/9780470660324>
- [3] Salit, M.; Jawaid, M.; Yusoff, N.; Hoque, M.: *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*; Springer International Publishing; Basel; Switzerland; 2015  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-07944-8>
- [4] Witayakran, S.; Smitthipong, W.; Wangpradid, R.; Chollakup, R.; Clouston, P.: Natural fiber composites: Review of recent automotive trends; *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*; Volume 2; S. 166-174; 2017  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04180-1>
- [5] Noryani, M.; Sapuan, S.M.; Mastura, M.T.: Multi-criteria decision-making tools for material selection of natural fibre composites: A review; *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*; Volume 12; S. 3330-3353; 2018  
<https://doi.org/10.15282/jmes.12.1.2018.5.0299>
- [6] Partanaen, A.; Carus, M.: Biocomposites, find the real alternative to plastic – An examination of biocomposites in the market; *Reinforced Plastics*; Volume 63; S. 317-321; 2019  
<https://doi.org/10.1016/j.repl.2019.04.065>
- [7] Obermeier, F.; Schumacher, M.; Barth, S.; Karlinger, P.; Michanickl, A.; Schemme, M.; Altstädt, V.: Verstärkung von Polypropylen mit Holzfasern durch Direkt-Compoundierung; *Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology*; Volume 17; 2021; S. 87-111  
<https://doi.org/10.3139/o999.02022021>
- [8] Karimah, A.; Ridho, M.R.; Munawar, S.S.; Adi, D.S.; Ismadi; Damayanti, R.; Subiyanto, B.; Patriasari, W.; Fudholi, A.: A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations; *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 13, S. 2442-2458; 2021  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.014>
- [9] Mohd, A.; Bahiyah Baba, N.; Umor, M.Z.; Mohamed, R.M.: Composites of Polymer Blends and Their Applications Using Natural Fibres: A Review; *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; Volume 1068; 2021  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1068/1/012006>
- [10] Aisyah, H.A.; Paridah, M.T.; Sapuan, S.M.; Ilyas, R.A.; Khalina, A.; Nurazzi, N.M.; Lee, S.H.; Lee, C.H.: A Comprehensive Review on Advanced Sustainable Woven Natural Fibre Polymer Composites; *Polymers*; Volume 13; 2021  
<https://doi.org/10.3390/polym13030471>
- [11] Suriani, M.J.; Ilyas, R.A.; Zuhri, M.Y.M.; Khalina, A.; Sultan, M.T.H.; Sapuan, S.M.; Ruzaidi, C.M.; Wan, F.N.; Zulkifli, F.; Harussani, M.M.; Azman, M.A.; Radzi, F.S.M.; Sharma, S.: Critical Review of Natural Fiber Reinforced Hybrid Composites: Processing, Properties, Applications and Cost; *Polymers*; Volume 13; 2021  
<https://doi.org/10.3390/polym13203514>
- [12] Yanfeng Automotive Interiors: Press images, CHyM (compression hybrid molding) technology can reduce the weight in door panels by around 40 percent (aufgerufen am 27.07.2022) <https://www.yanfeng.com/en/press-images>

- 
- [13] Bledzki, A.K.; Sperber, V.E.; Faruk, O.: Natural and Wood Fibre Reinforcement in Polymers; Smithers Rapra Technology; 2002  
ISBN: 1859573592
- [14] Schemme, M.; Michanickl, A.; Karlinger, P.: Neue Naturfaser – Kunststoffverfahren und -werkstoffe für den Fahrzeug-, Holz- und Möbelbau; 2. Kooperationsforum „Holz als neuer Werkstoff“; Regensburg; 2015
- [15] Obermeier F.; Karlinger, P.; Schemme, M.; Altstädt, V.: Thermoplastic Hybrid Composites with Wood Fibers: Bond Strength of Back-Injected Structures; Materials; Volume 15; 2022  
<https://doi.org/10.3390/ma15072473>
- [16] N.N.: DIN 60001-1:2001-05, Textile Faserstoffe - Teil 1: Naturfasern und Kurzzeichen, 2001  
<https://dx.doi.org/10.31030/9129378>
- [17] Koplin, T.: Untersuchung der einflussgebenden Parameter bei der Compoundierung von cellulosefaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen mittels eines gleichläufigen Doppelschneckenextruders; Dissertation; Technische Universität Clausthal; 2014  
<https://doi.org/10.21268/20150507-094135>
- [18] Rosenthal, M.; Bäucker, E.; Bues, C.T.; Holzaufbau und Tränkbarkeit, Zum Einfluss der Mikrostruktur des Holzes auf das Eindringverhalten von Flüssigkeiten; Holz-Zentralblatt; Nr. 34; 2010
- [19] Sell, J.: Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten; 2. Auflage; Baufachverlag Lignum; 1997  
ISBN: 9783855652235
- [20] Ehrenstein, G.W.: Faserverbund-Kunststoffe, Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften; 2. Auflage; Carl Hanser Verlag; 2006  
ISBN: 9783446227163
- [21] Lampke, T.: Beitrag zur Charakterisierung naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe mit hochpolymerer Matrix; Dissertation; Technische Universität Chemnitz; 2001  
<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:swb:ch1-200100891>
- [22] Faruk, O.; Sain, M.: Biofiber Reinforcements in Composite Materials; 1. Auflage; Woodhead Publishing; 2014  
ISBN: 9781782421276
- [23] Blechschmidt, J.: Taschenbuch der Papiertechnik; 1. Auflage; Carl Hanser Verlag; 2010  
ISBN: 9783446419674
- [24] Barth, S.: physikalisch-technologische Untersuchungen zur Faserstofferzeugung für die Herstellung von Holzfaserdämmstoffen; Dissertation; Universität Göttingen; 2021  
<http://dx.doi.org/10.53846/goediss-8979>
- [25] Ek, M.; Gellerstedt, G.; Henriksson, G.: Pulping Chemistry and Technology; De Gruyter, 2009  
<https://doi.org/10.1515/9783110213423>
- [26] Medina, L.: Materialentwicklung und Prozessoptimierung von naturfaserverstärkten Kunststoffen mit geringem Matrixanteil für Automobilanwendungen; Dissertation; Technische Universität Kaiserslautern; 2007  
ISBN: 9783934930742
- [27] Fuchs, H.: Vliesstoffe: Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung; 2. Auflage; Wiley-VCH Verlag; 2012  
ISBN: 9783527315192
- [28] Rinberg, R.: Technologieentwicklung zur Herstellung von naturfaserverstärkten Bauteilen in Leichtbauweise unter Einsatz von Ganzpflanzenrohstoffen; Dissertation; Technische Universität Chemnitz; 2011  
<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-83282>

- [29] Bledzki, A.K.; Jaszkiwicz, A.; Murr, M.; Sperber, V.E.; Lützkendorf, R.; Reußmann, T.: Processing techniques for natural- and wood-fibre composites; In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering; Properties and Performance of Natural-Fibre Composites; Woodhead Publishing; S. 163-192; 2008  
<https://doi.org/10.1533/9781845694593.1.163>
- [30] Chuai, C.; Almdal, K.; Poulsen, L.; Plackett, D.: Conifer fibers as reinforcing materials for polypropylene-based composites; Journal of Applied Polymer Science; Volume 80, S. 2833-2841; 2001  
<https://doi.org/10.1002/app.1400>
- [31] Costa, T.H.S.; Carvalho, D.L.; Souza, D.C.S.; Coutinho, F.M.B.; Pinto, J.C.; Kokta, B.V.: Statistical experimental design and modeling of polypropylene-wood fiber composite; Polymer Testing, Volume 19; S. 419-428; 2000  
[https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(99\)00014-8](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(99)00014-8)
- [32] Coutinho, F.M.; Costa, T.H.; Carvalho, D.L.: Polypropylene-wood fiber composites: Effect of treatment and mixing conditions on mechanical properties; Journal of Applied Polymer Science; Volume 65; S. 1227-1235; 1997  
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19970808\)65:6<1227::AID-APP18>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19970808)65:6<1227::AID-APP18>3.0.CO;2-Q)
- [33] Neus Anglès, M.; Salvadó, J.; Dufresne, A.: Steam-exploded residual softwood-filled polypropylene composites; Journal of Applied Polymer Science; Volume 74; S. 1962-1977; 1999  
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19991121\)74:8<1962::AID-APP10>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19991121)74:8<1962::AID-APP10>3.0.CO;2-X)
- [34] Park, B.-D.; Balatinecz, J.J.: Short term flexural creep behavior of wood-fiber/polypropylene composites; Polymer Composites; Volume 19; p. 377-382; 1998  
<https://doi.org/10.1002/pc.10111>
- [35] Peltola, H.; Pääkkönen, E.; Jetsu, P.; Heinemann, S.: Wood based PLA and PP composites: Effect of fibre type and matrix polymer on fibre morphology, dispersion and composite properties; Composites Part A: Applied Science and Manufacturing; Volume 61; S. 13-22; 2014  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.02.002>
- [36] Schirp, A.; Stender, J.: Eigenschaften von extrudierten Holz-Kunststoff-Werkstoffen auf Basis von Refiner-(TMP-)Fasern und Hanffasern; European Journal of Wood and Wood Products; Volume 68; S. 219-231; 2010  
<https://doi.org/10.1007/s00107-009-0372-7>
- [37] Schirp, A.; Mannheim, M.; Plinke, B.: Influence of refiner fibre quality and fibre modification treatments on properties of injection-moulded beech wood-plastic composites; Composites Part A: Applied Science and Manufacturing; Volume 61; S. 245-257; 2014  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.03.003>
- [38] Bledzki, A.K.; Franciszczak, P.; Meljon, A.: High performance hybrid PP and PLA biocomposites reinforced with short man-made cellulose fibres and softwood flour; Composites Part A: Applied Science and Manufacturing; Volume 74; S. 132-139; 2015  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.03.029>
- [39] Wolcott, M.; Gacitua, W.: Morphology of wood species affecting wood-thermoplastic interaction: microstructure and mechanical adhesion; Maderas, Ciencia y tecnología; Volume 11; S. 217-231; 2009  
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2009000300005>
- [40] Schwarzkopf, M.J.; Burnard, M.D.: Wood-Plastic-Composites – Performance and Environmental Impacts; In Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts. Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes; Springer; 2016 [https://doi.org/10.1007/978-981-10-0655-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0655-5_2)

- 
- [41] Rohde-Tibitz, M.: Direct Processing of Long Fiber Reinforced Thermoplastic Composites and their Mechanical Behavior under Static and Dynamic Load; Carl Hanser Verlag; 2016  
<https://doi.org/10.3139/9781569906309.fm>
- [42] Schadhauser, M.: Spritzgießverfahren mit Endlosfasereinzug, Technologie, Modellbildung und Modellvalidierung; Dissertation; Technische Universität Dresden; 2021  
ISBN: 9783867806619
- [43] Bürkle, E.; Scheel, G.; Darnedde, L.: Verfahrenstechnik: Energieeffiziente Verarbeitung naturfaserverstärkter Kunststoffe; Kunststoffe; Ausgabe 2; 2009
- [44] Gusovius, H.J.; Wallot, G.; Schierl, S.; Rinberg, R.; Hartmann, T.; Kroll, L.; Jahn, I.: Processing of Wet Preserved Natural Fibers with Injection Molding Compounding (IMC); In Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications; RILEM Bookseries; Springer; Volume 12; 2016  
[https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1_15)
- [45] Krauss Maffei Technologies: FENAFÄ-Netzwerkverbund - Teilvorhaben 9: IMC basierte Technologien für den Einsatz von Naturfasern in innovativen Spritzgießbauteilen am Beispiel von Transportsystemen; 2014  
<https://doi.org/10.2314/GBV:862441692>
- [46] Guo, G.; Kethineni, C.: Direct injection molding of hybrid polypropylene/wood-fiber composites reinforced with glass fiber and carbon fiber; The International Journal of Advanced Manufacturing Technology; Volume 106; S. 201–209; 2020  
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04572-7>
- [47] Wiedl, S.; Karlinger, P.; Schemme, M.; List, M.; Ruckdäschel, H.: Comparison of Melting Processes for WPC and the Resulting Differences in Thermal Damage, Emissions and Mechanics; Materials; Volume 15; 2022  
<https://doi.org/10.3390/ma15093393>
- [48] Nygård, P.; Tanem, B.S.; Karlsen, T.; Brachet, P.; Leinsvang, B.: Extrusion-based wood fibre-PP composites: Wood powder and pelletized wood fibres – a comparative study; Composites Science and Technology; Volume 68; S. 3418-3424; 2008  
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.09.029>
- [49] Carus, M.; Partanen, A.: BIOVERBUNDWERKSTOFFE Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) und Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC); Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR); 3. Auflage; 2019
- [50] Mertens, O.; Gurr, J.; Krause, A.: The utilization of thermomechanical pulp fibers in WPC: A review; Journal of Applied Polymer Science; Volume 134; 2017  
<https://doi.org/10.1002/app.45161>
- [51] Borealis AG: Technisches Datenblatt Polypropylen BE 170 MO; 2013
- [52] Figueiro, R.; Rana, S.: Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications; RILEM Bookseries; Springer; 2016  
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-7515-1>
- [53] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe, Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung; 2. Auflage; Carl Hanser Verlag; 2014  
ISBN: 9783446436961
- [54] Schumacher, M.: Untersuchungen zur Konsolidierung von thermoplastischen Holzfaservliesstoffen; Masterarbeit; TH Rosenheim; 2022
- [55] Hossain, T.; Hasan, R.; Sarker, E.; Syduzzaman, Md.: Development and characterization of jute/cotton blended non-woven green composite fabric via the dry-laid web forming technique; SSRN; 2022  
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4107954>

- [56] Pourdeyhimi, B.; Maze, B.; Farukh, F.; Silberschmidt, V.V.: 4 - Nonwovens—Structure-process-property relationships; In *The Textile Institute Book Series, Structure and Mechanics of Textile Fibre Assemblies*; 2. Edition; Woodhead Publishing; 2019  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102619-9.00004-3>
- [57] Kenned, J.J.; Sankaranarayanan, K.; Binoj, J.S.; Chelliah, S.K.: Thermo-mechanical and morphological characterization of needle punched non-woven banana fiber reinforced polymer composites; *Composites Science and Technology*; Volume 185; 2020  
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107890>
- [58] Faruk, O.; Bledzki, A.K.; Fink, H.P.; Sain, M.: Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010; *Progress in Polymer Science*; Volume 37; 2012  
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- [59] Bledzki, A.K.; Franciszczak, P.; Osman, Z.; Elbadawi, M.: Polypropylene biocomposites reinforced with softwood, abaca, jute, and kenaf fibers; *Industrial Crops and Products*; Volume 70; 2015  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.013>
- [60] Medina, L.A.; Dzalto, J.: 1.11 Natural Fibers; *Comprehensive Composite Materials II*, S. 269-294; 2018  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09877-5>
- [61] Huda, M.S.; Drzal, L.T.; Ray, D.; Mohanty, A.K., Mishra, M.: 7 - Natural-fiber composites in the automotive sector; In *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering; Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*; Woodhead Publishing; S. 221-268; 2008  
<https://doi.org/10.1533/9781845694593.2.221>
- [62] Englund, K.R.; Wolcott, M.P.; Hermanson, J.C.: The compression of wood/thermoplastic fiber mats during consolidation; *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*; Volume 35; S. 273–279; 2004  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2002.12.001>
- [63] Klusmaier, B.: Einsatz von Naturfasern im Innenraum eines Autos - Status und Entwicklung; Einsatz von biobasierten Werkstoffen im Automobilbereich; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR); Wolfsburg; 2012
- [64] Franciszczak, P.; Kalnins, K.; Bledzki, A.K.: Hybridisation of man-made cellulose and glass reinforcement in short-fibre composites for injection moulding – Effects on mechanical performance; *Composites Part B: Engineering*; Volume 145; S. 14-27; 2018  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.03.008>
- [65] Hausmann, J.: 22nd Symposium on Composites; Trans Tech Publications; Key Engineering Materials; Volume 809; 2019  
ISBN 9783035714531
- [66] Buschbeck, S.; Tautenhain, F.; Reichelt, C.; Rinberg, R.; Kroll, L. Composite materials made of basalt fibres and biobased matrix material for technical applications; *Key Engineering Materials*; Volume 809; S. 639–644; 2019  
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.809.639>
- [67] Saleem, A.; Medina, L.; Skrifvars, M.; Berglin, L.: Hybrid Polymer Composites of Bio-Based Bast Fibers with Glass, Carbon and Basalt Fibers for Automotive Applications - A Review; *Molecules*; Volume 25; 2020  
<https://doi.org/10.3390/molecules25214933>
- [68] Graupner, N.; Sarasini, F.; Müssig, J.: Ductile viscose fibres and stiff basalt fibres for composite applications – An overview and the potential of hybridisation; *Composites Part B: Engineering*; Volume 194; 2020  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108041>

- [69] Mohanty, A.K.; Misra, M.; Hinrichsen, G.: Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview; *Macromolecular Materials and Engineering*; Volume 276-277; S. 1-24; 2000  
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1439-2054\(20000301\)276:1<::AID-MAME1>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1439-2054(20000301)276:1<::AID-MAME1>3.0.CO;2-W)
- [70] Robledo-Ortíz, J.R.; Martín del Campo, A.S.; Blackaller, J.A.; González-López, M.E.; Pérez Fonseca, A.A.: Valorization of Sugarcane Straw for the Development of Sustainable Biopolymer-Based Composites; *Polymers*; Volume 13; 2021  
<https://doi.org/10.3390/polym13193335>
- [71] Jamadi, A.H.; Razali, N.; Petru, M.; Taha, M.M.; Muhammad, N.; Ilyas, R.A.: Effect of Chemically Treated Kenaf Fibre on Mechanical and Thermal Properties of PLA Composites Prepared through Fused Deposition Modeling (FDM); *Polymers*; Volume 13; 2021  
<https://doi.org/10.3390/polym13193299>
- [72] Temesgen, S.; Rennert, M.; Tesfaye, T.; Nase, M.: Review on Spinning of Biopolymer Fibers from Starch; *Polymers*; Volume 13; 2021  
<https://doi.org/10.3390/polym13071121>
- [73] Olkhov, A.A.; Mastalygina, E.E.; Ovchinnikov, V.A.; Monakhova, T.V.; Vetcher, A.A.; Iordanskii, A.L.: Thermo-Oxidative Destruction and Biodegradation of Nanomaterials from Composites of Poly(3-hydroxybutyrate) and Chitosan; *Polymers*; Volume 13; 2021  
<https://doi.org/10.3390/polym13203528>
- [74] Glaskova-Kuzmina, T.; Starkova, O.; Gaidukovs, S.; Platnieks, O.; Gaidukova, G.: Durability of Biodegradable Polymer Nanocomposites; *Polymers*; Volume 13; 2021  
<https://doi.org/10.3390/polym13193375>
- [75] Khoshnava, S.M.; Rostami, R.; Ismail, M.; Rahmat, A.R.; Ogunbode, B.E.: Woven hybrid Biocomposite: Mechanical properties of woven kenaf bast fibre/oil palm empty fruit bunches hybrid reinforced poly hydroxybutyrate biocomposite as non-structural building materials; *Construction and Building Materials*; Volume 154; S. 155-166; 2017  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.189>
- [76] Ailenei, E.C.; Ionesi, S.D.; Dulgheriu, I.; Loghin, M.C.; Isopescu, D.N.; Maxineasa, S.G.; Baci, I.-R.: New Waste-Based Composite Material for Construction Applications; *Materials*; Volume 14; 2021  
<https://doi.org/10.3390/ma14206079>
- [77] Harussani, M.M.; Sapuan, S.M.; Rashid, U.; Khalina, A.: Development and Characterization of Polypropylene Waste from Personal Protective Equipment (PPE)-Derived Char-Filled Sugar Palm Starch Biocomposite Briquettes; *Polymers*; Volume 13; 2021  
<https://doi.org/10.3390/polym13111707>
- [78] Syuhada, D.N.; Azura, A.R.: Waste Natural Polymers as Potential Fillers for Biodegradable Latex-Based; *Composites: A Review*; *Polymers*; Volume 13; 2021  
<https://doi.org/10.3390/polym13203600>
- [79] Mohd Basri, M.S.; Abdul Karim Shah, N.N.; Sulaiman, A.; Mohamed Amin Tawakkal, I.S.; Mohd Nor, M.Z.; Ariffin, S.H.; Abdul Ghani, N.H.; Mohd Salleh, F.S.: Progress in the Valorization of Fruit and Vegetable Wastes: Active Packaging, Biocomposites, By-Products, and Innovative Technologies Used for Bioactive Compound Extraction; *Polymers*; Volume 13; 2021  
<https://doi.org/10.3390/polym13203503>
- [80] Menzel, C.: Technologieentwicklung zur großserientauglichen Herstellung automobiler Interieur-Bauteile in neuartiger Sandwichbauweise; *Dissertation*; Technische Universität Chemnitz; 2020  
<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-710465>
- [81] Ayrimis, N.; Akbulut, T.; Dundar, T.; White, R.H.; Mengeloglu, F.; Buyuksari, U.; Candan, Z.; Avci, E.: Effect of boron and phosphate compounds on physical, mechanical, and fire

- properties of wood–polypropylene composites; *Construction and Building Materials*; Volume 33; S. 63-69; 2012  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.013>
- [82] Renner, J.S.; Mensah, R.A.; Jiang, L.; Xu, Q.; Das, O.; Berto, F.: Fire Behavior of Wood-Based Composite Materials; *Polymers*; Volume 13; 2021  
<https://doi.org/10.3390/polym13244352>
- [83] Saba, N.; Jawaid, M.; Alothman, O. Y.; Inuwa, I. M.; Hassan, A.: A review on potential development of flame retardant kenaf fibers reinforced polymer composites; *Polymers for Advanced Technologies*; Volume 28; S. 424-434; 2016  
<https://doi.org/10.1002/pat.3921>
- [84] Hu, W.; Zhang, Y.; Qi, Y.; Wang, H.; Liu, B.; Zhao, Q.; Zhang, J.; Duan, J.; Zhang, L.; Sun, Z.; Liu, B.: Improved Mechanical Properties and Flame Retardancy of Wood/PLA All-Degradable Biocomposites with Novel Lignin-Based Flame Retardant and TGIC; *Macromolecular Materials and Engineering*; Volume 305; 2020  
<https://doi.org/10.1002/mame.201900840>
- [85] Pingulkar, H.; Mache, A.; Munde, Y.; Siva, I.: A comprehensive review on drop weight impact characteristics of bast natural fiber reinforced polymer composites; *Materials Today: Proceedings*; Volume 44; S. 3872-3880; 2021  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.925>
- [86] Koffi, A.; Koffi, D.; Toubal, L.: Mechanical properties and drop-weight impact performance of injection-molded HDPE/birch fiber composites; *Polymer Testing*; Volume 93; 2021  
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106956>
- [87] Md Shah, A.U.; Hameed Sultan, M.T.; Safri, S.N.A.: Experimental Evaluation of Low Velocity Impact Properties and Damage Progression on Bamboo/Glass Hybrid Composites Subjected to Different Impact Energy Levels; *Polymers*; Volume 12; 2020  
<https://doi.org/10.3390/polym12061288>
- [88] Puech, L.; Ramakrishnan, K.R.; Le Moigne, N.; Corn, S.; Slangen, P.R.; Le Duc, A.; Boudhani, H.; Bergeret, A.: Investigating the impact behaviour of short hemp fibres reinforced polypropylene biocomposites through high speed imaging and finite element modelling; *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*; Volume 109; 2018  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.03.013>
- [89] Clemons, C.: Elastomer modified polypropylene–polyethylene blends as matrices for wood flour–plastic composites; *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*; Volume 41; 2010  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.07.002>
- [90] Huber, T.; Bickerton, S.; Müssig, J.; Pang, S.; Staiger, M.P.: Flexural and impact properties of all-cellulose composite laminates; *Composites Science and Technology*; Volume 88; S. 92-98; 2013  
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.08.040>
- [91] Zhang, X.; Li, T.T.; Peng, H.K.; Wang, Z.; Hou, J.; Lou, C.W.; Lin, J.H.: Synergistic Effects of Needle Punching and Shear-Thickening Fluid on Sandwich-Structured Composites Made of Nonwoven and Woven Fabrics; *Fibers and Polymers*; Volume 21; 2020  
<https://doi.org/10.1007/s12221-020-9967-8>
- [92] Cheng, T.S.; Uy Lan, D.N.; Leng, T.P.; Ngoc, T.L.Q.: Falling Weight Impact Properties of Palm Shell Reinforced Palm Oil-Based Polyurethane Bio-Composite Sandwich; *Macromolecular Symposia*; Volume 371; S. 50-57; 2017  
<https://doi.org/10.1002/masy.201600037>



- 
- [93] Ehrenstein, G.W.; Amesöder, S. Fernández Díaz, L.; Niemann, H.; Deventer, R.: Werkstoff- und prozessoptimierte Herstellung flächiger Kunststoff-Kunststoff und Kunststoff-Metall-Verbundbauteile; Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile; Tagungsband zum Berichts- und Industriekolloquium 2003 des SFB 396; 2003
- [94] Schemme, M.: Langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT): "...Hype or Hope..." ein Statusbericht; 26. Technomer; Technische Universität Chemnitz; 2019  
ISBN: 9783939382140
- [95] Schemme, M.: LFT – development status and perspectives; Reinforced Plastics; Volume 52; S. 32-34, 36-39; 2008  
[https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(08\)70036-5](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(08)70036-5)
- [96] Hummel, S.; Obermeier, K.; Zier, K.; Schemme, M.; Krommes, S.; Karlinger, P.: Closed-Loop Recycling von Organoblechen im Hybridverbund - Technische, wirtschaftliche und ökologische Betrachtung; 27. Technomer; Technische Universität Chemnitz; 2021  
ISBN: 9783939382157
- [97] Hummel, S.; Schemme, M.; Karlinger, P.: GmbH – Glasfaserhybride mit bester Haftung: Variotherme Temperierung für Organobleche; Plastverarbeiter; Ausgabe 07; 2019
- [98] Luinge, H.; Warnet, L.L.: On an application of multi-material composite laminates in the aerospace sector; Advanced Composites and Hybrid Materials; Volume 3; S. 294–302; 2020  
<https://doi.org/10.1007/s42114-020-00163-3>
- [99] Kiss, P.; Stadlbauer, W.; Burgstaller, C.; Stadler, H.; Fehringer, S.; Haeuserer, F.; Archodoulaki, V.-M.: In-house recycling of carbon- and glass fibre-reinforced thermoplastic composite laminate waste into high-performance sheet materials; Composites Part A: Applied Science and Manufacturing; Volume 139; 2020  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106110>
- [100] Vincent, G.A.; De Brujn, T.A.; Wijskamp S.; Van Drongelen, M.; Akkerman, R.: Process- and material-induced heterogeneities in recycled thermoplastic composites; Journal of Thermoplastic Composite Materials; 2020  
<https://doi.org/10.1177/0892705720979347>
- [101] Evens, T.; Bex, G.-J.; Yigit, M.; De Keyzer, J.; Desplentere, F.; Van Bael, A.: The Influence of Mechanical Recycling on Properties in Injection Molding of Fiber-Reinforced Polypropylene; International Polymer Processing; Volume 34, S. 398-407; 2019  
<https://doi.org/10.3139/217.3770>
- [102] Hummel, S.; Obermeier, K.; Zier, K.; Krommes, S.; Schemme, M.; Karlinger, P.: Analysis of Mechanical Properties Related to Fiber Length of Closed-Loop-Recycled Offcuts of a Thermoplastic Fiber Composites (Organo Sheets); Materials; Volume 15; 2022  
<https://doi.org/10.3390/ma15113872>
- [103] Dzalto, J.: Entwicklung eines großserientauglichen Aufheizprozesses für naturfaserverstärkte Kunststoffe; Dissertation; Technische Universität Kaiserslautern; 2018  
urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-53183
- [104] VDI Wissensforum: Plastics in Automotive Engineering 2017; Band 4348; 1. Auflage; 2017  
<https://doi.org/10.51202/9783182443483>
- [105] Hugo Stiehl GmbH Kunststoffverarbeitung: FENAFa-Netzwerkverbund - Teilvorhaben 7: oberflächenendbearbeitete naturfaserverstärkte Bauteile für Kfz-Innenverkleidungen unter Verwendung komplexer Spritzgießtechnologien; 2014  
<https://doi.org/10.2314/GBV:862406323>
- [106] Klusmaier, W.; Schafmeister, A.: Hybride Spritzguss-Technologien, Fertigungsverfahren für leichte Türinnenverkleidungen; Plastverarbeiter; 2014

- [107] Heßner, S.; Lehmann, K.; Jahn, I.; Zschehyge, M.; Rinberg, R.; Buschbeck, S.; Bergert, M.; Ohlzen-Wendy, A.; Bondarik, S.: Naturfaserverstärkte Biokunststoffverbunde und innovative Herstellungsverfahren für Leichtbauhybridformteile mit hohen Struktur- und Sicherheitsanforderungen; 27. Technomer; Technische Universität Chemnitz; 2021  
ISBN: 9783939382157
- [108] Bravo, S. F.: Innovation close to the market in automotive composites; EuPC Annual Meeting; Automotive & Transportation Forum; Brüssel; 2014
- [109] Schill, L.: Composites Technologies for Lightweight Future; Frimo Sontra; 2018
- [110] Yanfeng Automotive Interiors: Press images, The instrument panel is based on a lightweight support structure which replaces the plastic substrate with a natural fiber mat, lowering the weight of the support structure alone up to 20 percent (aufgerufen am 27.07.2022)  
<https://www.yanfeng.com/en/press-images>
- [111] Faurecia: Recycled Carbon Fiber NFPP (RCF NFPP); JEC Composites Connect; 2021
- [112] Ouali, A.A.; Rinberg, R.; Nendel, W.; Kroll, L.; Richter, A.; Spange, S.; Siegel, C.; Buchelt, B.; Wagenführ, A.: New biocomposites for lightweight structures and their processes; Materials Science Forum; Volumes 825–826; S. 1055–1062; 2015  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.1055>
- [113] Ouali, A.A.; Rinberg, R.; Kroll, L.; Nendel, W.; Todorov, A.; Cebulla, H.: Natural fibre reinforced bioplastics-innovative semifinished products for series production; Key Engineering Materials; Volume 742; S. 255–262; 2017  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.742.255>
- [114] Ouali, A.A.; Rinberg, R.; Nendel, W.; Kroll, L.; Siegel, C.; Buchelt, B.; Wagenführ, A.; Trommler, K.; Schreiter, K.; John, R.; Spange, S.: Natural unidirectional sheet processes for fibre reinforced bioplastics; AIP Conference Proceedings; Volume 1914; 2017  
<https://doi.org/10.1063/1.5016725>
- [115] Schmiedel, I.; Barfuss, G.S.; Nickel, T.; Pfeufer, L.: Einsatz sichtbarer Naturfasern im Fahrzeuginterieur; ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift; Ausgabe 06; 2014
- [116] Yanfeng Automotive Interiors: Press images, A lightweight interior solution with visible natural fibers that create a green, eco-friendly look and feel in the interior that enhances the consumer experience and provides vehicle differentiation (aufgerufen am 27.07.2022)  
<https://www.yanfeng.com/en/press-images>
- [117] Malviya, R.K.; Singh, R.K.; Purohit, R.; Sinha, R.: Natural fibre reinforced composite materials: Environmentally better life cycle assessment – A case study; Materials Today: Proceedings; Volume 26; 2020  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.651>
- [118] Corbière-Nicollier, T.; Gfeller Laban, B.; Lundquist, L.; Leterrier, Y.; Månson, A.E.; Jolliet, O.: Life cycle assessment of biofibres replacing glass fibres as reinforcement in plastics; Resources, Conservation and Recycling; Volume 33; S. 267-287; 2001  
[https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00089-1)
- [119] Joshi, S.V.; Drzal, L.T.; Mohanty, A.K.; Arora, S.: Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?; Composites Part A: Applied Science and Manufacturing; Volume 35; S. 371-376; 2004  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>
- [120] Xu, X.; Jayaraman, K.; Morin, C.; Pecqueux, N.: Life cycle assessment of wood-fibre-reinforced polypropylene composites; Journal of Materials Processing Technology; Volume 198; S. 168-177; 2008  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.087>
- [121] Sommerhuber, P.F.; Wenker, J.L.; Rüter, S.; Krause, A.: Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental

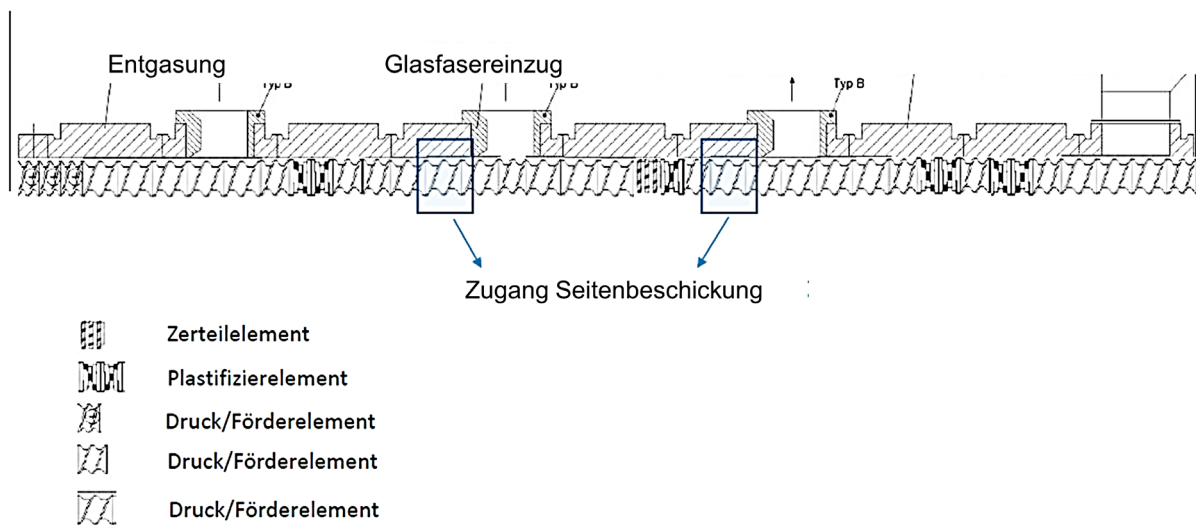
- sound end-of-life option; *Resources, Conservation and Recycling*; Volume 117; S. 235-248; 2017  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.012>
- [122] Verband der Automobilindustrie: VDA 277, Nichtmetallische Werkstoffe der Kfz-Innenausstattung - Bestimmung der Emission organischer Verbindungen; Version 01; 1995
- [123] Kürschner, K.; Melcerová, A.: Über die chemischen Veränderungen des Buchenholzes bei thermischer Behandlung. Teil I. Chemische Veränderungen von Sägespänen bei 1-28 tägiger Erhitzung auf 80-160° C; Volume 19; *Holzforschung*; S. 161-171; 1965  
<https://doi.org/10.1515/hfsg.1965.19.6.161>
- [124] Sandermann, W.; Augustin, H.: Chemische Untersuchungen über die thermische Zersetzung von Holz—Zweite Mitteilung: Untersuchungen mit Hilfe der Differential-Thermoanalyse; *Holz als Roh- und Werkstoff*; Volume 21; S. 305–315; 1963  
<https://doi.org/10.1007/BF02610964>
- [125] Kollmann, F.; Fengel, D.: Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Holz durch thermische Behandlung; *Holz als Roh- und Werkstoff*; Volume 23; S. 461–468; 1965  
<https://doi.org/10.1007/BF02627217>
- [126] Wienhaus, O.: Modifizierung des Holzes durch eine milde Pyrolyse - abgeleitet aus den allgemeinen Prinzipien der Thermolyse des Holzes. *Roh- und Werkstoff Holz*; *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*; Jahrgang 48, Nr. 2; S. 17-22; 1999  
ISSN: 0043-6925
- [127] Esteves B.M.; Pereira H.M.: Wood modification by heat treatment: A review; *Biore-sources*; Volume 4; S. 370-404; 2009  
<https://doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404>
- [128] Poncsak, S.; Kocafe, D.; Simard, F.; Pichette, A.: Evolution of Extractive Composition During Thermal Treatment of Jack Pine; *Journal of Wood Chemistry and Technology*; Volume 29; S. 251-264; 2009  
<https://doi.org/10.1080/02773810902928582>
- [129] Culleré, L.; Fernández de Simón, B.; Cadahía, E.; Ferreira, V.; Hernández-Orte, P.; Cacho, J.: Characterization by gas chromatography–olfactometry of the most odor-active compounds in extracts prepared from acacia, chestnut, cherry, ash and oak woods; *LWT - Food Science and Technology*; Volume 53; S. 240-248; 2013  
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.02.010>
- [130] Borealis AG: Technisches Datenblatt Polypropylen HJ 120 UB; 2015
- [131] BYK-Chemie GmbH: Technisches Datenblatt SCONA TPPP 8112 GA, Haftungsmodifikator für TPE-S-Overmolding Compounds sowie Koppler für Naturfasercompounds in Polypropylen; 2013
- [132] IFGAsota GmbH: Technisches Datenblatt E4219; 2015
- [133] Autefa Solutions Austria GmbH: Aerodynamic Web Forming; 2018
- [134] N.N.: DIN EN ISO 6603-2:2002-04; *Kunststoffe - Bestimmung des Durchstoßverhaltens von festen Kunststoffen - Teil 2: Instrumentierter Schlagversuch*; Deutsche Fassung EN ISO 6603-2:2000
- [135] Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B.: The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology; *The International Journal of Life Cycle Assessment*; Volume 21; S. 1218–1230; 2016  
<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- [136] Fengel, D.; Wegener, D.: *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*; Verlag Kessel; 2003  
ISBN: 3935638396

- 
- [137] Plinke, B.; Benthien, J.; Krause, A.; Klein, K.; Schirp, A.; Teuber, L.: Optische Größenvermessung von Holzpartikeln für die WPC-Herstellung – Vergleich dreier Messverfahren; Holztechnologie; Volume 57; S. 43-50; 2016
- [138] Imken, A.A.P.; Plinke, B.; Mai, C.: Characterisation of hardwood fibres used for wood fibre insulation boards (WFIB); European Journal of Wood and Wood Products; Volume 79; S. 915–924; 2021  
<https://doi.org/10.1007/s00107-021-01698-y>
- [139] N.N.: DIN EN ISO 179-2:2012-06; Kunststoffe - Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften - Teil 2: Instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung; Deutsche Fassung EN ISO 179-2:1999 + A1:2012
- [140] Schröder, T.: Rheologie der Kunststoffe, Theorie und Praxis; Carl Hanser Verlag; 2018  
ISBN: 9783446454057
- [141] Autefa Solutions Austria GmbH: Aerodynamic Web Forming Airlay Futura; 2021
- [142] Dzalto, J.; Medina, L.A.; Leppert, A.; Mitschang, P.: Naturfasern sanft erwärmt, Prozessoptimierung durch den Einsatz von Organoblechen aus naturfaserverstärktem Polypropylen (NFPP); Kunststoffe; Ausgabe 10; 2014
- [143] Klöpffer, W.; Grahl, B.: Life cycle assessment (LCA). A guide to best practice; Wiley-VCH; 2014  
ISBN: 9783527329861
- [144] Álvarez-del-Castillo, M.D.; Garrido-Soriano, N.; Casadesús, M.; Macanás, J.; Molins-Durán, G.; Carrillo-Navarrete, F.: Environmental Impact of Chicken Feathers Based Polypropylene Composites Developed for Automotive and Stationary Applications and Comparison with Glass-Fibre Analogues; Waste and Biomass Valorization; 2022  
<https://doi.org/10.1007/s12649-022-01810-0>
- [145] Stadler, F.: Emissionsanalyse von thermoplastischen Holzfaservliesen; Masterarbeit; TH Rosenheim; 2022

## Anhang

### Anhang A: Schneckenkonfiguration (KM 300 CX IMC)

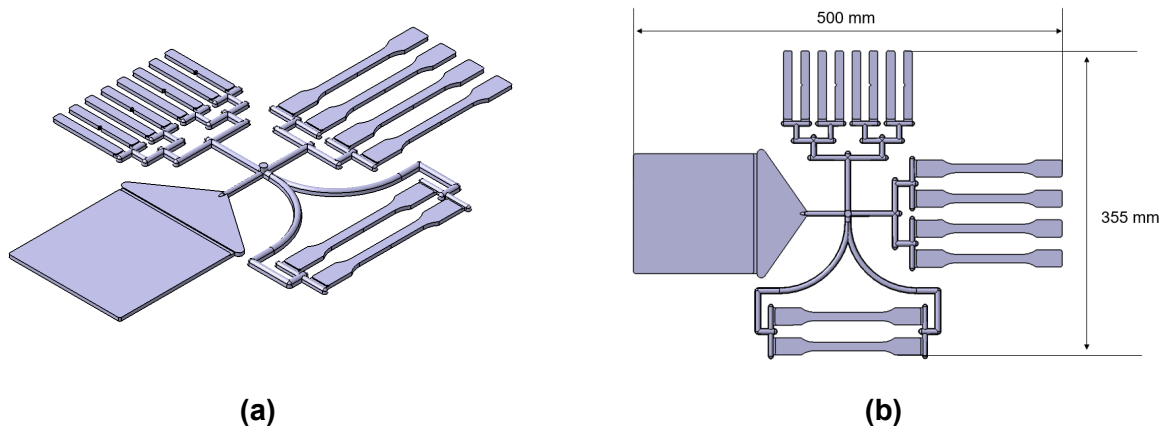
Nachfolgende Darstellung zeigt die verwendete Schneckenkonfiguration. Genauere Details stehen bei der Technischen Hochschule Rosenheim auf Anfrage zur Verfügung.



**Abbildung 117** Schneckenkonfiguration zur Direkt-Compoundierung von Polypropylen und Holzfasern

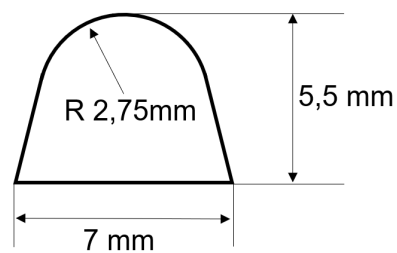
## Anhang B: Multiprüfkörperbauteil

Nachfolgende Darstellung zeigt das verwendete Multiprüfkörperbauteil. Genauere Details sowie CAD-Daten stehen bei der Technischen Hochschule Rosenheim auf Anfrage zur Verfügung.



**Abbildung 118** Multiprüfkörperbauteil, (a) isometrische Ansicht, (b) Außenmaße

Nachfolgende Abbildung zeigt eine schematische Schnittdarstellung des Angusses.



**Abbildung 119** Schnittdarstellungen des Angusses des Multiprüfkörperbauteils

## Anhang C: Infrarotofen und Handlingrahmen

Nachfolgende Abbildungen zeigen den Infrarotofen und den Handlingrahmen. Das erste Bild zeigt den Infrarotofen mit ausgefahrener Schiene zum Einhängen des Handlingrahmens mit Naturfasereinleger. Das zweite Bild zeigt den Handlingrahmen mit Einleger in der Aufheizposition.



(a)



(b)

**Abbildung 120** Infrarotofen und Handlingrahmen, (a) Infrarotofen mit ausgefahrener Schiene zum Einhängen des Handlingrahmens, (b) Handlingrahmen in der Aufheizposition

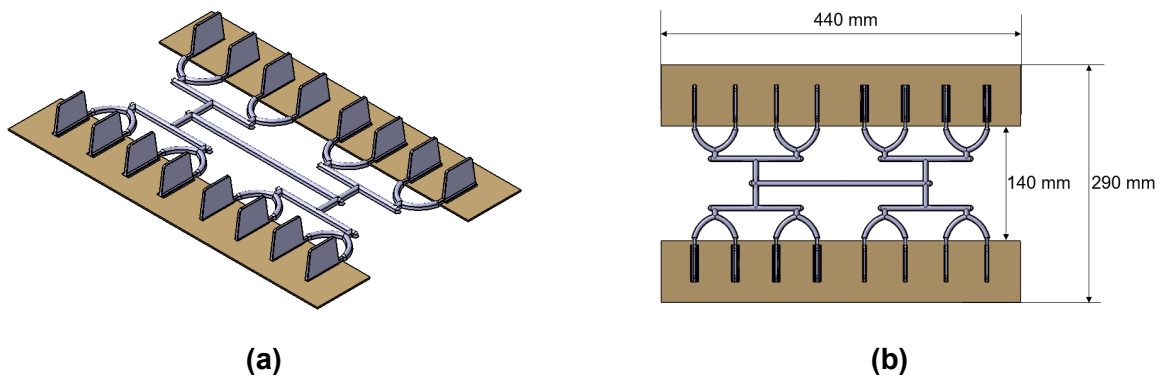
## Anhang D: Handlingrahmen im Werkzeug und Hybridbauteil zur Untersuchung der Verbundhaftung

Nachfolgende Darstellung zeigt den verwendeten Handlingrahmen und das Werkzeug. Mit Hilfe des Handlingrahmen konnten die Einleger im Spritzgusswerkzeug positioniert werden. Genauere Details sowie CAD-Daten stehen bei der Technischen Hochschule Rosenheim auf Anfrage zur Verfügung.



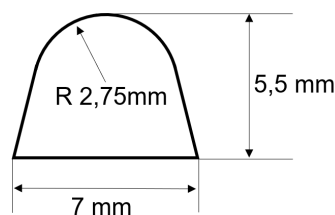
**Abbildung 121** Handlingrahmen mit Naturfasereinleger im Werkzeug

Nachfolgende Darstellung zeigt das verwendete Hybridbauteil. Genauere Details sowie CAD-Daten stehen bei der Technischen Hochschule Rosenheim auf Anfrage zur Verfügung.



**Abbildung 122** Hybridbauteil, (a) isometrische Ansicht, (b) Außenmaße

Nachfolgende Abbildung zeigt eine schematische Schnittdarstellung des Angusses.



**Abbildung 123** Schnittdarstellungen des Angusses des Hybridbauteils



## Anhang E: Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Türverkleidung aus dem Automobilinterieur, Naturfaservlies mit hinterspritzten Strukturen, Bild von Yanfeng Automotive Interiors [12] .....	1
Abbildung 2	Zur prozess- und materialtechnischen Entwicklung thermoplastischer Hybridverbunde mit Holzfaserverstärkung sind drei Technologien relevant: Refiner, Vlieslegung und Spritzgusscompounder .....	2
Abbildung 3	Direkt-Compoundierung von Holzfasern und Polypropylen, (a) Polypropylengranulat (hinten), Fichtefasern aus einem thermo-mechanischen Aufschlussprozess mit Refiner (mittig), Zugprüfstab und Kerbschlagbiegeprüfstab aus Polypropylen mit 20 Gew.-% Fichte (vorne) über Spritzgusscompounder direkt compoundiert [7], (b) schematische Darstellung, ist eine Faserverstärkung möglich? .....	3
Abbildung 4	Thermoplastische Hybridverbunde mit Holzfasern, (a) Prüfkörper zur Untersuchung der Verbundhaftung im Kopf-Zug-Versuch, Holzfaservlies mit angespritzten Rippen aus direkt-compoundierten Holzfasern mit Polypropylen, (b) schematische Darstellung, wie ist die Verbundhaftung und wie wird diese beeinflusst? .....	4
Abbildung 5	Einteilung technischer Fasern nach Ursprung und Gewinnung auf Basis der DIN 60001 [16], angepasste und ergänzte eigene Darstellung der Technischen Hochschule (TH) Rosenheim	5
Abbildung 6	Prinzipieller Aufbau von Holz [7, 17] .....	6
Abbildung 7	Kiefernholz wurde mit Siliziumdioxid-Nanosolen (in blau) getränkt, REM-Aufnahme mit EDX-Mapping [18].....	6
Abbildung 8	Schematischer Aufbau der Elementarfaser von Flachs und Hanf [21].....	7
Abbildung 9	Übersicht zu Aufschlussverfahren zur Herstellung von Holzfasern nach [23] .....	8
Abbildung 10	Schematische Darstellung einer Laborrefineranlage für ein thermo-mechanisches Aufschlussverfahren (TMP, thermo mechanical pulp) [24].....	8
Abbildung 11	Schematische Darstellung der unterschiedlichen Frakturzonen der Holzsubstanz je nach Aufschlussverfahren [25], ML: Mittellamelle, P: Primärwand, S1 bis S3: Sekundärwandschichten (siehe Abbildung 6).....	9
Abbildung 12	Mikroskopische Aufnahmen von Holzfasern aus Fichte, die durch einen thermo-mechanischen Prozess bei gleicher Mahlscheibengeometrie und unterschiedlicher Aufschlusstemperatur hergestellt wurden, (a) Aufschlusstemperatur von 135 °C, es sind	

zahlreiche Bruchstücke von Tracheiden und Faserbündeln erkennbar, (b) Aufschlusstemperatur von 175 °C, im Vergleich weniger Bruchstücke erkennbar [24].....	10
Abbildung 13 Mikroskopische Aufnahmen von Holzfasern aus Fichte, die durch einen thermo-mechanischen Prozess bei gleicher Aufschlusstemperatur von 150 °C und unterschiedlicher Mahlscheibengeometrie hergestellt wurden, (a) Mahlscheibe 1 zeigt deutlich Bruchstücke von Tracheiden, (b) Mahlscheibe 2 zeigt Tracheiden und Faserbündel [24].....	10
Abbildung 14 Polyethylen dringt in Lumen einer Holzfaser ein [40].....	12
Abbildung 15 Schematische Darstellung eines Spritzgusscompounders [41].....	13
Abbildung 16 REM-Aufnahmen von (a) Holzmehl und (b) Holzfasern [47].....	14
Abbildung 17 Türverkleidungen aus dem Automobilinterieur mit Holzfasern als Pressbauteile mit einer Mischung aus duroplastischer und thermoplastischer Matrix, Material Fibrowood [3]	17
Abbildung 18 Abzugsversuch mit verklebten Retainern von einer Türverkleidung als Naturfaserpressbauteil [63].....	17
Abbildung 19 REM-Aufnahme von Polypropylen mit unbehandelten Hanffasern, Bruchfläche [88]	18
Abbildung 20 Synergieeffekt durch Hybridbauweisen, Kombination von Designsteifigkeit und Produktivität von Spritzguss mit der hohen Eigensteifigkeit faserverstärkter Halbzeuge [94]	19
Abbildung 21 Serienanwendungen von Hybridverbunden mit Organoblechen, (a) Türmodulträger für den Ford Focus [97] (b) Durchlade für den Land Rover Discovery [94].....	20
Abbildung 22 Hybridbauteile mit Naturfasern aus dem Automobilinterieur, (a) Seitenverkleidung [109], (b) Instrumententafel, Bild von Yanfeng Automotive Interiors [110]	21
Abbildung 23 Türverkleidung aus dem Automobilinterieur (Mercedes-Benz W205), Naturfaservlies mit einer Matrix aus Polypropylen mit hinterspritzten Rippenstrukturen und Funktionselementen [80].....	21
Abbildung 24 Türverkleidung aus dem Automobilinterieur, Hybridbauteile mit Naturfasern und recycelten Kohlenstofffasern [111] .....	22
Abbildung 25 Demonstratorbauteil mit thermoplastischem Naturfaservlies und direkt angespritzten Rippen aus Polypropylen [105] .....	22
Abbildung 26 Demonstratorbauteil mit unidirektionalen Flachfasern und biobasiertem Thermoplast auf einer Multifunktionsspritzgussmaschine der Firma Engel, (a) Aufheizen, (b) Positionieren im Werkzeug, (c) Demonstratorbauteil [113] .....	23

Abbildung 27	Rippenabzeichnungen von Hybridbauteilen mit Naturfasern, (a) Versuchswerkzeug der Firma FRIMO, (b) Rippenabzeichnungen nach dem Vakuumkaschieren [109]	23
Abbildung 28	Sichtbare Naturfaseroberflächen für das Automobilinterieur, (a) Türinnenverkleidung des BMW-i3 [115], (b) dekoratives Vlies aus Naturfasern für das Automobilinterieur [116].....	24
Abbildung 29	Vergleichende CO <sub>2</sub> Bilanz unterschiedlicher Naturfasern nach [115].....	25
Abbildung 30	Einfluss des Verarbeitungsprozesses auf VOC-Emissionen nach VDA 277, PP mit 30 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Spritzgusscompounder (1-step IMC), Compoundierung und Spritzguss (2-step TSE), Heiz-Kühl-Mischer (2-step HCM), Messknetter (2-step IM) [47]	26
Abbildung 31	Schematische Darstellung der relevanten Technologien zur Untersuchung der Direkt-Compoundierung .....	29
Abbildung 32	Schematische Darstellung der relevanten Technologien zur Untersuchung der Verbundhaftung im Kopf-Zug-Versuch .....	30
Abbildung 33	Schematische Darstellung der relevanten Technologien zur Untersuchung am praxisnahen Bauteil, Darstellung von Heißpresse, Werkzeug und Spritzgussmaschine (SGM) nach FRIMO [109]	30
Abbildung 34	Zur Materialprüfung wurden Prüfkörper aus dem Multiprüfkörperwerkzeug der TH Rosenheim verwendet.....	34
Abbildung 35	Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus zur Vlieslegung [133].....	35
Abbildung 36	Prozessablauf vom konsolidierten Vlies bis zum Probekörper für Kopf-Zug-Versuche	36
Abbildung 37	Zur Untersuchung der Verbundhaftung wurden zwei verschiedene Geometrien der Rippen untersucht, (a) Rippe mit Radius, (b) Rippe mit Fuß.....	36
Abbildung 38	Versuchsaufbau zur Untersuchung der Verbundhaftung, (a) Probekörper für den Kopf-Zug-Versuch mit beiden Rippengeometrien und Schema einer Rippe (b) schematische Darstellung der Abzugsvorrichtung.....	36
Abbildung 39	Auflager je nach Rippengeometrie, (a) und (b) schematische Darstellung der Abzugsvorrichtung beider Rippengeometrien (Seitenansicht), (c) und (d) Auflager der Abzugsvorrichtung beider Rippengeometrien (Ansicht von unten).....	37
Abbildung 40	Exemplarischer Kurvenverlauf des Kopf-Zug-Versuchs mit maximaler Abzugskraft ( $F_{\max}$ ) und Abzugsweg bei $F_{\max}$ ( $s_{\max}$ ).....	37
Abbildung 41	Prozessablauf vom unkonsolidierten Vlies bis zum praxisnahen Bauteil.....	38

Abbildung 42	Prüfaufbau zur Untersuchung des Durchstoßverhaltens nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4, (a) Prüfkörper mit Naturfaservlies (vorne) und Prüfkörper mit Holzfaservlies (hinten), (b) der mittlere Teil (farblich hervorgehoben) wurde für die Durchstoßprüfung entfernt, (c) schematische Darstellung des Durchstoßversuchs.....	39
Abbildung 43	Exemplarischer Kurvenverlauf des Durchstoßversuchs mit maximaler Stoßkraft ( $F_{\max}$ )	39
Abbildung 44	Übersichtsbild einiger Hackschnitzel aus Fichte (links), Mikroskopie eines Mikrotomanschnitts eines Hackschnitzels aus Fichte (rechts), Querschnitt in Bezug auf die Wachstumsrichtung des Baumes, Auflicht.....	42
Abbildung 45	Übersichtsbild einiger thermo-mechanisch hergestellter Fasern aus Fichte (links), Mikroskopie eines Faserbündels aus Fichte (Mitte), Mikroskopie einer Einzelfaser aus Fichte (rechts)	43
Abbildung 46	Übersichtsbild einiger Pellets aus Fichtefasern (links), Mikroskopie von einem Pellet aus Fichtefasern (rechts), auffällig ist die geringe Komprimierung.....	43
Abbildung 47	Luftstrahlsieb-Analyse von Holzfasern aus Fichte, Pellets mit Fichtefasern und des Holzmehls, das im Benchmark-WPC verwendet wurde, $n = 3 \pm SD$ .....	44
Abbildung 48	Zugprüfung nach ISO 527-2/1A von PP mit Haftvermittler und unterschiedlichem Holzanteil, MFR-Messung, $\rho_{\text{Schmelze}}$ und $\rho_{\text{erkaltet}}$ mit $n = 3 \pm SD$ .....	45
Abbildung 49	PP mit 20 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Anschliff, koaxiales Hellfeld	46
Abbildung 50	Einfluss der Beleuchtungsart auf den Anschliff, PP mit 20 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, (a) koaxiales Hellfeld, (b) Auflicht .....	47
Abbildung 51	PP mit 20 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Anschliff, koaxiales Hellfeld, (a) ohne Kontrastmittel, (b) mit Kontrastmittel .....	48
Abbildung 52	Schlagzähigkeitsprüfung ISO 179/1eB (edgewise, Kerbart B) von PP mit und ohne Haftvermittler und mit unterschiedlichem Holzanteil aus zwei Versuchsreihen, $n = 10 \pm SD$ , p-Wert durch einfaktorielle Varianzanalyse bei $\alpha = 0,05$ .....	49
Abbildung 53	Kraft-Durchbiegungs-Diagramm, Schlagzähigkeitsprüfung ISO 179/2eB (edgewise, Kerbart B), exemplarischer Kurvenverlauf von PP mit unterschiedlichem Holzanteil aus Versuchsreihe 1.....	50
Abbildung 54	Maximale Kraft ( $F_{\max}$ ) und Durchbiegung bei $F_{\max}$ ( $S_{\max}$ ), Schlagzähigkeitsprüfung ISO 179/2eB (edgewise, Kerbart B) von PP mit unterschiedlichem Holzanteil aus Versuchsreihe 1, $n = 3 \pm SD$	50

Abbildung 55	Vergleichende Darstellung einer Computertomographie (links) und einer Mikroskopie (rechts, Anschliff, koaxiales Hellfeld), PP mit 20 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler	51
Abbildung 56	Computertomographie, Analysesoftware VGSTUDIO MAX, PP mit 30 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler .....	52
Abbildung 57	Computertomographie, Analysesoftware VGSTUDIO MAX, PP mit 30 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Schnittdarstellungen aus Abbildung 51, (a) Schnittdarstellung A-A, (b) Schnittdarstellung B-B, (c) Schnittdarstellung C-C.....	52
Abbildung 58	Computertomographie, Analysesoftware VGSTUDIO MAX, PP mit 30 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Faserorientierung in Rand- und Mittelschicht .....	53
Abbildung 59	Computertomographie, Analysesoftware VGSTUDIO MAX, Faserorientierung in Mittel- und Randschicht in Abhängigkeit vom Faseranteil, (a) 10 Gew.-% Holzanteil, (b) 20 Gew.-% Holzanteil, (c) 30 Gew.-% Holzanteil .....	53
Abbildung 60	Computertomographie, Analysesoftware VGSTUDIO MAX, Faservolumenanteil (a) 10 Gew.-% Holzanteil, (b) 20 Gew.-% Holzanteil, (c) 30 Gew.-% Holzanteil .....	54
Abbildung 61	Schmelzviskosität von Polypropylen mit 0 Gew.-% Holzanteil und einem Direkt-Compound mit 20 Gew.-% Holzanteil nach ISO 11443 bei 200 °C .....	57
Abbildung 62	PP mit 30 Gew.-% Holzanteil und 3 Gew.-% Haftvermittler, Zugprüfstab, Bruchfläche nach Zugprüfung, Mikroskopie mit Auflicht.....	58
Abbildung 63	PP mit 30 Gew.-% Holzanteil ohne Haftvermittler, Zugprüfstab, Bruchfläche nach Zugprüfung, Mikroskopie mit Mischlicht.....	58
Abbildung 64	Wickelstation für das Holzfaservlies nach der Doppelbandheizung im Technikum der Autefa Solutions Austria GmbH in Linz .....	60
Abbildung 65	Aufnahmen von unkonsolidierten Vliesen, Holzfaservlies über Airlay-Anlage, Faserorientierung in Produktionsrichtung.....	61
Abbildung 66	Schematische Darstellung der Wirrvlieskarde, (a) Übersichtliche Darstellung der Einheit (siehe 5.3 Vlieslegung), (b) Detaildarstellung der Wirrvlieskarde [133].....	61
Abbildung 67	Wirrvlieskarde K12 mit synthetischen Fasern [141], Vliesbildung und schematische Darstellung der Faserorientierung [133,141] .....	62
Abbildung 68	Naturfaservlies (Benchmark) und Holzfaservlies, Prüfkörper in und quer zu Produktionsrichtung, Zugprüfung nach ISO 527-4/2 .....	62
Abbildung 69	Naturfaservlies (Benchmark) und Holzfaservlies, Prüfkörper in und quer zu Produktionsrichtung, Schlagzähigkeitsprüfung nach ISO 179-2/1eU (edgewise, ungekerbt), Lagerabstand 62 mm.....	63

Abbildung 70	Instrumentierter Durchstoßversuch nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4, $v = 4,4 \text{ m/s}$ , $m = 9,378 \text{ kg}$ , $h = 1 \text{ m}$ , mit Schmierung, $n = 3 \pm \text{SD}$ .....	64
Abbildung 71	Infrarotspektroskopie (FT-IR, ATR) der PP-Faser aus dem Naturfaservlies (Benchmark) und der PP-Faser aus den Vlieslegeversuchen mit Holzfasern.....	65
Abbildung 72	Infrarotspektroskopie (FT-IR, ATR) von Hanf und Kenaf aus dem Naturfaservlies (Benchmark) und von Fichte aus den Vlieslegeversuchen mit Holzfasern.....	66
Abbildung 73	Benchmark Naturfaservlies, Unterschiedliche Kerntemperaturen über Infrarotofen, (a) Kerntemperatur $170 \text{ }^\circ\text{C}$ , (b) Kerntemperatur $180 \text{ }^\circ\text{C}$ , (c) Kerntemperatur $200 \text{ }^\circ\text{C}$	66
Abbildung 74	Benchmark-Naturfaservlies, resultierende Kerntemperatur bei unterschiedlicher Heizleistung über Infrarotofen, Infrarotaufnahme und Fotografie der für die weiteren Versuche verwendeten Kerntemperatur von $170^\circ\text{C}$ bei $75 \%$ Heizleistung.....	67
Abbildung 75	Naturfaservlies mit angespritzten Rippen aus reinem PP ohne Holzanteil, die hellblauen Linien markieren starkes und unkontrolliertes Überspritzen im Einleger.....	67
Abbildung 76	Vorversuch zur unterschiedlichen Schwindung von Naturfaservliesen, (a) angespritzt mit reinem PP, (b) angespritzt mit PP und $20 \text{ Gew.}\%$ Holzanteil .....	68
Abbildung 77	Naturfaservliese mit angespritzten Rippen, anschließend mit einer Hochglanzfolie vakuumkaschiert, (a) Naturfaservlies angespritzt mit reinem PP, (b) Naturfaservlies angespritzt mit PP mit $20 \text{ Gew.}\%$ Holzanteil.....	69
Abbildung 78	PVT-Messung von reinem PP, isobar ( $300, 400$ und $500 \text{ bar}$ ) von $180 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $60 \text{ }^\circ\text{C}$	69
Abbildung 79	PVT-Messung von PP mit $20 \text{ Gew.}\%$ Holz, isobar ( $300, 400$ und $500 \text{ bar}$ ) von $180 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $60 \text{ }^\circ\text{C}$	70
Abbildung 80	Kopf-Zug-Versuch von Rippen mit Fuß bei zwei verschiedenen Kerntemperaturen der Vliese, Anspritzmaterial Direkt-Compound mit $20 \text{ Gew.}\%$ Fichte, $n = 7 \pm \text{SD}$ , p-Wert mit einfaktorieller ANOVA bei $\alpha = 0,05$ .....	70
Abbildung 81	Kopf-Zug-Versuch von Rippen mit Fuß bei zwei unterschiedlichen Vlieskerntemperaturen, beispielhafter Kurvenverlauf des Kraft-Weg-Diagramms und mikroskopische Aufnahmen nach dem Abzug .....	71
Abbildung 82	Bruchbild von Rippe mit Fuß, Holzfaservlies angespritzt bei Raumtemperatur, Mikroskopie, Auflicht.....	72
Abbildung 83	Bruchbild von Rippe mit Fuß, Naturfaservlies angespritzt bei Raumtemperatur, Mikroskopie, Auflicht.....	72

Abbildung 84	Bruchbild von Rippe mit Fuß, Holzfaservlies angespritzt bei einer Kerntemperatur von 170 °C, Mikroskopie, Auflicht.....	73
Abbildung 85	Bruchbild von Rippe mit Fuß, Naturfaservlies angespritzt bei einer Kerntemperatur von 170 °C, Mikroskopie, Auflicht.....	73
Abbildung 86	Kopf-Zug-Versuch von Rippen mit Fuß und zwei Anspritzmaterialien, Kerntemperatur der Vliese bei 170 °C vor dem Einlegen in die Form, $n = 7 \pm SD$ , p-Wert mit einfaktorieller ANOVA bei $\alpha = 0,05$ .....	74
Abbildung 87	Schmelzviskosität der beiden Spritzgussmaterialien nach ISO 11443 bei 200 °C, bei beiden Materialien wurden gespritzte Proben zerschnitten, drei Stunden lang bei 80 °C im Umluftofen getrocknet und dann gemessen.....	74
Abbildung 88	Kopf-Zug-Versuch mit zwei Rippengeometrien und beiden Vliesstoffen, Kerntemperatur der Vliese vor dem Einlegen in die Form bei 170 °C, $n = 5 \pm SD$ , Spritzgussmaterial Direkt-Compound mit 20 Gew.-% Holzanteil .....	75
Abbildung 89	Exemplarische Rippen nach dem Kopf-Zug-Versuch aus Abbildung 88, Auflichtmikroskopie, (a-c) Rippen mit Naturfaservliesen, (d-f) Rippen mit Holzfaservliesen, (a, d) Rippen mit Fuß, (b, e) Rippen mit Radius, (c, f) aufgeklebte Aluminiumrippen.....	76
Abbildung 90	Holzfaservlies angespritzt mit Direkt-Compound (a) Rippe mit Radius Mikrotomschnitt, Auflichtmikroskopie, (b) Rippe mit Fuß Mikrotomschnitt, Auflichtmikroskopie, (c) Rippe mit Radius, Computertomographie, (d) Rippe mit Fuß, Computertomographie, in beiden Computertomographiebildern zeigt Schwarz die geringste Dichte (Hintergrund), Grau und Weiß eine leicht zunehmende Dichte und Blau die maximale Dichte .....	77
Abbildung 91	Naturfaservlies angespritzt mit Direkt-Compound (a) Rippe mit Radius Mikrotomschnitt, Auflichtmikroskopie, (b) Rippe mit Fuß Mikrotomschnitt, Auflichtmikroskopie, (c) Rippe mit Radius, Computertomographie, (d) Rippe mit Fuß, Computertomographie, in beiden Computertomographiebildern zeigt Schwarz die geringste Dichte (Hintergrund), Grau und Weiß eine leicht zunehmende Dichte und Blau die maximale Dichte .....	78
Abbildung 92	Naturfaservlies und Holzfaservlies angespritzt mit Direkt-Compound, Rippe mit Radius, Anschliff, Auflichtmikroskopie, (a) Naturfaservlies, (b) Holzfaservlies.....	78
Abbildung 93	Instrumentierter Durchstoßversuch nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4, $v = 4,4$ m/s, $m = 9,378$ kg, $h = 1$ m, mit Schmierung, $n = 3 \pm SD$ , beide Materialien wurden als Vliese und als Hybrid mit Rippen geprüft, p-Wert mit einfaktorieller ANOVA bei $\alpha = 0,05$ .....	81
Abbildung 94	Instrumentierter Durchstoßversuch nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4, $v = 4,4$ m/s, $m = 9,378$ kg, $h = 1$ m, mit Schmierung, beispielhafter Kurvenverlauf, beide Materialien wurden	

als Vliese und als Hybrid mit Rippe geprüft, (a) Naturfaservlies und Hybrid, (b) Holzfaser- vlies und Hybrid, Darstellung über die Verformung .....	82
Abbildung 95 Instrumentierter Durchstoßversuch nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4, $v = 4,4$ m/s, $m = 9,378$ kg, $h = 1$ m, mit Schmierung, beispielhafter Kurvenverlauf, beide Materialien wurden als Vliese und als Hybrid mit Rippe geprüft, (a) Naturfaservlies und Hybrid, (b) Holzfaser- vlies und Hybrid, Darstellung über die Zeit.....	82
Abbildung 96 Beispielhafte Prüfkörper nach dem Durchstoßversuch, (a) Naturfaservlies, (b) Holzfaser- vlies, (c) Naturfaservlies mit Verstärkungsrippe (Hybrid), (d) Holzfaser- vlies mit Verstärkungsrippe (Hybrid) .....	83
Abbildung 97 Beispielhafte mikroskopische Aufnahmen der Bruchflächen, (a) Naturfaservlies, (b) Holzfaser- vlies.....	84
Abbildung 98 Beispielhafte mikroskopische Aufnahmen der Bruchflächen, (a) Naturfaservlies- Hybrid, (b) Holzfaser- vlies-Hybrid .....	84
Abbildung 99 Prüfkörper mit Naturfaservlies (Vordergrund) und Holzfaser- vlies (Hintergrund) 85	
Abbildung 100 Prüfkörper im Bereich des Angusses, (a) Prüfkörper mit Naturfaservlies, (b) Prüfkörper mit Holzfaser- vlies .....	85
Abbildung 101 Prüfkörper mit Holzfaser- vlies im Bereich der Umformung.....	86
Abbildung 102 Prüfkörper mit Holzfaser- vlies im Bereich der Umformung, Mikroskopie, Auflicht 86	
Abbildung 103 Variation der Aufprallseite beim Durchstoßversuch.....	87
Abbildung 104 Instrumentierter Durchstoßversuch nach ISO 6603-2/40/20/C/4.4, $v = 4,4$ m/s, $m = 9,378$ kg, $h = 1$ m, mit Schmierung, beispielhafter Kurvenverlauf bei Variation der Aufprallseite 87	
Abbildung 105 Prüfkörper mit Holzfaser- vlies und zusätzlichem schwarzen Dekor- vlies aus Polypropylen, (a) Vorderseite, (b) Rückseite .....	88
Abbildung 106 Prüfkörper mit Holzfaser- vlies und zusätzlichem schwarzen Dekor- vlies, Rückseite 88	
Abbildung 107 Prüfkörper mit Holzfaser- vlies und zusätzlichem Flachsgewebe, (a) Vorderseite, (b) Rückseite .....	89
Abbildung 108 Prüfkörper mit Holzfaser- vlies und zusätzlichem Flachsgewebe, Rückseite.....	89
Abbildung 109 Überblick über die betrachteten Prozesse der jeweiligen Fasern .....	92



Abbildung 110	Vergleichende Ökobilanzierung von Holzfasern, Kenaf und Flachs, (a) Erderwärmungspotential, (b) Abbau der Ozonschicht, (c) Erschöpfung abiotischer Ressourcen, (d) Erschöpfung abiotischer Ressourcen inklusive fossiler Brennstoffe .....	93
Abbildung 111	Vergleichende Ökobilanzierung von Holzfasern, Kenaf und Flachs, (a) Überdüngung, (b) Übersäuerung, (c) Oxidantienbildung.....	94
Abbildung 112	Erste Vorversuche zu Emissionen nach VDA 277 zur Lagerdauer von Holzfasern, $n = 3 \pm SD$ .....	106
Abbildung 113	Erste Vorversuche zu Emissionen nach VDA 277 zur Pressdauer von händisch gelegten Vliesen mit Holzfasern, 50 Gew.-% Holzfasern und 50 Gew.-% PP-Fasern, Presstemperatur 200 °C, $n = 3 \pm SD$ .....	107
Abbildung 114	Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus zur Vlieslegung mit Vernadelung [54]	107
Abbildung 115	Holzfaservlies unvernadelt und vernadelt, Prüfkörper in und quer zu Produktionsrichtung, Zugprüfung nach ISO 527-4/2 .....	108
Abbildung 116	Prüfkörper mit Holzfaservlies und zusätzlichem schwarzen Dekorvlies aus Polypropylen, (a) Vorderseite und Sichtseite, (b) optische Fehler auf der Sichtseite .....	109
Abbildung 117	Schneckenkonfiguration zur Direkt-Compoundierung von Polypropylen und Holzfasern	121
Abbildung 118	Multiprüfkörperbauteil, (a) isometrische Ansicht, (b) Außenmaße .....	122
Abbildung 119	Schnittdarstellungen des Angusses des Multiprüfkörperbauteils.....	122
Abbildung 120	Infrarotofen und Handlingrahmen, (a) Infrarotofen mit ausgefahrener Schiene zum Einhängen des Handlingrahmens, (b) Handlingrahmen in der Aufheizposition.....	123
Abbildung 121	Handlingrahmen mit Naturfasereinleger im Werkzeug .....	124
Abbildung 122	Hybridbauteil, (a) isometrische Ansicht, (b) Außenmaße.....	124
Abbildung 123	Schnittdarstellungen des Angusses des Hybridbauteils.....	124

## Anhang F: Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Zugfestigkeit und Zugmodul einiger typischer Verstärkungsfasern der Kunststofftechnik im Vergleich zu Nadelholz [7, 13, 20] .....	7
Tabelle 2	Mechanische Kennwerte aus dem FENAFANetzwerkverbund von direkt compoundiertem Kunststoff mit Naturfaserverstärkung, Zugprüfung nach ISO 527-1 und 527-4, Schlagzähigkeit nach ISO 179-2 edgewise bei Raumtemperatur, die Kerbart der Schlagzähigkeitsprüfkörper ist nur beim Datenblattwert des Grundpolymers bekannt [44, 51]	15

---

Tabelle 3	Anspritzmaterial für die Hybridverbunde, für das praxisnahe Bauteil wurde nur das WPC verwendet, der Zugmodul und die Zugfestigkeit wurden nach ISO 527-2/1A gemessen, der MFR wurde nach ISO 1133-2 mit 10 kg bei 170 °C gemessen .....	32
Tabelle 4	Vliese für die Hybridverbunde, der Zugmodul und die Zugfestigkeit wurden gemäß ISO 527-4/2 gemessen .....	32
Tabelle 5	Parameter bei der Direkt-Compoundierung von Holzfasern mit Polypropylen und Haftvermittler .....	33
Tabelle 6	Parameter bei der Vlieslegung von Holzfasern mit Polypropylenfasern.....	35
Tabelle 7	Verarbeitungsparameter für die Untersuchungen an einem praxisnahen Bauteil.....	38
Tabelle 8	Messwerte des Diagramms (Abbildung 48), Zugprüfung nach ISO527-2/1A, MFR-Messung mit $n = 3 \pm SD$ .....	46
Tabelle 9	Validierungsversuch und Effekt des Haftvermittlers auf die Zugfestigkeit von PP mit 30 Gew.-% Holzanteil.....	48
Tabelle 10	Faservolumenanteil gemessen mittels Computertomographie, Analysesoftware VGSTUDIO MAX, $n = 3 \pm SD$ .....	54
Tabelle 11	Fasergewichtsanteil, theoretischer Faservolumenanteil, theoretischer und gemessener Zugmodul.....	56
Tabelle 12	Fasergewichtsanteil, theoretischer Faservolumenanteil und gemessener Faservolumenanteil.....	56
Tabelle 13	DSC von Proben mit steigendem Holzanteil, Messzyklus Heat/Cool/Heat, Heiz- und Kühlrate von 10 K/min, 25 °C bis 200 °C, Stickstoffatmosphäre.....	57
Tabelle 14	Verarbeitungsparameter für die Untersuchungen zur Verbundhaftung .....	68
Tabelle 15	Zusammenfassende Darstellung der signifikanten Effekte aus den Untersuchungen zur Verbundhaftung .....	80
Tabelle 16	Bruchflächen von Prüfkörpern nach dem Durchstoßversuch, die unregelmäßige Bruchfläche wurde über einen Polygonzug (Smartzoom 5) ermittelt, $n = 3 \pm SD$ .....	84
Tabelle 17	Vergleichende Ökobilanzierung von Holzfasern, Kenaf und Flachs, absolute Werte zu Abbildung 110 und Abbildung 111 .....	95

## Publikationen

### Begutachtete Publikationen (Peer-Review):

- Obermeier, F.; Schumacher, M.; Barth, S.; Karlinger, P.; Michanickl, A.; Schemme, M.; Altstadt, V.: **Verstärkung von Polypropylen mit Holzfasern durch Direkt-Compoundierung**; Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology; Volume 17; 2021; S. 87-111 (<https://doi.org/10.3139/o999.02022021>)
- Obermeier, F.; Karlinger, P.; Schemme, M.; Altstadt, V.: **Thermoplastic Hybrid Composites with Wood Fibers: Bond Strength of Back-Injected Structures**; Materials, Advanced Materials Characterization; Volume 15; 2022 (<https://doi.org/10.3390/ma15072473>)

### Konferenzbeiträge und Zeitschriftenartikel:

- Obermeier, F.; Schumacher, M.; Barth, S.; Karlinger, P.; Schemme, M.; Michanickl, A.: **Thermoplastische Hybridverbunde mit Holzfaserverstärkung**; 26. Technomer; Technische Universität Chemnitz; 2019
- Obermeier, F.; Schumacher, M.; Barth, S.; Karlinger, P.; Schemme, M.; Michanickl, A.: **Thermoplastische Holzfaservliese für Hybridverbunde**; 13. Holzwerkstoffkolloquium; Institut für Holztechnologie Dresden; 2019
- Obermeier, F.; Schumacher, M.; Barth, S.; Karlinger, P.; Schemme, M.; Michanickl, A.: **Leichtbau mit Naturfasern - Thermoplastische Hybridverbunde mit Holzfasern**; Plastverarbeiter; Volume 2; 2020; S. 34-36
- Schumacher, M.; Obermeier, F.; Barth, S.; Karlinger, P.; Schemme, M.; Michanickl, A.: **Eignung von thermo-mechanischen Holzfasern in Vliesstoffhybridverbunden**; Zeitschrift Holztechnologie; Volume 2; 2020; S. 40-45
- Obermeier, F.; Karlinger, P.; Schemme, M.; Altstadt, V.: **Verbundhaftung von thermoplastischen Hybridverbunden mit Natur- und Holzfaserverstärkung**; 27. Technomer; Technische Universität Chemnitz; 2021
- Obermeier, F.; Lackner, R.; Karlinger, P.: **Polypropylene with wood fibre reinforcement – Computed tomography analysis of the fiber-matrix interface**; 3DMC 2022, Automation, Digitization, Data intelligence; Laboratory for Machine Tools and Production Engineering; RWTH Aachen University; 2022

**Weitere Vorträge:**

- Obermeier, F.; Moser, S.: **Differentiation between natural and regenerated cellulose**; Sartorius College; Goettingen; 2019
- Obermeier, F.: **Prozess- und materialtechnische Entwicklung von holzfaserverstärkten Kunststoffen**; HAW-Forum (Online); Max Weber-Programm; 2021
- Obermeier, F.: **Entwicklung von holzfaserverstärkten Kunststoffen**; Kolloquium (Online); BayWISS - Bayerisches Wissenschaftsforum; 2021
- Obermeier, F.: **Thermoplastische Hybridverbunde mit Holzfasern**; Kolloquium (Online); BayWISS - Bayerisches Wissenschaftsforum; 2022
- Lackner, R.; Obermeier, F.; Karlinger P.: **Polypropylen mit Holzfaserverstärkung - Computertomographische Analyse der Faser-Matrix-Interaktion**; Werth-Technik-tage; Gießen; 2022

## Lebenslauf



### Persönliche Daten

Name: Frederik Obermeier  
Geburtsdatum: 14.05.1991 in Landshut

### Schulbildung

2001 bis 2005 Maristen Gymnasium Furth  
2005 bis 2008 Staatliche Realschule Rottenburg (Wirtschaftlicher Zweig)  
2008 bis 2011 Staatliche Fachoberschule Landshut (Sozialer Zweig)

- *Fachgebundenes Abitur (2010)*
- *Allgemeines Abitur (2011)*

### Akademischer Werdegang

2012 bis 2016 TH Rosenheim  
Duales Studium der Kunststofftechnik (B. Eng.)  
2016 bis 2018 TH Rosenheim  
Masterstudium „Angewandte Forschung und Entwicklung in den Ingenieurwissenschaften“ (M. Sc.)  
2017 bis 2018 University of Plymouth (United Kingdom)  
Visiting Research Student, Masterarbeit

### Beruflicher Werdegang

2011 bis 2012 Maristenkloster Furth  
Bundesfreiwilligendienst  
2012 bis 2016 DRÄXLMAIER GROUP  
Duales Studium der Kunststofftechnik  
2016 bis 2017 TH Rosenheim  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter der F&E Kunststofftechnik (Teilzeit)  
2018 bis 2023 TH Rosenheim  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter der F&E Kunststofftechnik (Vollzeit)

### Stipendien

2015 bis 2018 Max Weber-Programm des Elitenetzwerks Bayern  
2017 bis 2018 Auslandsstipendium des Bayerischen Staatsministeriums für studienbezogene Auslandsaufenthalte (University of Plymouth)  
2020 bis 2023 BayWISS-Verbundkolleg Ressourceneffizienz & Werkstoffe