

**Materialentwicklung und Prozessoptimierung von naturfaserverstärkten Kunststoffen mit geringem Matrixanteil für Automobilanwendungen**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

**Dipl.-Chem. Luisa A. Medina**

aus Soria, Spanien

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2007

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andrzej K. Bledzki

D386



A mi madre

Weil Denken die schwerste Arbeit ist, die es gibt, beschäftigen sich auch nur wenige damit.

Henry Ford, 1863-1947

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand in den Jahren 2002 bis 2007 während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH an der Technischen Universität Kaiserslautern.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang, und dem Gruppenleiter, Dr.-Ing. Ralf Schledjewski, für das mir entgegengebrachte Vertrauen, Ihre Unterstützung sowie Anregungen und Diskussionsbereitschaft, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ferner danke ich dem Geschäftsführer des Instituts, Prof. Dr.-Ing. Alois K. Schlarb, für das Vertrauen in meine Arbeit und die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Für die Übernahme des Korreferates bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andrzej K. Bledzki.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts, sowie den Studien-, Diplomarbeitern und Praktikanten, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich für die fachliche Unterstützung und die freundliche Zusammenarbeit. Besonders möchte ich mich bei Erhard Natter und Dr.-Ing. Marcel Sommer für die fruchtbaren Diskussionen und die Hilfestellungen bei der Planung und Ausführung der experimentellen Untersuchungen bedanken. Für das Korrekturlesen, fachliche Anregungen und kritische Betrachtungen bedanke ich mich ganz herzlich bei Michael Päßler, Dr.-Ing. Robert Lahr und Dr.-Ing. Dietrich Rodermund.

Für die gute Zusammenarbeit und die enge Unterstützung möchte ich mich bei Dr. Ferri Van Hattum, Dr. Conceição Paiva und Rita Campos vom Department of Polymer Engineering, Universidad do Minho, Guimaraes, Portugal, herzlich bedanken.

Ein Teil der Arbeit wurde aus Mitteln des Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau des Landes Rheinland-Pfalz (Projekt-Nr. 8403-38 52 53/ 05-P 213) und des Deutschen Akademischen Austausch Dienstes (DAAD) (Az.: 314-Alp-dr) finanziert, wofür ich danke. Für die kostenlose Bereitstellung von Material danke ich der J. Dittrich & Söhne Vliesstoffwerk GmbH und der BASF AG.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Mutter für die kontinuierliche Unterstützung während meiner Ausbildung, die durch persönlichen Verzicht meinen akademischen und beruflichen Werdegang ermöglicht hat. Von ganzem Herzen danke ich meinem Mann, Jürgen Dully, der mich während der Zeit am Institut fachlich und seelisch unterstützt hat und mir immer zur Seite stand.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung.....	1
1.2	Naturfasern als Verstärkung in Verbundwerkstoffe.....	2
1.3	Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit.....	8
<b>2</b>	<b>Stand der Technik.....</b>	<b>11</b>
2.1	Naturfasern .....	11
2.1.1	Definition und Untergliederung von Naturfasern .....	11
2.1.2	Struktur und chemischer Aufbau von Naturfasern .....	13
2.1.2.1	Hanffasern .....	16
2.1.2.2	Kenaffasern .....	17
2.1.3	Eigenschaften von Naturfasern.....	18
2.1.3.1	Mechanische Eigenschaften .....	18
2.1.3.2	Wasseraufnahmeverhalten .....	20
2.1.3.3	Thermische Eigenschaften .....	22
2.2	Faseraufschlussprozesse .....	23
2.3	Naturfaserverstärkte Kunststoffe in der Automobilindustrie - Historische Entwicklung und aktuelle Anwendungsbeispiele.....	24
2.4	Einsatz von naturfaserverstärkten Kunststoffen außerhalb der Automobilindustrie.....	28
2.5	Verarbeitung von naturfaserverstärkten Kunststoffen .....	29
<b>3</b>	<b>Fasercharakterisierung .....</b>	<b>33</b>
3.1	Einleitung .....	33
3.2	Faserzugfestigkeit.....	34
3.2.1	Verfahren zur Messung der Zugfestigkeit .....	34
3.2.2	Bestimmung der Faserdurchmesser .....	36

3.2.3	Ergebnisse der Bestimmung der Faserzugfestigkeit.....	43
3.3	Weibullverteilung.....	51
3.3.1	Beschreibung der Methode.....	51
3.3.2	Validierung der Zugergebnisse durch das Weibull-Modell .....	52
3.4	Zusammenfassung der Fasercharakterisierung.....	55
<b>4</b>	<b>Auswahl des Matrixsystems und Halbzeugherstellung.....</b>	<b>57</b>
4.1	Auswahl des Matrixsystems.....	57
4.1.1	Acrylharze.....	57
4.1.2	Eingesetzte Matrixsysteme und Matrixauswahl .....	59
4.2	Halbzeugherstellung .....	60
4.2.1	Vliesherstellung.....	60
4.2.2	Imprägnierung der Vliese im Tauchverfahren .....	63
4.3	Herstellung der Prüfplatten im Pressverfahren .....	65
4.4	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften .....	67
4.5	Zusammenfassung und weitere Vorgehensweise.....	74
<b>5</b>	<b>Einfluss der Pressparameter auf die Verbundeigenschaften .....</b>	<b>77</b>
5.1	Verarbeitungsparameter Temperatur, Zeit und Pressdruck .....	77
5.2	Verarbeitungstemperatur .....	78
5.2.1	Thermisches Verhalten der Naturfasern .....	78
5.2.1.1	Thermogravimetrischen Analyse.....	78
5.2.1.2	Pressversuche bei unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen .....	84
5.3	Pressdruck.....	86
5.3.1	Einfluss des Pressdrucks auf die mechanischen Eigenschaften... 87	
5.3.2	Wasseraufnahme.....	93
5.3.2.1	Wasseraufnahme der reinen Komponenten .....	94



---

5.3.2.2 Einfluss des Pressdrucks auf die Wasseraufnahme der Verbunde .....	95
5.4 Druckhaltezeit beim Pressen .....	98
5.4.1 Einsatz der Vakuumtechnologie beim Formpressen .....	98
5.4.2 Pressversuche unter Vakuumtechnik.....	100
5.4.3 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften .....	103
5.4.4 Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom Vakuumeinsatz .....	105
5.4.5 Emissions- und Geruchswerte .....	106
5.4.5.1 Anforderungen und Prüfverfahren.....	106
5.4.5.2 Ergebnisse der Messungen .....	108
5.4.6 Einfluss des Vakuums auf die Oberflächenqualität des Verbunds .....	109
5.5 Zusammenfassung.....	113
<b>6 Verarbeitung zu dreidimensionalen Bauteilen .....</b>	<b>115</b>
6.1 Verarbeitung zu Automobilbauteilen .....	115
6.2 Verarbeitung zu nicht Automobilbauteilen.....	116
<b>7 Zusammenfassung .....</b>	<b>119</b>
<b>8 Literatur .....</b>	<b>121</b>
<b>9 Anhang.....</b>	<b>131</b>



## Abkürzungen

Kurzform	Bedeutung
BMC	Bulk Molding Compound
CM	Compression Molding
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CTM	Compression Transfer Molding
DC	DaimlerChrysler AG
DMA	Dynamisch-mechanische Analyse
DSC	Dynamische Differenz-Kalorimetrie
DTA	Differenzthermoanalyse
DTG	Differenzierter Thermogravimetrische Kurve
EP	Epoxydharz
EU	Europäische Union
FID	Flammenionisationsdetektor
FL	Flachs
FR	Faserrichtung
GC	Gaschromatograph
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HA	Hanf
ITM	Injection Transfer Molding
JU	Jute
KE	Kenaf
LI	Flachs
LKW	Lasterkraftwagen
Nawaro	Nachwachsende Rohstoffe
MS	Massenspektrometrie
NF	Naturfasern
NFK	Naturfaserverstärkte Kunststoffe
PE	Polyethylen
PF	Phenolharz
PKW	Personenkraftwagen
PP	Polypropylen
PP-MAH	Maleinsäureanhydridgepropftes Polypropylen
PR	Produktionsrichtung
QPR	Quer zur Produktionsrichtung
REM	Rasterelektronenmikroskop
r.h.	Relatively humidity
SMC	Sheet Molding Compound
TGA	Thermogravimetrie

VDA	Verband der Automobilindustrie
VOC	Volatile Organic Compounds
WPC	Wood Plastic Composites

## Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
b	[mm]	Probenbreite
E-Modul	[MPa]	Elastizitätsmodul
F	[N]	Bruchkräfte
F	[%]	Wahrscheinlichkeit, dass eine Faser bei $\sigma < \sigma_0$ versagt
h	[mm]	Probendicke
l	[mm]	Bezugstrecke bei der Rauheitsberechnung
$l_v$	[mm]	Stützweite
L	[ $\mu\text{m}$ ]	Faserlänge
L	[mm]	Probenlänge
$L_0$	[mm]	Messlänge
m	[ ]	Weibull-Modulparameter
$m_{\text{ini}}$	[mg]	Ausgangsmasse einer Probe bei der TGA Analyse
$m_{\text{fin}}$	[mg]	Endmasse einer Probe bei der TGA Analyse
$m_2$	[mg]	Gewicht einer Probe nach Wasserlagerung
$m_1$	[mg]	Gewicht einer Probe vor Wasserlagerung
M	[%]	Masseänderung einer Probe bei der TGA Analyse
P	[bar]	Druck
Q	[ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser
Q	[ ]	Weibull Quantity
$R_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	Rauheit
t	[s]	Zeit
T	[°C]	Temperatur
y	[ $\mu\text{m}$ ]	Absolute Werte der Profilabweichungen der Rauheitsberechnung
W	[%]	Wasseraufnahme
$\sigma$	[MPa]	Spannung
$\sigma_0$	[ ]	Weibull-Niveauparameter (Bruchwahrscheinlichkeit = 62,3 %)
$\Gamma$	[ ]	Gamma-Funktion

## Abstract

For almost thirty years bast fibers such as flax, hemp, kenaf, sisal and jute have been used as reinforcing material in the molding process of both thermoplastic and thermoset matrices. The main application areas of these natural fiber reinforced composites in Europe are limited almost exclusively to the passenger car range. Typical components are door panels, rear parcel shelves, instrument boards and trunk linings. Natural fiber reinforced composites have become prevalent due to their good mechanical properties and their low production costs. The main advantage in applying natural fibers as reinforcement in composite materials is the price. Nowadays this argument becomes more and more important due to the scarcity of synthetic raw materials and consequently, their rising prices. Additionally the low density (approx.  $1.5 \text{ g/cm}^3$ ) of natural fibers confers them a very good lightweight potential. Other advantageous features of natural fiber composites include very good processing and acoustic properties. Further benefits such as good life cycle assessment and easier processability compared to glass fiber material should also be taken into account.

Disadvantages of natural fibers are unevenness of the fiber quality and varying fiber characteristics due to differences in soil, climate and fiber separation and their low heat resistance (at temperatures exceeding  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ , some fiber components start thermal degradation). Another disadvantage of natural fiber reinforced materials is that with some matrices (mostly thermoplastic polymers) a sufficient impregnation of the fibers can only be achieved if the fiber content in the composite is kept low, usually below 50 wt.-%. Under these conditions the best performance of the natural fiber reinforcement can not be realized. Another disadvantage of non-impregnated thermoplastic prepregs is the long processing cycle times, which result from heating up the enclosed air in the prepreg during the process. Alternatively pure natural fiber based non-woven fabrics are impregnated with thermoset systems. Due to the relatively simple handling compared to alternative procedures, the thermoforming of thermoset bonded prepregs is a very promising method for manufacturing natural fiber reinforced components.

In this work, a novel general concept for natural fiber reinforced composites with a natural fiber content of approx. 80 wt.-% and a thermoset matrix is developed. A suitable material combination as well as an optimal process execution that help to meet

the technical requirements for the natural fiber reinforced composites will be demonstrated.

Hemp and kenaf have been chosen as reinforcement fibers. In this work it is shown that hemp and kenaf can be used as successful reinforcement alternatives to the more established flax fibers in composite materials. Short flax fibers, which are commonly used as reinforcement in composites (approx. 67 % for the German automotive applications), are the “waste” of the long fiber production and their availability and price strongly depend on the demand of the long fibers from the textile industry and therefore their cost can strongly fluctuate, as it has been demonstrated in the past few years. In contrast fiber plants such as hemp and kenaf are specifically cultivated for technical applications and their availability and price is much more stable. For their application a profound knowledge of the structural and mechanical properties of the fibers is indispensable. In this work single filament tensile tests on these two types of natural fibers are carried out. The cross-section area of both fibers, necessary for the calculation of the tensile properties, was intensively studied using light microscopy and Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis. Because the occurrence of flaws within the fiber is random in nature, tensile strength data of these fibers was statistically analyzed using the Weibull distribution. The strengths were estimated by means of Weibull statistics and then were compared to experimentally measured strengths.

For a better handling of the material, both kenaf and hemp fibers were manufactured to needle punched fiber mats. For the impregnation of the natural fiber mats, a Foulard-process with the thermoset matrix as an aqueous solution was employed. The reproducibility of this impregnation process was examined. Different matrix systems with different chemical compositions were applied on the needle punched fiber mats. The impregnated prepregs were heated and consolidated to components in a one-step-process. A big advantage of this procedure is the short cycle times, since no additional pre-heating process is required, in contrast to thermoplastic bonded prepregs. Additionally, a parameter study of the mechanical properties of the composites was performed. The best matrix system satisfying the work conditions and properties of the composites was chosen to carry out the next working step, namely optimiza-

tion of the compression molding process for the thermoset bonded natural fiber prepregs.

Apart from the material composition of prepregs, general processing parameters such as temperature, time and pressure play a decisive role for the quality of structures made of natural fiber reinforced polymers. The impregnated prepregs were consolidated in a one-step-process to components. A systematic parameter study of the influence of the relevant process parameters on the characteristics of manufactured components was performed. Mould temperatures over 200 °C lead to thermal degradation of the fibers. This temperature should not be exceeded when working with natural fibers. Furthermore, the composites clearly display a dependence on the processing pressure. The flexural properties increase with increasing manufacturing pressures between 15 and 60 bar, reaching a maximum at 60 bar. At higher pressures (80 to 200 bar) a decrease of the flexural properties is demonstrated. SEM images of the fracture surface of the composites show that the decrease of the mechanical properties is related to structural damage of the fiber.

A new technology allowing pressing under vacuum conditions was developed and tested. The press is equipped with a vacuum chamber and achieves very short cycle processing times (up to less than one minute during the compression molding). The aspiration connections of the vacuum chamber ensure that the residual moisture and the condensation products of the matrix chemical reaction could be directly evacuated. This type of press ensures also very safe processing and working conditions.

The properties of the components fulfill the technical specifications for natural fiber reinforced polymers for use in the car interior. This versatile composite material is not only limited to automotive applications, but may also be used for product manufacturing in other industries. This work shows that the process parameters can be optimized to fit a particular application.





# **1 Einleitung und Zielsetzung**

## **1.1 Einführung**

Naturfasern wie Flachs, Hanf, Jute und Kenaf werden seit über 2000 Jahren für Bekleidung aber auch für technische Anwendungen eingesetzt. Auch in Deutschland wurden sie für die Herstellung aller Arten von Textilien, einschließlich technischer Textilien wie Seilen, Segeln und Säcken eingesetzt. Durch die Einfuhr von Baumwolle und die Erfindung synthetischer Fasern, wie Acryl oder Polyester, wurden Naturfasern immer stärker in den Hintergrund gedrängt. Anfang der 1960er Jahre verloren sie ihre Rentabilität gegenüber Kunstfasern, so dass der Anbau und die Verarbeitung in Deutschland vollständig eingestellt wurden.

Eine Renaissance erfuhren diese Werkstoffe in dem vergangenen Jahrzehnt, da dank der spezifischen Regelungen für den Anbau auf stillgelegten Flächen der Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland ständig erhöht wurde. Hintergründe waren die Notwendigkeit, Überkapazitäten im Bereich der Nahrungsmittelproduktion abzubauen und in Folge dessen eine Einkommensalternative für die Landwirtschaft zu schaffen. In Deutschland wurden im Jahr 2005 für die stoffliche Nutzung ca. 10,3 Mio. ha Waldfläche genutzt und auf 275.200 ha Industriepflanzen angebaut. Der Anbau von Industriepflanzen ermöglicht hierbei nicht nur die Nutzung der Stilllegungsflächen, ohne auf Subventionszahlungen verzichten zu müssen, sondern stellt generell eine sinnvolle Alternative zur Nahrungsmittelerzeugung dar.

Pflanzenfasern gehören neben Öl, Zucker und Holz zu den am häufigsten angebauten nachwachsenden Rohstoffen. Sie werden nach der chemischen Zuordnung der Substanzen oder nach ihrer Herkunft unterteilt. Durch neue, für Mensch und Natur verträgliche Techniken können Werkstoffe aus jährlich nachwachsenden Pflanzen hergestellt werden.

Nachwachsende Rohstoffe sind organische Stoffe pflanzlicher oder tierischer Herkunft. Sie werden in der Land- und Forstwirtschaft zyklisch neu angebaut, und finden im Non-Food-Bereich Verwendung im stofflichen (Industriepflanzen) oder energetischen (Energiepflanzen) Bereich.

Das Spektrum der Anwendungsbereiche nachwachsender Rohstoffe weitet sich immer mehr aus. Nachwachsende Rohstoffe bieten in vielen Bereichen ernsthafte Alternativen zu Erdölprodukten. Da sie ihre fossilen Konkurrenten mittlerweile in vielen Bereichen ersetzen können, tragen sie zur nachhaltigen Ressourcenschonung bei.

Während zur Energieversorgung viele Alternativen existieren, sind die Quellen an Rohstoffen zur werkstofflichen Nutzung sehr beschränkt. Karus veröffentlichte 2006 [1], dass die verbrauchten Mengen an nachwachsenden Rohstoffen (Nawaro) zur stofflichen Nutzung, meist Öl, Zucker und Holz, aber auch Naturfasern (NF) weltweit vor Stahl und Kunststoffen liegen (Bild 1.1)

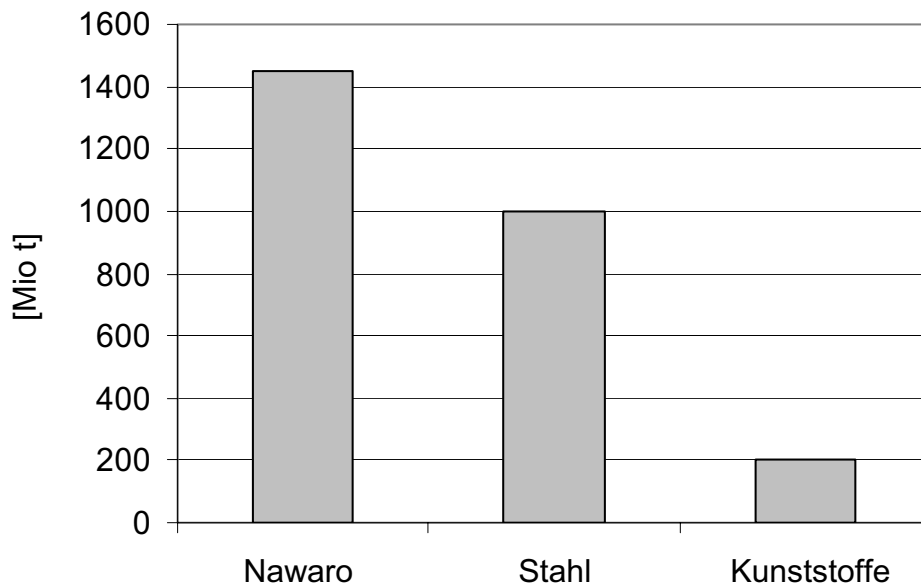


Bild 1.1: Weltweiter Rohstoffverbrauch zur stofflichen Nutzung im Jahr 2005 [1]

Die Vereinten Nationen haben die immer größere Bedeutung der Naturfasern erkannt und in seine Generalversammlung am 20. Dezember 2006 das Jahr 2009 zum internationalen Jahr der Naturfasern erhoben.

## 1.2 Naturfasern als Verstärkung in Verbundwerkstoffe

Die Nutzung von Pflanzenfasern als Verstärkungsfasern in Verbundwerkstoffen entspricht heute dem Stand der Technik und wurde in den 80er Jahren vor allem in Deutschland entwickelt. In den 90er Jahren begann die Erfolgsgeschichte der Naturfasern in der Automobilindustrie und inzwischen beginnen sie sich auch in anderen

Branchen zu etablieren. Ein großer Vorteil von Naturfasern stellt ihre sehr günstige CO<sub>2</sub>- und Energiebilanz dar. Die Pflanze bindet im Lauf ihres Wachstums Kohlenstoff, den sie in Form von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) der Luft und damit der Erdatmosphäre entzieht. Im Gegensatz zu fossilen Rohstoffen ist sie dadurch weitgehend CO<sub>2</sub>-neutral. Wenn am Ende des Produktlebenszyklus eines naturfaserverstärkten Bauteils eines Automobils das Fahrzeug verschrottet und dabei wieder Kohlendioxid aus den Fasern freigesetzt wird, entspricht die Menge der des vorher gebundenen CO<sub>2</sub>. Positiv wirkt sich auch die Energiebilanz von Naturfasern aus. Die erforderliche Energie, die für die Produktion von Naturfasern benötigt wird, beträgt nur rund ein Drittel bis ein Fünftel der Menge, die zur Herstellung von Glasfasern aufgewendet wird [2]. In Bild 1.2 [3] präsentiert Riedel den Energieverbrauch zur Herstellung von Glas- und Naturfasermatten (Öko-Bilanz) und zeigt, dass zur Herstellung von Naturfaservliesen nur ca. 20 % der Energie aufgebracht werden muss wie bei den vergleichbaren Glasfaservliesen (Bild 1.2).

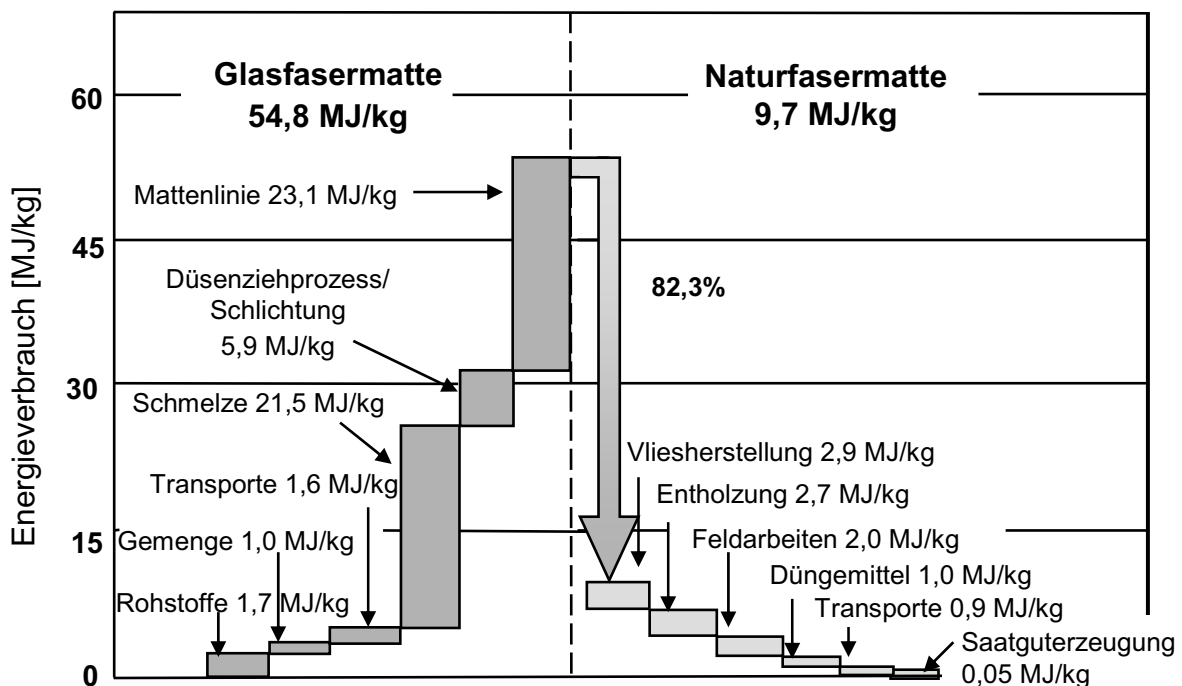


Bild 1.2: Vergleich des Energiebedarfs bei der Herstellung von Glas- und Naturfasermatten [3]

Gleichzeitig lassen sich zum Beispiel bei Türinnenverkleidungen von Kraftfahrzeugen Gewichtseinsparungen realisieren, die während der Nutzungsphase der Fahrzeuge aufgrund des leichtbaubedingten geringeren Kraftstoffverbrauchs zu einer weiteren

deutlichen Einsparung von Energie bzw. Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission führt. Bei der thermischen Verwertung bieten Naturfaserstoffe ebenfalls Vorteile, da der Energieinhalt von Naturfasern in etwa dem von Braunkohle entspricht. Außerdem entsteht bei der Verbrennung nur ein verbleibender Ascheanteil von ein bis zwei Prozent, wogegen bei vergleichbaren glasfaserverstärkten Werkstoffen ein weitaus höherer Ascheanteil von bis zu 30 % anfällt. Die Stoff- und Energiekreisläufe sind geschlossen. Ihre Verwendung kann somit helfen, den sich verstärkenden Treibhauseffekt abzumildern und globalen Klimaveränderungen entgegenzuwirken. Auch bei der Verarbeitung besitzen Naturfasern aus arbeitsmedizinischen Gründen Vorteile. Hautreizungen wie bei der Verarbeitung von Glasfasern treten nicht auf und auch Atemwegserkrankungen sind trotz der Geruchsbelästigung bei der Verarbeitung nicht zu befürchten. Durch die langen und elastischen Stränge splintern naturfaserverstärkte Bauteile bei hochdynamischen Crashbelastungen nicht, was die Verletzungsgefahr bei Unfällen vor allem im Innenraum mindert.

Zur Herstellung von naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK) können die Naturfasern sowohl mit Duroplasten (Epoxid-, Phenol- und Polyurethanharze [4], als auch mit Thermoplasten (Polypropylen [5, 6]) umschlossen werden. Phenol- und Polyurethanharze sollen auf Grund der Emissions- und Geruchswerte im Automobilbau systematisch durch umweltfreundlichere Polymere substituiert werden. Bei der Verbindung von Polypropylen mit Naturfasern entsteht auf Grund des unterschiedlichen chemischen Aufbaus der Moleküle keine richtige Verbindung zwischen beiden Komponenten. Polypropylen ist durch seine gesättigte, unpolare Struktur hydrophob und die Naturfasern aufgrund der ausreichenden OH-Gruppen in ihrer Struktur stark hydrophil. Um eine gute Haftung zwischen Cellulosefasern und Polyolefinen zu erreichen, müssen entweder die Fasern chemisch bzw. physikalisch modifiziert [7, 8] oder dem Verbund muss ein Haftvermittler zugesetzt werden [9, 10, 11]. Haftvermittler bewirken idealerweise die Ausbildung einer chemischen Bindung zwischen Fasern und Matrix [12, 13, 14]. Als Haftvermittler wird meistens maleinsäureanhydridgepfropfte Polypropylene (PP-MAH) eingesetzt. Das in den Haftvermittlern reaktive Anhydrid bildet eine stabile Verbindung zwischen dem Polypropylen und den Naturfasern. Silanhaftvermittler werden sowohl mit Polypropylen als auch mit Polyester eingesetzt [15]. Die Zugabe des Haftvermittlers wirkt sich allerdings negativ auf die Herstellungskosten des Gesamtverbundes aus und wird deshalb für technische Be-

reiche nicht angewendet. Ein häufiger Nachteil thermoplastisches naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe besteht darin, dass bei den gängigen Prozessen eine ausreichende Imprägnierung der Fasern nur sicher zu gewährleisten ist, wenn der Faseranteil im Verbundwerkstoff zwischen 20 und 50 Gew.-% gehalten wird. Im Gegensatz zu thermoplastischen Matrixwerkstoffen können mit duroplastischen Kunststoffen höhere Faseranteile von bis zu 70 – 80 Gew.-% erreicht werden, die sich positiv auf das Eigenschaftspotenzial der Faserverstärkung auswirken. Zusätzlich können mit duroplastischen Kunststoffen auch ohne Haftvermittler bessere Faser-Matrix-Haftungen im Verbund und somit bessere mechanische Kennwerte erzielt werden [16]. Die bestehenden Verarbeitungsverfahren von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) können übernommen werden. Die Verarbeitung ist mit vielen bekannten Verfahren möglich [17, 18].

Das Einsatzgebiet von naturfaserverstärkten Kunststoffen beschränkt sich im europäischen Raum fast ausschließlich auf die Automobilindustrie zu dessen Einsatzgebiete umfangreiche Forschungsarbeiten vorliegen [19, 20, 21, 22, 23]. Die Industrie hat vor allem in den letzten Jahren erhebliche Entwicklungsfortschritte vollzogen und bietet eine Vielzahl von Lösungen an, um NF Verbundwerkstoffe erfolgreich einzusetzen. Zuerst wurden Naturfasern in der Fahrzeugindustrie als Dämmstoffe verwendet. Heute werden naturfaserverstärkte Kunststoffe vor allem im PKW-Innenraum eingesetzt. Typische Anwendungen reichen von Türinnenverkleidungen, Hutablagen, Kofferraumauskleidungen und Säulenverkleidungen bis hin zum Armaturenbrett. Auch für den Außenbereich werden erste Bauteile unter Verwendung dieser Materialien in Serie produziert (in 2005 wurde zum ersten Mal die Reserveradmulde der A-Klasse von Mercedes in Serie hergestellt [24]).

Die aufwändigen Türkonstruktionen in den meisten deutschen Mittel- und Oberklassefahrzeugen werden heute mit NF auf Flachs, Hanf, Jute, Kenaf, Sisal oder auch Abaca Basis ausgestattet [23] (Bild 1.3).

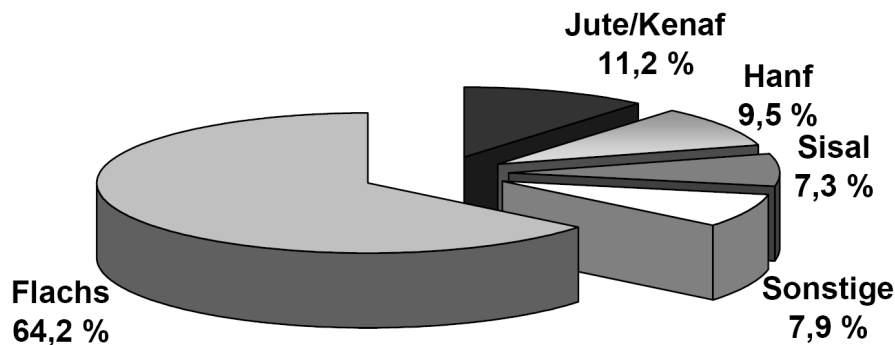


Bild 1.3: Einsatz von Naturfasern für Verbundwerkstoffe in der Deutschen Automobilproduktion 2005 [23]

Im Gegensatz zu Hanf- oder Kenaffasern, deren kurze Fasern für den technischen Einsatz die Hauptwertschöpfung der Pflanze aufweist, werden Flachsfasern hauptsächlich für den Textilbereich eingesetzt. Die klassische Gewinnung textiler Langfasern ist ein hoch spezialisierter und aufwändiger Prozess, aus dem teure Feingarne höchster Qualitäten resultieren. Als Nebenprodukt dieser Flachslangfaserproduktion fallen Flachskurzfasern an.

Betrachtet man die Preisentwicklung von Hanf- und Flachsfasern in den letzten Jahren (Bild 1.4), so zeigen die Hanffasern eine hohe Preisstabilität, während der Marktpreis für Flachsfasern großen Schwankungen unterliegt. Diese Schwankungen werden durch den hohen Exportanteil von 60 bis 80 % der europäischen Flachsproduktion für den Textilbereich nach China begründet, deren Nachfrage stark von Modetendenzen oder Lagerbeständen des chinesischen Marktes abhängt [26]. Die Stabilität der Hanffaserpreise begründet sich mit der Notwendigkeit der Kostendeckung, die eine Preisgrenze nach unten bildet, und durch die Konkurrenz mit Substitutionsprodukten aus anderen Bastfasern wie Flachs, Kenaf und Jute, die ein starkes Ansteigen der Preise verhindert.

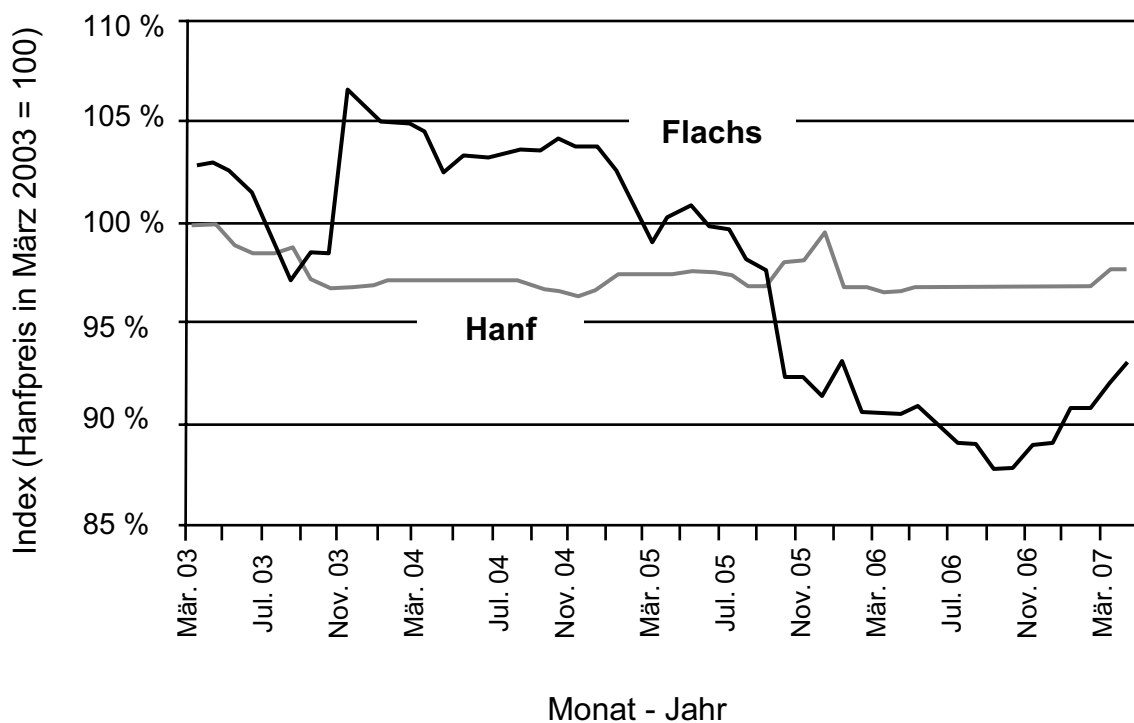


Bild 1.4: Preisentwicklung von einheimischen Flachs- und Hanffasern (Preise auf den Preis vom Hanf im März 2003 normiert) [25]

Nachteilig bei der Herstellung von NFK auf Flachsbasis wirkt sich die natürliche Wachsschicht der Flachsfasern aus. Diese Schicht, die durch ihren Glanz für die Bekleidungsindustrie beim Endprodukt von starkem Interesse ist, erschwert aufgrund der schlechten Faser-Matrix-Haftung die Herstellung von Verbundwerkstoffen. Eine Vorbehandlung der Fasern kann diese Schicht entfernen und die Eigenschaften des Verbundes verbessern, führt aber zu einem zusätzlichen Prozessschritt und folglich zu höheren Kosten.

Naturfasern werden aber nicht nur auf Grund der Ökologie oder ihrer positiven Materialeigenschaften eingesetzt sondern vor allem wegen ihres hervorragenden Preis-Leistungs-Verhältnisses. Durch die immer knapper werdenden synthetischen Rohstoffe und die daraus resultierenden Preiserhöhungen (Bild 1.5) sowie das über Jahre hinweg stabile Preisniveau der technischen Naturfasern [26, 27] (aktuell 0,50 bis 0,60 €/kg [28]) wird für NF-Kunststoffe ein in Zukunft stark wachsendes Marktvolumen prognostiziert [29].

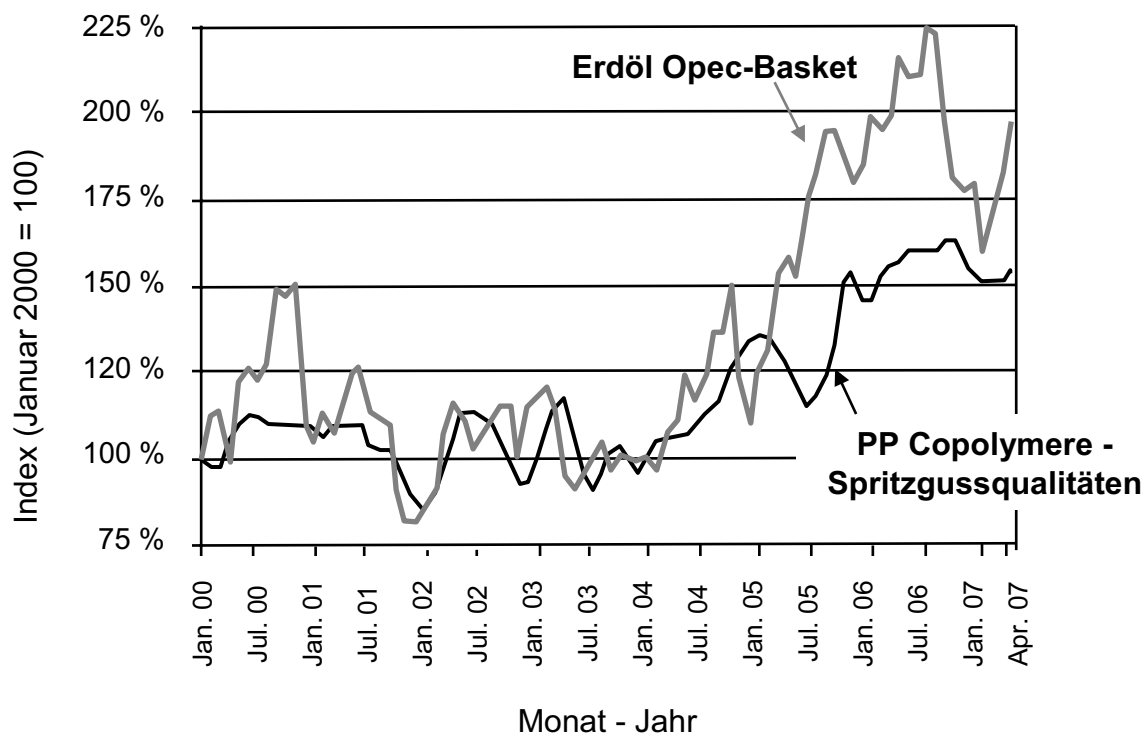


Bild 1.5: Preisentwicklung von Erdöl und Standard-Thermoplaste seit 2000 [25].

In Bild 1.5 ist die Preisentwicklung über die Jahre auf den im Januar 2000 auf dem Markt realisierbaren Rohstoffpreis (100%) bezogen.

### 1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines naturfaserverstärkten Kunststoffes mit einem hohen Naturfaseranteil von ca. 80 Gew.-%. Zur Entwicklung des Verbundes müssen sowohl werkstoffliche Aspekte (Materialauswahl und Zusammensetzung des Halbzeuges) als auch die Prozessparameter (Temperatur, Zeit und Druck) bei der Verarbeitung im Pressverfahren berücksichtigt werden. Die Eigenschaften des Bauteils sollen den hohen Anforderungen der Automobilindustrie, insbesondere in Bezug auf Biegefestigkeit, Biege-E-Modul, Schlagzähigkeit, Wasseraufnahme, Emissions- oder Geruchswerte erfüllen. Zusätzlich werden Einsatzmöglichkeiten außerhalb der Automobilindustrie betrachtet.

Hanf- und Kenaffasern wurden für diese Arbeit ausgewählt, da beide Faserarten eine alternative zu Flachfasern anbieten, deren Preise und Verfügbarkeit sehr stark von der Textilindustrie abhängig sind. Durch die intensive mechanische und morphologi-



sche Charakterisierung der Fasern soll untersucht werden, ob diese beiden rein mechanisch aufgeschlossenen Faserarten das Qualitätsniveau von Flachsfasern erreichen.

In dieser Arbeit wird für die Applizierung der Matrix auf die Naturfaservliese der Foulardierprozess eingesetzt. Unterschiedliche Bindemittel verschiedener Hersteller sollen im Tauchverfahren auf die Naturfaservliese aufgebracht werden, um die Frage der Einsatzmöglichkeit des Applizierungsverfahrens zu verfolgen. Verschiedene Aspekte wie Arbeitsbedingungen, Lagerstabilität des Halbzeuges und mechanische Eigenschaften des Verbunds werden zur abschließenden Bewertung der Matrix berücksichtigt. Eine Auswahl der Substanzen mit den besten Untersuchungsergebnissen wird in den nachfolgenden Arbeitsschritten weiter verwendet.

Die somit hergestellten Halbzeuge werden im Pressverfahren verarbeitet. Neben der Zusammensetzung der Halbzeuge spielen die Verarbeitungsparameter Temperatur, Zeit und Pressdruck eine entscheidende Rolle für die Qualität von Bauteilen aus naturfaserverstärkten Kunststoffen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Abhängigkeit der Eigenschaften naturfaserverstärkter Kunststoffe von den Pressbedingungen untersucht. Die drei Verarbeitungsparameter werden intensiv analysiert und für die Verarbeitung von naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffen im Pressverfahren optimiert. Durch eine systematische thermische, mechanische und morphologische Charakterisierung des Materials sollen die Limitationen von NF bei der Verarbeitung ermittelt und somit der Prozess optimiert werden.

Für die Verarbeitung wird eine neue Technologie erprobt, die es erlaubt die Presse unter Vakuum zu betreiben. Hiermit soll sichergestellt werden, dass die Restfeuchte und die Kondensationsprodukte der Härtungsreaktionen direkt beim Pressverfahren entweichen können, was zu einer deutlichen Reduzierung der Press- und somit der Zykluszeiten führen würde.

Die Eigenschaften des somit hergestellten Bauteils sollten die Eigenschaften anderer etablierter naturfaserverstärkter Kunststoffe erreichen und die Anforderungen der Automobilindustrie für den Einsatz des Materials für Interieurbauteile erfüllen.

Im Bild 1.6 ist der Aufbau und die Vorgehensweise der Arbeit dargestellt.

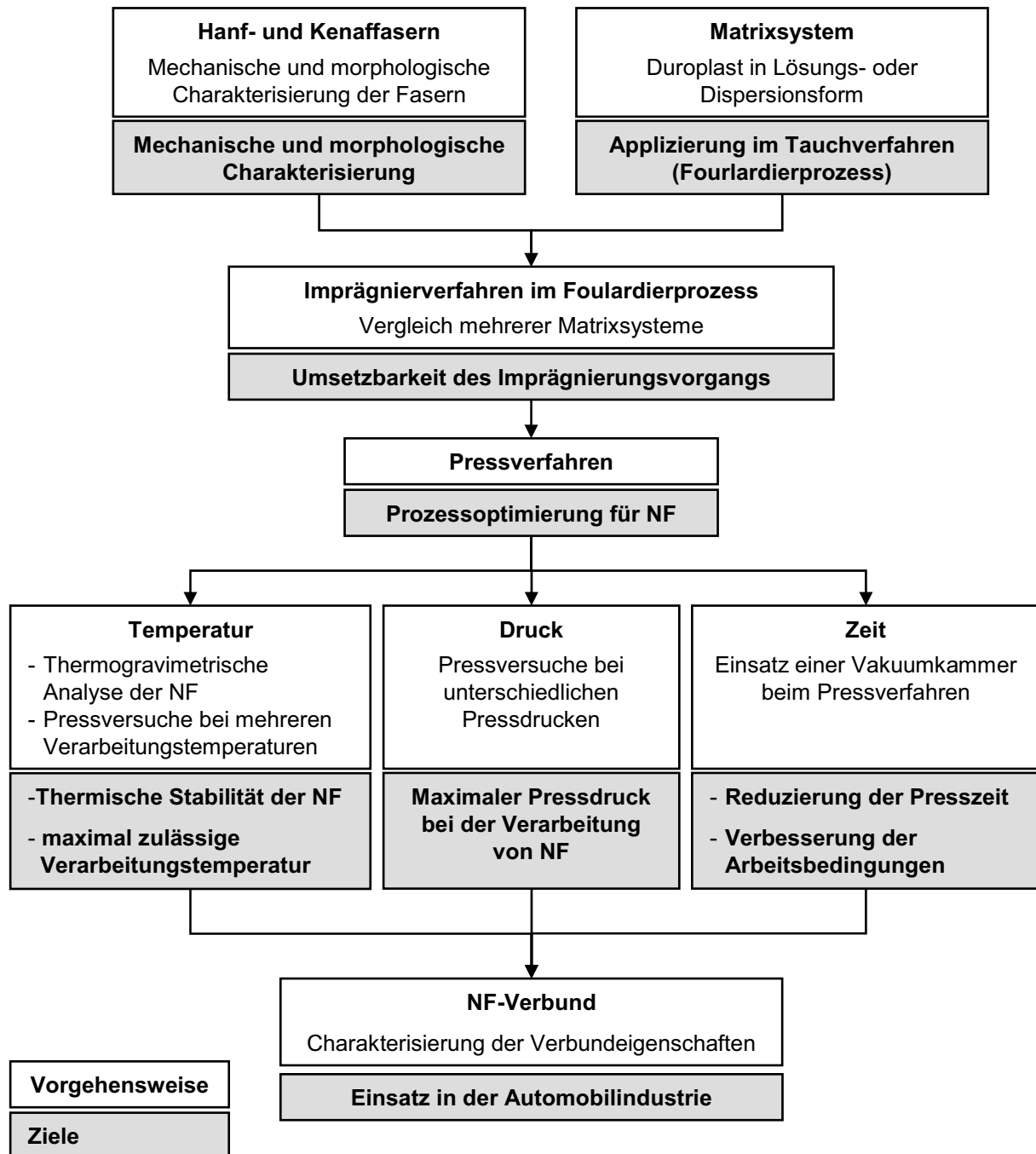


Bild 1.6: Aufbau und Vorgehensweise der Arbeit

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Naturfasern

#### 2.1.1 Definition und Untergliederung von Naturfasern

Nach DIN 60 001-1: Textile Faserstoffe, Teil 1: Naturfasern und Kurzzeichen [30], werden Naturfasern wie folgt definiert: „Natürliche, linienförmige Gebilde, die sich textil verarbeiten lassen. Sie können von Pflanzenteilen gewonnen werden oder das Haarkleid von Tieren bilden oder von den Kokons der Seidenspinner gewonnen werden oder mineralisch, natürlichen Ursprungs sein“. Diese Definition und übliche Einteilungen [18, 31] der Naturfasern schließen Holzfasern aus und vernachlässigt ihre korrekte Einordnung unter dem Oberbegriff Naturfasern. Eine neue Systematik der Einteilung der verschiedenen Fasern wurde von Schnegelsberg [32] erarbeitet und von Müssig [33] umgesetzt (Bild 2.1).

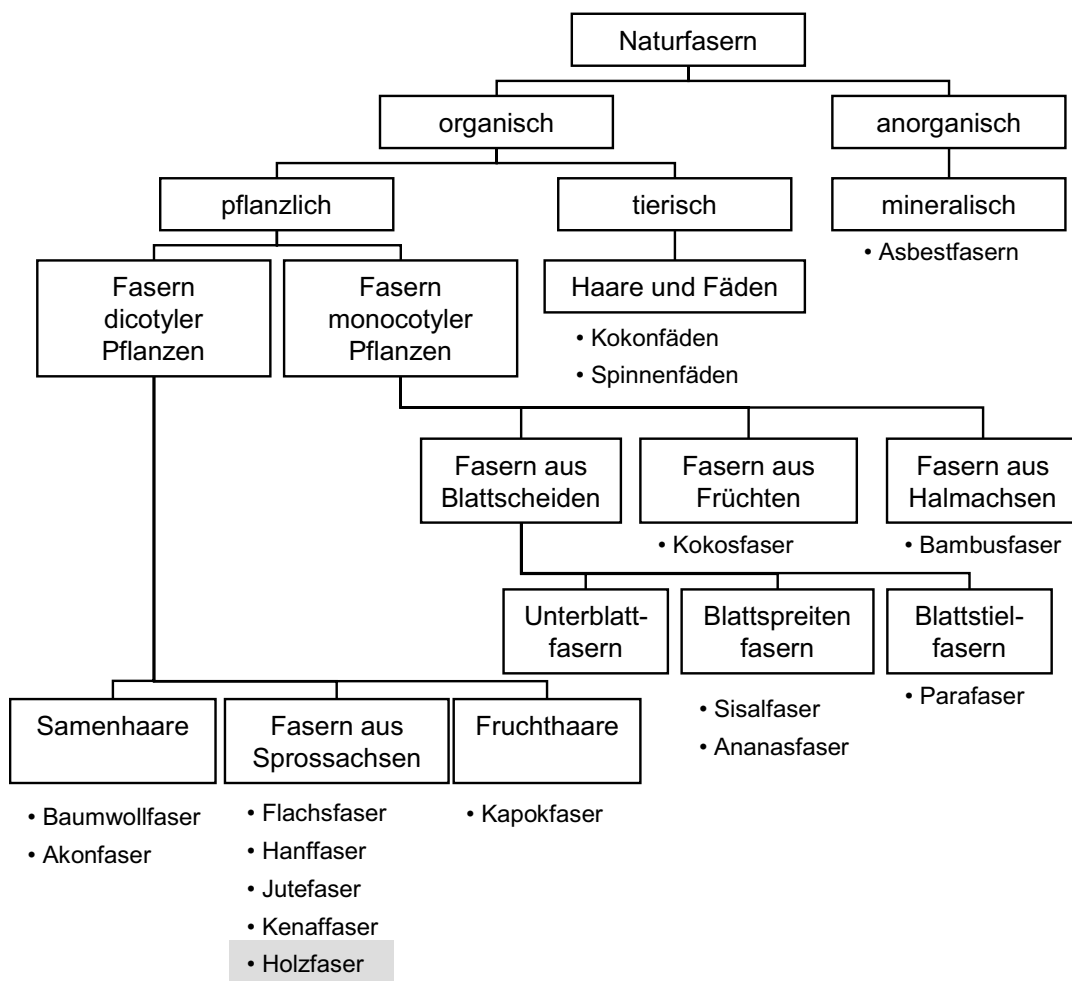


Bild 2.1: Einteilung der Naturfaser nach Müssig [33]

Nach dieser neuen Einordnung lassen sich botanisch die Holzfasern zusammen mit Hanf-, Flachs- und Kenaffasern als „Fasern aus Sprossachsen der dicotyler Pflanzen“ einordnen. Sperber [34] ordnet Holzfasern zusammen mit Bast- oder Blattfasern direkt als Cellulose Fasern ein. Unabhängig von den unterschiedlichen Einteilungen ist heutzutage die Zugehörigkeit von Holzfasern unter dem Oberbegriff Naturfasern umstritten.

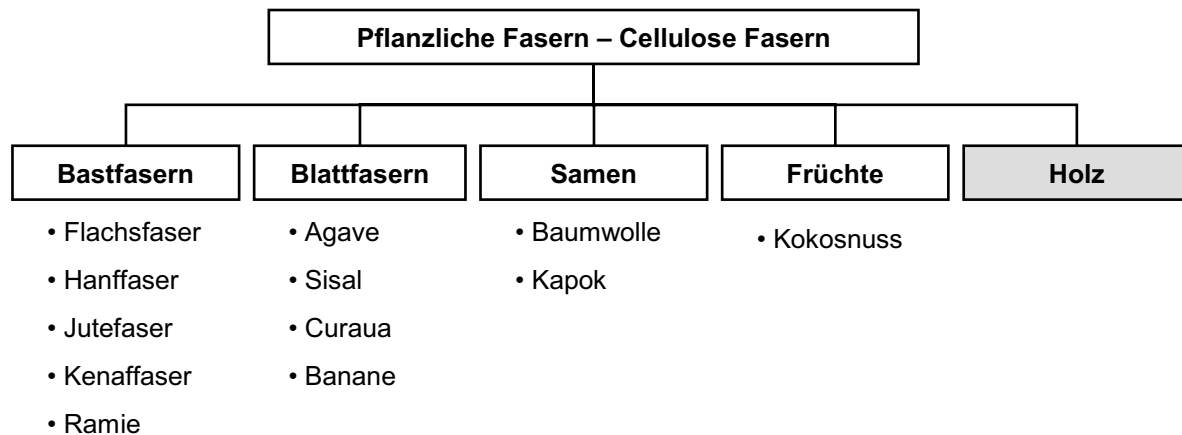


Bild 2.2: Einteilung der pflanzlichen Fasern nach Sperber [34]

Holzfasern werden seit Jahrzehnten als Verstärkung in Verbundwerkstoffen eingesetzt. Die wichtigsten Anwendungsgebiete für WPC (Wood Plastic Composites) finden sich in Nordamerika im Bausektor (Terrassen, Verandas, Fenster, Türen) und der Infrastruktur (Promenaden, Lärmschutzelemente, etc.). Der europäische Markt ist deutlich kleiner und noch in der Entwicklungsphase. Nach Expertenmeinung bietet der europäische Markt ein großes Potenzial im Bereich der Bau-, Möbel- und Automobilindustrie und auch in vielen Installationen im Außenbereich.

Neben Holzfasern sind Bastfasern aufgrund ihres Eigenschaftsprofils zur Herstellung von Verbundwerkstoffen von besonderem Interesse. Bastfasern werden aus den Stengeln von zweikeimblättrigen, krautigen Pflanzen (Dicotyledon) gewonnen. Diese robusten Pflanzenfasern, die der Pflanze als Verstärkungselemente dienen, werden vorwiegend zu groben Geweben, Teppichen und anderen Artikeln des täglichen Bedarfs verarbeitet. Die Pflanzenarten mit der größten wirtschaftlichen Bedeutung sind Flachs (LI), Hanf (HA), Jute (JU) und Kenaf (KE). Naturfaserverstärkte Kunststoffe zeichnen sich durch günstige mechanische und akustische Eigenschaften aus. Weiterhin sind sie leicht, zeigen ein gutes Dämpfungsverhalten, geringe Splitterneigung

und damit auch positives Crash-Verhalten. Ferner verursachen sie einen geringen Werkzeugverschleiß und lassen sich vielseitig be- und verarbeitet. Außerdem sind Naturfasern kostengünstig, vor allem wenn technisch weiterentwickelte Ernte- und Aufbereitungsverfahren eingesetzt werden.

### 2.1.2 Struktur und chemischer Aufbau von Naturfasern

Der Stängel einer Bastfaserpflanze zeigt von außen nach innen betrachtet folgenden Aufbau (Bild 2.3): Die Epidermis umschließt das Rindengewebe, in das die Bastfaserbündel eingelagert sind. An das Rindengewebe schließt sich der Holzzylinder, auch Schäben genannt, an. Im Inneren befinden sich das Mark und ein Hohlraum, das Lumen. Technisch nutzbar sind die Bastfaserbündel und die Schäben.

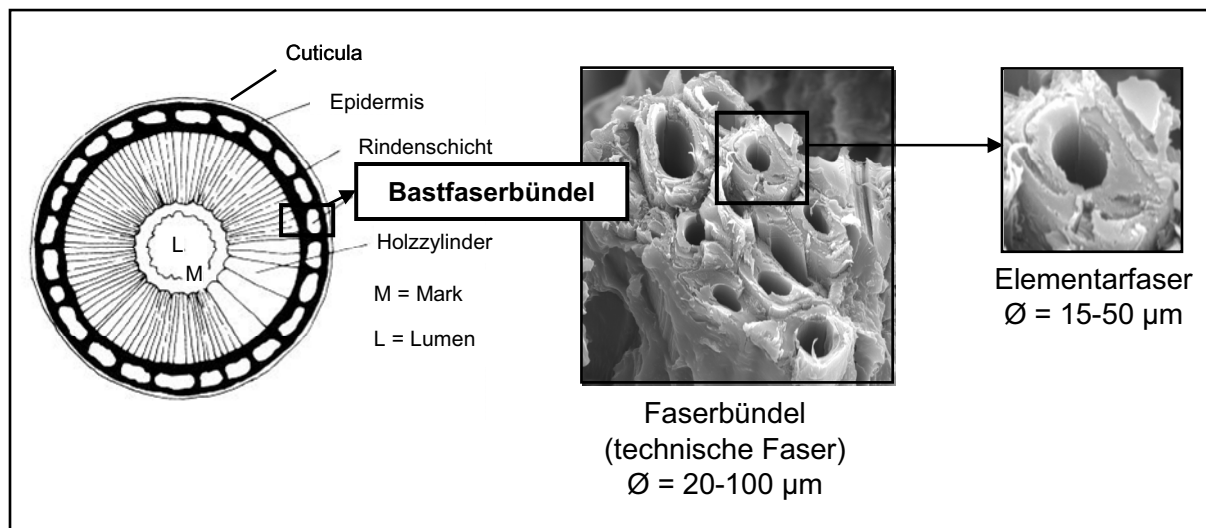


Bild 2.3: Schematische Querschnitt eines Bastfaserpflanzenstängels [nach 44], REM-Aufnahme eines Faserbündels und Detail einer Elementarfaser

Die Länge der Fasern beträgt ein Vielfaches (das Tausend- oder Vieltausendfache) des Durchmessers. Der Feinbau einer Faser zeigt, dass diese aus lang gestreckten Bündeln von Fibrillen besteht. Jede Fibrille hat in ihren Abmessungen ein ähnliches Verhältnis wie die Faser, und besteht selbst aus vielen Makromolekülen. Bei Pflanzenfasern handelt es sich bei diesen Makromolekülen fast ausschließlich aus Cellulose. Cellulose, die das Gerüst der Fasern bildet, ist mit einem Anteil von ca. 64-83 % die Grundsubstanz aller Pflanzenfasern. Die chemische Untersuchung dieser Makromoleküle hat ergeben, dass sie einen kettenförmigen Aufbau haben und aus kleinen Bausteinen, den Monomeren, zusammengesetzt sind, die sich innerhalb die-

ser Kette vielfach wiederholen. Diese Kettenmoleküle haben in Kettenrichtung eine Länge von ein- bis mehrere tausend Atomen und eine Breite von 2 bis 5 Atomen. Sie besitzen somit ein ähnliches Verhältnis zwischen Länge und Durchmesser, wie die aus ihnen aufgebauten Fasern selbst [35].

Neben der Cellulose bestehen Naturfasern aus Hemicellulose, Lignin oder Pektin, deren Aufgabe darin besteht, die Elementarfibrillen in den Mikrofibrillen miteinander zu verbinden. In Tabelle 2.1 ist die chemische Zusammensetzung ausgewählter Naturfasern dargestellt, wobei diese Zusammensetzung durch das Faseraufschlussverfahren und die Reinigung der Faser stark beeinflusst wird.

Tabelle 2.1: Bestandteile bedeutender Naturfasern [36, 37, 38, 39]

Fasertyp	Cellulose [Gew.-%]	Hemicellulose [Gew.-%]	Lignin [Gew.-%]	Pektin [Gew.-%]	Wachse [Gew.-%]
Grünflachs	56	15	2,5-5	3,8-25	1,3
Röstflachs	65-74	13-19	0,9-2,5	0,9-3,0	1,5-1,7
Hanf	67-74	16-18	3,3-3,7	0,8-0,9	0,7-0,8
Rösthanf	67	16	3,3	0,8	0,7
Kenaf	60-72	11-27	2,3-4,7	0,2-2,0	1,4
Ramie	68,6	13,1	0,6	1,9	0,3
Jute	60-64	16-20,4	12-14	0,2-0,8	0,5-1
Sisal	66-78	10-12	8-12	0,8	0,3-2,0

Cellulose ist ein Homopolysaccharid und besteht aus Glucoseeinheiten, die  $\beta$ -glucosidisch in 1,4-Stellung miteinander verknüpft sind. Cellulosemoleküle sind lineare Makromoleküle und haben eine starke Tendenz, intra- und intermolekulare Wasserstoffbrücken zu bilden. Bündel von Cellulosemolekülen sind in der Form von Mikrofibrillen angeordnet, in denen sich sehr geordnete (kristalline) Regionen mit weniger geordneten (amorphen) Regionen abwechseln. In den kristallinen Bereichen bildet die Cellulose - bedingt durch die Ausbildung der höchstmöglichen Zahl an Wasserstoffbrücken - eine dreidimensionale Struktur aus. Mehrere Mikrofibrillen bilden die Elementarfaser, die durch Hemicellulosen zu Faserbündeln zusammengehalten werden. Diese Faserbündel werden durch Ligninen an der externen Struktur der Faserpflanzen gebunden.

Bild 2.4 [40] zeigt schematisch den Aufbau einer Flachsfaser. Hanf- und Kenaffasern sowie andere Bastfasern weisen einen ähnlichen strukturellen Aufbau auf.

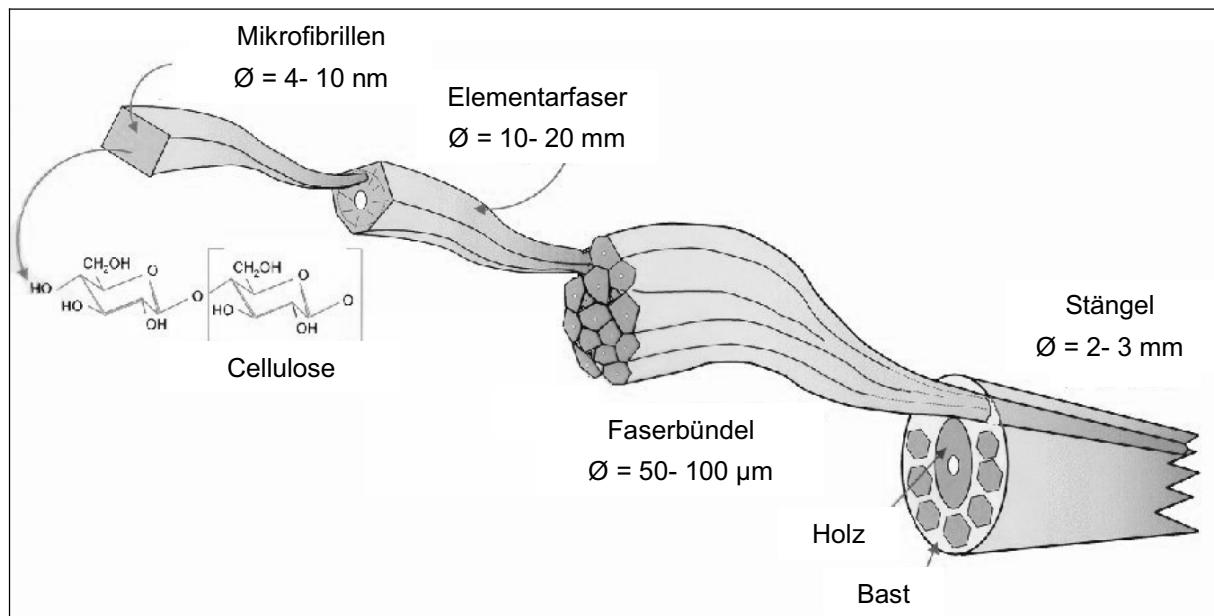


Bild 2.4: Aufbau einer Flachsfaser [nach 40]

Infolge ihrer Struktur und ihrer starken Wasserstoffbrückenbindungen sind die Cellulosefasern dehnbar und in vielen Lösungsmitteln weitgehend unlöslich. Ferner ist die Cellulose verhältnismäßig thermisch beständig und wird erst bei Temperaturen von ca. 350 °C thermisch degradiert. Dennoch besitzen NF eine niedrige Temperaturbeständigkeit, da Faserkomponenten wie Lignine schon ab Temperaturen von ca. 220 °C thermisch degradieren [41].

Hemicellulosen (auch Polyosen genannt) sind Heteropolysaccharide, die wie auch die Cellulose als Stützmaterial in den Zellwänden dienen. Man unterscheidet zwischen Hexosanen (wie Glucan, Galactan oder Mannan) und Pentosanen (wie Xylan und Araban), abhängig von den Zuckerbausteinen, aus denen die betreffenden Polysaccharide aufgebaut sind. Hemicellulosen unterscheiden sich von der Cellulose dadurch, dass ihre Molekülketten stark verzweigt sind. Diese unregelmäßige Struktur erschwert die Kristallisation. Daher sind Polyosen im Allgemeinen flexibler und leichter löslich. In der Regel sind die Polymerisationsgrade der Polyosen geringer als die der Cellulose. Nach den neuesten Erkenntnissen existieren keine chemischen Bindungen zwischen Cellulose und Hemicellulosen, jedoch entstehen durch Wasserstoff-

brücken und Van-der-Waals-Kräfte physikalischen Bindungen. Hingegen binden Hemicellulose und Lignin chemische Bindungen aus.

Lignin, (von lateinischen lignum = Holz) auch „Holzstoff“ genannt, ist ein hochmolekulares, vorwiegend dreidimensionales amorphes Polymer das in verholzenden Pflanzen das Gefüge der aus vorwiegend linear gebauten Polysacchariden bestehenden Membran und Zellen und die Zellzwischenräume ausfüllt, versteift und hierdurch zu Holz werden lässt. Die Größe des Ligninmoleküls und insbesondere seine komplizierte Struktur sowie die große Vielfalt der Bindungsarten im Ligninmolekül werden als Ursache für den langsamen Abbau verantwortlich gemacht [42]. Eine Aussage über das Molekulargewicht des nativen Lignins kann wegen der Schwierigkeit seiner Isolierung nur eingeschränkt getroffen werden. Die relative niedrige Temperaturstabilität der Lignine (ca. 220 °C) bestimmt die Verarbeitungstemperatur von Naturfasern.

Pektin ist ebenfalls ein wichtiger Bestandteil der Zellwände von höheren Pflanzen. Pektin besteht in der Hauptstruktur vorwiegend aus (1-4)-verknüpfter  $\alpha$ -D-Galacturonsäure (Homogalacturonan) sowie verzweigten Bereichen deren Rückgrat alternierend aus (1-4)-verknüpfter  $\alpha$ -D-Galacturonsäure und (1-2)-verknüpfter  $\alpha$ -L-Rhamnose aufgebaut ist (Rhamnogalacturonan). Die Hauptbausteine der Seitenketten sind Arabinose und Galactose, die unterschiedlich verknüpft sind. Als Gerüst- und Kittsubstanz gewährleistet es den Zusammenhalt und die Festigkeit der Zellen. So ist die Stärke der Pflanzenzellwand abhängig von der Orientierung der Ketten, den mechanischen Eigenschaften und den Quervernetzungen zwischen Pektin und Cellulosefasern. Sofern nach dem Rostvorgang Pektin übrig bleibt, sorgt dieser für eine sehr schnelle Feuchtigkeitsaufnahme.

### **2.1.2.1 Hanffasern**

Hanf (*Cannabis sativa* L.) ist eine einjährige, zweihäusige (weibliche und männliche) Faserpflanze, die zu den Cannabisgewächsen gehört [43, 44]. Hanf ist eine der ältesten und bekanntesten Kulturpflanzen der Welt. Zentralasien gilt als seine Heimat. Inzwischen ist die Hanfpflanze weltweit zu finden, da die Pflanze unter fast jeden klimatischen Bedingungen und auf nahezu jedem Boden angebaut werden kann [45]. Die krautartige Hanfpflanze weist einen steifen Stängel auf, der wenig verzweigt ist. In Deutschland erreichen die Pflanzen eine Höhe von ca. 2 m, in ursprünglichen Anbauländern 4 bis 7 m. Der Durchmesser des Stängels variiert zwischen 3,5 und



8,4 cm [36]. Ein Bastfaserbündel besteht gewöhnlich aus 2 bis 20 Elementarfasern, kann aber aus bis zu 40 und mehr Einzelfasern bestehen. Die Länge der Bastfaserbündel (technische Länge) beträgt 1 bis 3 m und ist wie bei allen Bastfasern von der jeweiligen Hanffasertypen abhängig. Für die Verarbeitung werden die Bündel auf 600 bis 750 mm geschnitten.

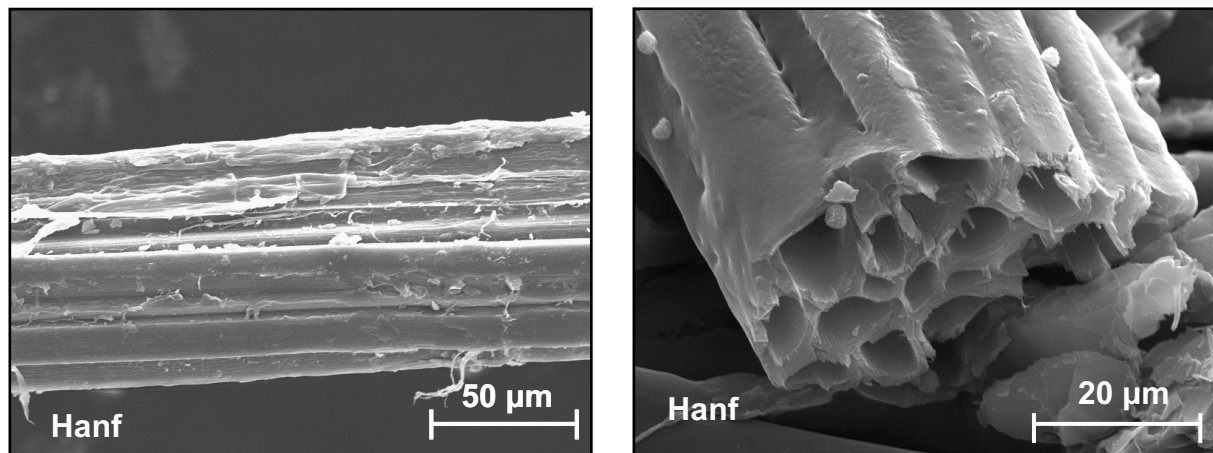


Bild 2.5: Längsansicht und Querschnitt eines Hanffaserbündels

Die Länge der Elementarfasern beträgt 1 bis 100 mm. Die in der Literatur am häufigsten genannten Werte liegen jedoch, je nach Autor, zwischen 10 und 40 mm [36, 44, 45]. Der Durchmesser schwankt zwischen 15 und 50 µm. Der Querschnitt zeigt die für den Hanf typischen unregelmäßigen Begrenzungen der Elementarfasern (Bild 2.5). Die Längsansicht weist Querverschiebungen auf. Hanf kann eine bis zu 20 % höhere Zugfestigkeit als Flachs besitzen und zählt mit der Ramie zu den festesten Naturfaserstoffen. Die Nassfestigkeit beträgt 106-108 % der Festigkeit [43]. Deshalb werden Hanfgarne für die Erzeugung von Matratzenüberzügen, Liegestuhlbespannungen, Zelten, Planen oder Gurten verwendet.

### 2.1.2.2 Kenaffasern

Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) ist eine einjährige Pflanze, die zur Familie der Malvengewächse gehört. Der Artnamen „cannabinus“ lässt sich von der ähnlichen Blattform des Hanf (*Cannabis*) ableiten. Kenaf hat seine ursprüngliche Heimat im tropischen Afrika und Vorderindien. Zurzeit wird Kenaf vor allem in Thailand, Indien, Pakistan und in den USA angebaut. In Europa gedeiht Kenaf auf Körnermaisstandorten [46]. Kenaf ist in Mitteleuropa einjährig, könnte aber ohne Frost mehrjährig sein.

Kenafpflanzen haben einen sehr hohen Wärmebedarf mit einer optimalen Wachstumstemperatur von ca. 25 °C.

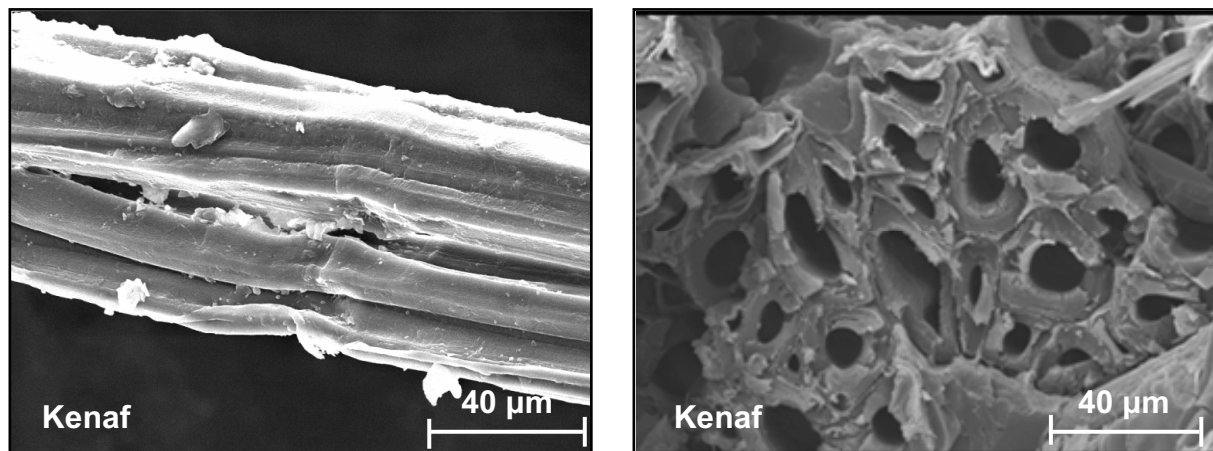


Bild 2.6: Längsansicht und Querschnitt eines Kenaffaserbündels

Die Kenafpflanze besitzt einen Stängel von 1,5 bis 3,5 m Höhe und 1 bis 3 cm Durchmesser. In der 2 bis 5 mm dicken Bastschicht unter der Rinde liegen die sehr reißfesten Fasern. Die Kenaffasern sind 1,5 bis 6 mm lang und können rein mechanisch aufgeschlossen werden. Darin besteht der große Vorteil gegenüber anderen Faserpflanzen wie Hanf, Flachs und Holz, bei denen meist eine natürliche oder chemische Röste (das für Naturfasern am häufigsten eingesetzte Aufschlussverfahren) notwendig ist. Die Elementarfasern haben unregelmäßige Wandverdickungen, eine Länge zwischen 2 und 4 mm und eine Breite von 14 bis 35 µm (durchschnittlich 20 bis 25 µm).

Kenaffasern sind vielseitig anwendbar. Mit Kenaffasern können spezielle Folien für den Gartenbau, Verpackungsmaterialien, Spezialpapiere sowie Schnüre und Säcke hergestellt werden [47]. Heutzutage finden Kenaffasern ebenfalls bei der Nadelfilz- oder Vliesherstellung Verwendung. Außerdem können aus Kenaffaser Autopressteile, Polsterträger, Geotextilien oder Hochbau-Dämmstoffe hergestellt werden.

### 2.1.3 Eigenschaften von Naturfasern

#### 2.1.3.1 Mechanische Eigenschaften

Die Angaben der mechanischen Eigenschaften von Naturfasern in der Literatur sind sehr unterschiedlich. Die Eigenschaften von Naturfasern hängen von mehreren Faktoren, wie Boden, klimatischen Bedingungen, Erntezeit oder Aufschlussverfahren ab.

Moderne Anbau- und Erntemethoden lassen die Qualität und damit die Eigenschaften von Naturfasern aus einem Anbauggebiet sehr konstant ausfallen. Das Aufschlussverfahren hat einen großen Einfluss auf die Faserdurchmesser, der von der Faserbündelgröße abhängt. Dies führt zu großen Ungleichmäßigkeiten in der Struktur der technischen Fasern, die ebenfalls zu Unregelmäßigkeiten der Fasereigenschaften führen kann. Alle diese Faktoren führen zu starken Streuungen der in der Literatur gefundenen Werte.

Für den Einsatz von Naturfasern in technischen Bereichen sind ihre Dichte und mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit, Dehnung und der E-Modul von großer Bedeutung. Die mechanischen Kennwerte der Naturfasern liegen zwar niedriger als die von Glasfasern, wenn sie aber auf die niedrige Dichte der Naturfasern (zwischen  $1,4 - 1,5 \text{ g/cm}^3$ ) bezogen werden, sind diese Werte mit denen von Glasfasern vergleichbar [17]. Typische Kennwerte der am häufigsten eingesetzten Naturfasern sind in Bild 2.7 [18] zusammen gestellt.

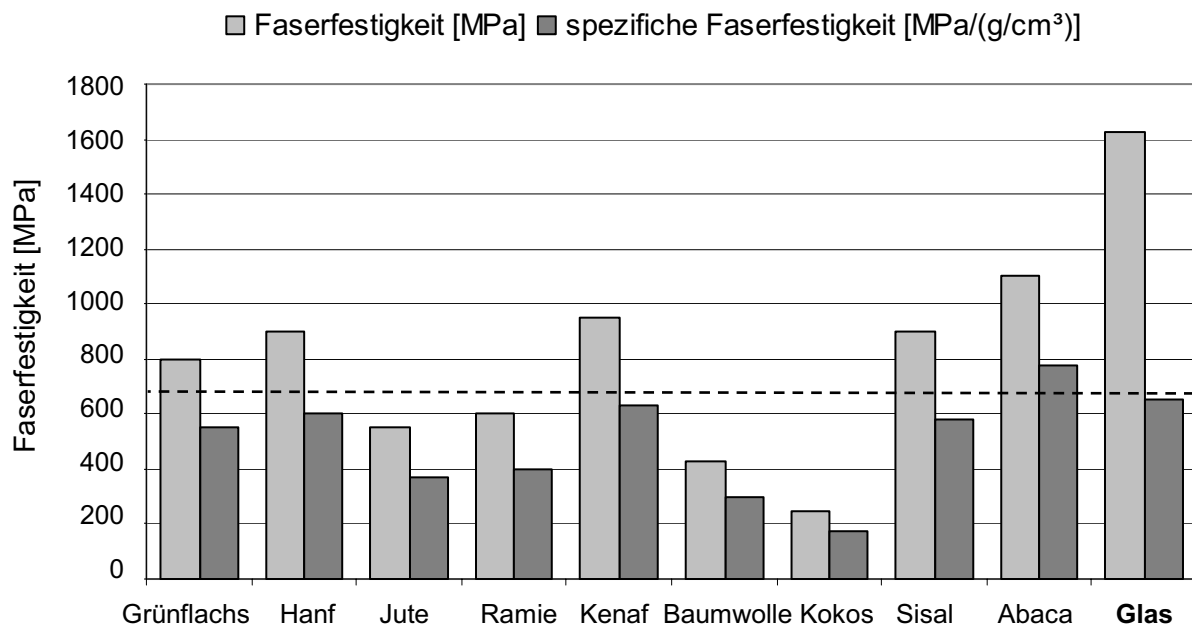


Bild 2.7: Zugfestigkeit verschiedener Naturfasern [18]

Die Festigkeitswerte der Naturfasern zeigen ebenfalls eine große Abhängigkeit von ihrer Dicke bzw. Messlänge. Je dicker oder länger die Fasern, desto niedriger sind die ermittelten Messwerte. Dies liegt an der ungleichmäßigen Struktur und den Fehlstellen der Fasern, die mit der Erhöhung der Probengröße zunehmen. Entsprechend

ändert sich die Festigkeit mit der Einklemmlänge, welche mit der Weibull-Statistik beschrieben wird.

### 2.1.3.2 Wasseraufnahmeverhalten

Problematisch für den Einsatz von Naturfasern als Verstärkung in Verbundwerkstoffen sind das hohe Wasseraufnahmevermögen der Naturfasern und deren geringe Haftung an hydrophoben Polymeren. Insbesondere zwischen einer gesättigten unpolaren Matrix und der hydrophilen Cellulosefaser kann eine praktisch relevante Adhäsion nur über spezielle Behandlungen aufgebaut werden. Die hohe Feuchte- bzw. Wasserabsorption der Naturfasern und infolgedessen deren Verbunde, haben die Anwendung der Naturfasern bisher sehr eingeschränkt [12, 48, 49, 50, 51, 52].

Die Hauptbestandteile der Naturfasern Cellulose und Hemicellulose sind sehr hygroskopisch und können Wasser hauptsächlich durch Diffusion und kapillare Bewegung absorbieren [57]. Das Wasseraufnahmevermögen von Naturfasern ist normalerweise sehr hoch und wird hauptsächlich durch flüssiges Wasser in der Faserstruktur bestimmt.

Wasser kann von Fasern auf drei verschiedene Arten gebunden werden [53]:

- als Haftwasser an der Oberfläche durch Wasserstoffbrücken zwischen den Wassermolekülen und polaren Gruppen (z.B. Hydroxylgruppen) der Fasern (adhäsiv gebunden)
- als Flüssigkeit in der Faserstruktur wie z.B. im Lumen
- als Wasserdampf im Faserinnern (absorptiv gebunden)

Haftwasser bildet sich insbesondere zwischen den Wassermolekülen und den Hydroxylgruppen der Hemicellulosen, da diese stark verzweigte Moleküle sind, welche die Kristallisation erschweren. Die Hydroxylgruppen in der Cellulose sind in den kristallinen Regionen miteinander verbunden, so dass die Wasseraufnahme der Cellulose in den amorphen Regionen eingeschränkt ist. Lignin spielt bei der Wasseraufnahme eine untergeordnete Rolle.

Wasser kommt mit den Fasern als Flüssigkeit bei z.B. der Röste oder als Dampf durch die Luftfeuchtigkeit in Verbindung. Bei Kenaf- und Hanffasern liegt der Feuchtigkeitsgehalt je nach Raumbedingungen zwischen 5 Gew.-% und 14 Gew.-%. Die

Sättigungswerte für die Lagerung bei tropischem Klima (40 °C und 90 % r.h.) beträgt bis zu 25 % und liegt damit bis zu dreimal höher als bei Normalklima. Naturfaservliese, die 24 Stunden bei 100 °C getrocknet wurden, nehmen schon nach etwa 7 Minuten 1 % Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf [54].

Mehrere Veröffentlichungen [10, 13, 49, 55, 56, 57, 58, 59] berichten über den linearen Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme und Fasergehalt im Verbund. Je höher der Fasernanteil, desto ist höher seine Wasser- bzw. Feuchtigkeitsaufnahme und entsprechend größer wird die Quellung. Tendenziell wird über eine Verringerung der mechanischen Kennwerten durch die Steigerung der Wasseraufnahme und Eintauchzeit berichtet [55, 49, 57, 59, 60, 61]. Die aufgenommene Wassermenge kann die Oberfläche der Fasern oder ihre mechanischen Eigenschaften sehr stark beeinflussen. Im Allgemeinen wird über die Problematik hinsichtlich Benetzung, Haftung und mechanische Eigenschaften wie Scherfestigkeit oder E-Modul durch das hygroskopische Verhalten und Quellvermögen der Naturfasern berichtet.

Eine Erklärung dafür gibt Chow et. al in [57]. Die Feuchtigkeits- und Wasseraufnahme bewirkt eine Quellung der Fasern, die gleichzeitig eine starke Quellbeanspruchung der Matrix verursachen kann. Dies löst Mikro-Rissbildungen an der Faser-Matrix-Grenzfläche aus, was wiederum die Wasseraufnahme begünstigt. Dadurch kommt es zu Schädigungen der Faser-Matrix-Grenzschicht, die eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften des Verbunds herbeiführt. Je höher der Anteil an Naturfasern im Verbund, desto stärker wird dieser Effekt.

Joseph et. al [62] erklären die Enthftung der Faser-Matrix-Grenzfläche durch bei Osmose entstehenden Druckablagen an der Faseroberfläche, die durch die Lösung von wasserlöslichen Substanzen an der Faseroberfläche wie Pektinen, Ligninen oder Hemicellulosen entstehen könnten. Die Wassermoleküle beeinflussen die Fasern, die Matrix und die Grenzfläche gleichzeitig und stören die mechanische Integrität des Verbunds. Die Degradation des Verbunds ist nicht nur auf die Degradation der einzelnen Komponenten zurück zu führen, sondern auch auf den Verlust ihrer Interaktionen (Verschlechterung der Faser-Matrix-Grenzfläche).

Die beschränkte Adhäsion in der Faser-Matrix-Grenzschicht aufgrund ihrer unterschiedlichen Chemiestruktur (Grenzfläche zwischen einer Hydrophil- und einer Hydrophobgruppe) sowie die geringe Resistenz gegenüber Feuchtigkeit stellt ein wesent-

liches Problem der Anwendung aller Cellulosefasern dar. In einer Vielzahl von Untersuchungen [8-11, 16, 20, 22] wurde schon versucht, diese beschränkte Adhäsion in der Faser-Matrix-Grenzschicht sowie die geringe Feuchteresistenz der Fasern, die neben dem hohen Celluloseanteil aller Naturfasern auch durch die kapillare Struktur dieser Fasern verursacht wird, mittels verschiedener Haftvermittler bzw. Oberflächenmodifikationen zu verbessern. Durch den Einsatz von Haftvermittlern wie Silanen, PP-MAH, Siliconharzen, etc. wird sowohl eine Verbesserung der Faser-Matrix-Haftung mit der daraus resultierenden Erhöhung der mechanischen Kennwerte im Verbund, als auch eine Reduzierung der Wasseraufnahme des Verbunds festgestellt. Diese Zusatzbehandlungen verursachen allerdings eine deutliche Erhöhung der Kosten und werden deshalb in technischen Bereichen nicht oft umgesetzt.

### **2.1.3.3 Thermische Eigenschaften**

Zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen kommen in der Regel Polymere zum Einsatz, die bei hohen Temperaturen aushärten. Daher spielen die thermischen Eigenschaften von Naturfasern eine entscheidende Rolle bei ihrem Einsatz als Verstärkung in Verbundwerkstoffen, da bei den Verarbeitungstemperaturen von vielen Polymeren eine thermische Degradation der Fasern auftreten kann.

In der Literatur werden unterschiedliche Angaben hinsichtlich der Degradationstemperatur von Naturfasern angegeben. Während Fölster [63] eine Temperaturbeständigkeit bis zu 230 °C unabhängig von der Fasersorte angibt, wird in [64, 65, 36] von einer thermischen Stabilität von bis 280 °C berichtet. Thermogravimetrische Analysen ausgewählter Naturfasern [41] zeigen, dass der thermooxidative Abbau für alle Pflanzenfasern einen zweistufigen Verlauf aufweisen. Ab ca. 230 °C beginnt der Abbau des Lignins, während die thermisch stabilere Cellulose eine Zersetzungstemperatur von 350°C aufweist.

Die geringe Temperaturbelastbarkeit der Naturfaser führt zu Einschränkungen bezüglich der Verarbeitungsparameter. Dies wirkt sich insbesondere auf die Auswahl des Matrixpolymers aus und hat auch Einfluss auf die nutzbaren Verarbeitungsverfahren. So können vor allem hochtemperaturbeständige Polymere aufgrund der bei der Verarbeitung notwendigen hohen Temperaturen, bei denen sich die Naturfasern bereits zu zersetzen beginnen, nicht genutzt werden. Deshalb und aus wirtschaftli-

chen Gründen werden meistens Polypropylen (PP), Polyethylen (PE) oder Phenolharz (PF) eingesetzt.

Zur thermischen Charakterisierung von Naturfasern werden hauptsächlich Thermogravimetrie (TGA), Dynamische Differenz-Kalorimetrie (DSC), Differenzthermoanalyse (DTA) sowie Dynamisch-mechanische Analyse (DMA) eingesetzt.

## 2.2 Faseraufschlussprozesse

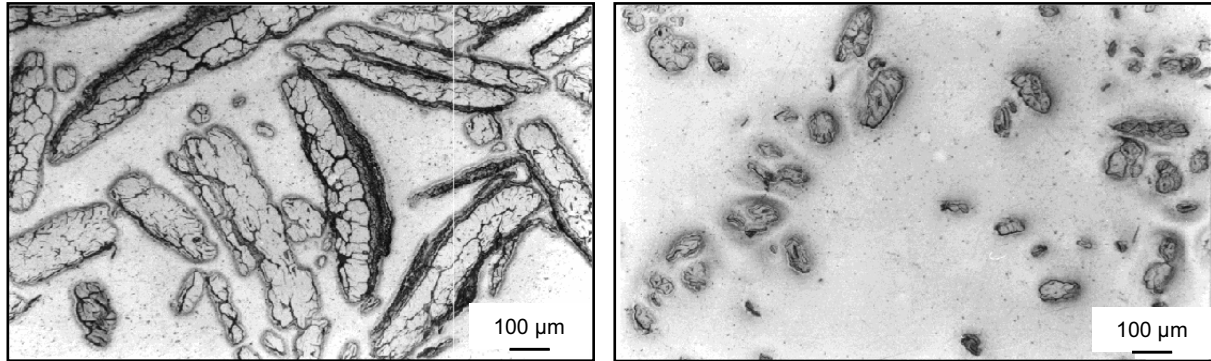
Um die Elementar- oder technische Faser (Bündel mehrerer Elementarfasern) zu erhalten, kommen verschiedene Aufschlussverfahren zum Einsatz. Traditionell wurden die Faserpflanzen dem so genannten Röstprozess zugeführt [43, 44]. Bei der Röste handelt es sich um ein natürliches Stängelaufschlussverfahren der Pflanzenfasern. In der Regel wird die Feld-, auch Tauröste genannt, eingesetzt, bei der die aufzuschließenden Fasern unter normalen Bedingungen zwei Wochen (unter ungünstigen Bedingungen bis zu sechs Wochen) auf dem Feld liegen. Dieses natürliche Röstverfahren führt zu einem guten Stängelaufschluss. Zu geringe Röstzeiten führen jedoch zu geringen Faserfeinheitsgraden und zu hohem Pektin- und Hemicellulosegehalt, zu lange Röstzeiten zu einem Abbau der Celluloseketten. Regen oder zu lange Röstzeiten begünstigen die Verrottung der Fasern. Andere Verfahren wie Winter-, Wasser-, Schlamm- oder Warmwasserröste werden seltener eingesetzt.

Nach der Röste werden die geschwächten Stängel mechanisch gebrochen und von den holzigen Bestandteilen der Pflanze, den Schäben, befreit. Anhaftende Holzteile werden anschließend aus den Fasern gekämmt. Die als Werg bezeichneten Kurzfasern, die im technischen Bereich genutzt werden, sind eigentlich ein Abfallprodukt der Langfaserherstellung.

Zu modernen industriellen Aufschlussverfahren zählen der Enzymatische-, Tensidische-, Chemische- und der Dampfdruckaufschluss [66]. Bei diesen Verfahren können die Faserteile bis zu den Elementarfasern aufgeschlossen werden. Aufgrund der hohen Kosten werden sie allerdings nicht zur Fasergewinnung für die technischen Bereiche eingesetzt.

Der mechanische Aufschluss wurde speziell zur Erzeugung technischer Fasern entwickelt. Die mit diesen Verfahren erzielbaren Faserqualitäten und -längen sind für den textilen Einsatz unbrauchbar. Aufgrund der charakteristischen Färbung der Fa-

sern existiert auch die Bezeichnung Grünaufschluss. Bei der Grünfasergewinnung werden die Stängel nur angeröstet, d.h. nach einer Feldliegezeit von etwa drei Tagen werden die Stängel mechanisch oder chemisch-mechanisch aufgeschlossen.



Mechanische Grobaufschluss

Chemische oder physikalische Aufschluss

Bild 2.8 Vergleich der Fasern nach einem mechanischen und einem chemisch/physikalischen Aufschluss [66]

Gut geröstete Fasern lassen sich ohne starke Einkürzungen zu Vliesen verarbeiten und ermöglichen durch ihre feinen Faserbündel eine homogenere Verteilung der Fasern im Vlies. Bei identischer Maschineneinstellung liegen die erreichbaren Festigkeiten von gut gerösteten, feinen Faserbündeln deutlich über denen aus groben ungerösteten Faserbündeln [66].

### 2.3 Naturfaserverstärkte Kunststoffe in der Automobilindustrie - Historische Entwicklung und aktuelle Anwendungsbeispiele

Naturfasern verfügen aufgrund ihrer geringen Dichte und ihrer spezifischen Eigenschaften über ein sehr gutes Leichtbaupotential, was besonders im Automobilbau von großem Vorteil ist, da eine Reduzierung des Bauteilgewichts zu einer Verminderung des Fahrzeuggewichts führt, woraus eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen während des Fahrzeugbetriebs resultiert. Weiterhin ist sowohl die Gewinnung als auch die Verarbeitung von Naturfasern weniger energieaufwändig als die von Glas- und Kohlenstofffasern. Ferner wird durch den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen der Verbrauch an fossilen Rohstoffen reduziert. Weitere Vorteile sind die verarbeitungstechnischen und akustischen Eigenschaften der Naturfasern.



Nachteile von Naturfasern sind die Ungleichmäßigkeiten der Faserqualität und damit der Eigenschaften. Auch ist die Naturfaser im Gegensatz zur Glasfaser nicht temperaturstabil. Dies beschränkt die Anzahl der Polymersysteme, die mit den Naturfasern kombiniert werden können, ein, da bei hohen Verarbeitungstemperaturen der Matrix eine thermische Degradation der Fasern auftreten würde, unter der auch ihre mechanischen Eigenschaften leiden würden.

Das wichtigste Anwendungsgebiet für Naturfasern in Europa ist die Automobilindustrie. Da der Automobilbau allgemein als Pionier für neue Technologien und die breite Anwendung neuer Werkstoffe gesehen wird, ist es sehr positiv, dass hier in den letzten Jahren die Menge der eingesetzten naturfaserverstärkten Polymere im Automobilbereich auf beachtliche Umfänge gestiegen ist. Die Ergebnisse mehrerer über Jahre durchgeführter Umfragen des Nova-Instituts [67, 68, 23, 28,] zeigen, dass seit 1999 der Einsatz an Naturfasern als Verstärkung für Verbundwerkstoffe, ohne Holz und Baumwolle, für die Automobilproduktion kontinuierlich zugenommen hat (Bild 2.9). In dem Diagramm ist die Dominanz der im Europäischen Raum produzierten Flachsfasern, die als Nebenprodukt der Textilindustrie abfallen, deutlich zu erkennen.

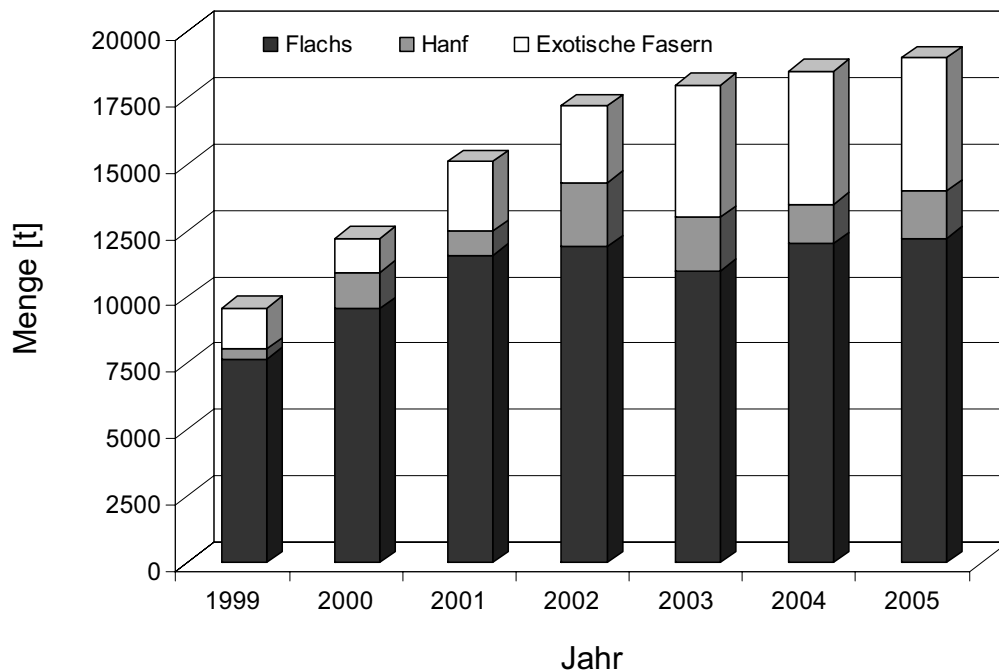


Bild 2.9: Einsatz von Naturfasern (ohne Holz und Baumwolle) in der Deutschen Automobilproduktion zwischen 1999 und 2005 [23]

Nachwachsende Rohstoffe waren bereits in den fünfziger Jahren im Automobilbau bei der Fertigung von Interior Bauteile im Einsatz. Die Fa. Fibrit stellte im Jahr 1952 die ersten Handschuhkästen aus Holzfaserverformstoff her, die erste Instrumententafel folgte im Jahr 1957. Die Fa. Mapotex produzierte anfangs der 60iger die ersten Verkleidungsteile aus Baumwollfasern und Phenolharz [69]. Bastfasern wie Kenaf, Flachs, Sisal, Jute und Hanf kamen erst Mitte der 80iger Jahre im Automobilbau zum Einsatz. Sie werden als Verstärkungsfasern in Thermoplasten, im wesentlichen Polypropylen, oder Duromeren wie Phenolharzen, Polyurethanen und Epoxidharzen für Pressteile eingesetzt [70]. Zahlreiche Veröffentlichungen berichten über Bauteile des automobilen Innenraumes, die aus naturfaserverstärkten Kunststoffen im Serienmaßstab hergestellt werden [71,54]. Typische Bauteile in aktuellen Modellreihen sind Träger für Türverkleidungen, Hutablagen, Instrumententafeln und Kofferraumverkleidungen. Prömper gibt in [69] eine umfangreiche und detaillierte Übersicht über den Einsatz von NF-Werkstoffen im Automobil und die jeweiligen Verarbeitungsverfahren. Trotz der relativ schwachen Autokonjunktur in den letzten Jahren, die im Jahr 2002 besonders deutlich wurde [72], veröffentlichte die BMW Group in diesem Jahr einen Bericht über den Einsatz von natürlichen Fasern und anderen Naturprodukten wie Leder, Kautschuk und pflanzlichen Ölen in ihren Modellen [73]. So enthält beispielsweise die 7er - Baureihe von BMW insgesamt rund 24 Kilogramm nachwachsende Rohstoffe, davon über 13 Kilogramm Naturfasern. Flachs- und Sisalfasern finden in den Türverkleidungen Verwendung, Baumwollfasern kommen in den Schallisierungen zur Anwendung, Wollfasern in Sitzbezügen und Holzfasern werden in den Sitzlehnenverkleidungen verwendet. Ford verwendete im Jahr 2003 in seinen europäischen Modellen 27.000 Tonnen an nachwachsenden Rohstoffen [74]. Die Innenverkleidung des Ford Mondeo bestand aus mit Kenaf- und Flachsfasern verstärktem Polypropylen und die Türeinsätze des Focus wurden mit Flachsfasern verstärkt. Schilling berichtet in [2] über den Einsatz von natürlichen Materialien wie Curauá-, Kenaf-, Sisal- oder Jutefasern und Sperrholz oder Holzmehl in Verbindung mit verschiedenen Polymeren bei Volkswagen AG.

Mercedes-Benz berichtet regelmäßig über den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in seinen Modellen [75, 76, 77]. Im Innenbereich der aktuellen E-Klasse werden ca. 50 Bauteile aus natürlichen Rohstoffen eingesetzt [24] mit einer Masse von

mehr als 30 kg, wovon ca. ein Drittel aus Naturfasern besteht. Baumwollfasern befinden sich in Dämmmatten, Hutablage und C-Säulenverkleidung. Die Innenseite der Türen besteht aus einem Flachs-Sisal-Verbundwerkstoff mit einer Matrix aus Epoxidharz. Kokosfasern kommen im Sitzbereich zum Einsatz und Jutefasern werden in den in Brasilien hergestellten Nutzfahrzeugen für Innenverkleidungsteile der Fahrerkabine verarbeitet. Bei der A-Klasse, CLK und CL werden auch naturfaserverstärkte Kunststoffe serienmäßig verwendet. Bei der neuen S-Klasse (Markteinführung Herbst 2005) [77] kommen Kokos-, Holz-, Flachs- und Baumwollfasern in Kombination mit unterschiedlichen Polymerwerkstoffen zum Serieneinsatz. Insgesamt werden 27 Bauteile (Bild 2.10 links) mit einem Gesamtgewicht von knapp 43 Kilogramm unter der Verwendung von Naturmaterialien hergestellt.

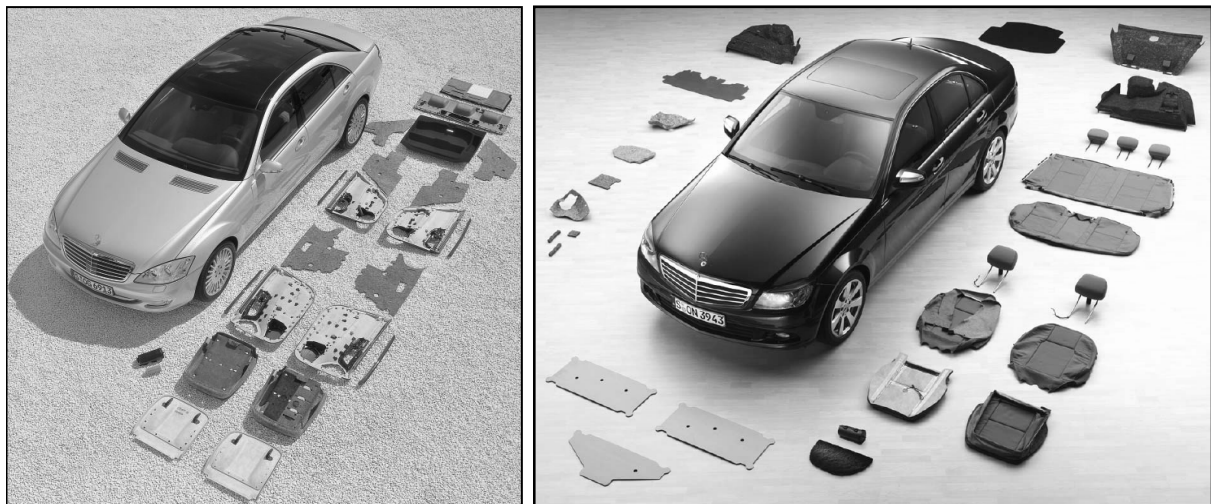


Bild 2.10: Bauteile aus nachwachsenden Rohstoffen in Fahrzeugmodellen der S-Klasse (Markteinführung 2005) [77] (links) und der C-Klasse (Markteinführung 2007) [76] (rechts) von Mercedes-Benz

Holzfasern werden als Türbelag und in der Verkleidung der Lehne des Fahrersitzes eingesetzt. Wolle und Baumwolle finden als Abdämpfungen, Verkleidung des Rad einbaus und als Bezüge der Sitze Verwendung. Flachsfasern sind in der Verkleidung der Hutablage und in der Abdeckung des Kofferraums zu finden. Kokosfaser und Naturlatex werden in den Auflagen der Vordersitzlehne verwendet. Sogar Olivenkerne werden als Aktivkohlefilter eingesetzt, da das offenporige Material die Kohlenwasserstoff-Emissionen adsorbiert und sich von selbst regeneriert. Damit ergibt sich eine Erhöhung des Gesamtgewichts der aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellten

Bauteile um rund 73 Prozent zum Vormodel. Bei der neuen C-Klasse (2007) werden neben 32 Bauteilen aus recycelten Kunststoffen 27 Bauteile mit einem gesamten Gewicht von 17 kg je Fahrzeug aus nachwachsenden Rohstoffen angefertigt.

Produkte auf Basis nachwachsender Rohstoffe müssen ihre Vorteile gegenüber herkömmlichen Materialien hinsichtlich Technik, Ökologie, Preis und Verfügbarkeit unter Beweis stellen, um sich Einsatzgebiete zu erschließen. Insgesamt gibt es eine Reihe von Studien und Literaturangaben, die beweisen, dass naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe im Automobilbau in mehrfacher Hinsicht (in der Produktions-, Nutzungs- und Entsorgungsphase) etliche Vorteile aufweisen [78, 79, 80].

## 2.4 Einsatz von naturfaserverstärkten Kunststoffen außerhalb der Automobilindustrie

Die Anwendungsmöglichkeiten von Naturfasern als Verstärkung in Verbundwerkstoffen sind aber nicht nur auf den bereits etablierten Einsatz im Automobilbereich begrenzt. In verschiedenen Forschungsarbeiten wurde bereits über weitere Anwendungsfelder berichtet [81, 82, 83]. Im Bereich des Messebaus hat die Fa. Invent in Zusammenarbeit mit der Fa. Maedebach, Messebau, Grafik und Design z.B. ein Messebausysteme aus naturfaserverstärkten Werkstoffen entwickelt [84] und einen ganzen Messestand damit angefertigt (Bild 2.11).



Bild 2.11: Übersicht der Messebauelemente [84]

Dank neuer technologischer Entwicklungen ist es weiterhin möglich, Naturfasern in bisher nicht realisierbaren Anwendungsfeldern einzusetzen, wie am Beispiel des Modellflugzeugbaus [85], Rotorblätter für Windkraftanlagen [86] oder eines Kanadierboots [87], deutlich wird. Dieses Boot gilt als erstes Produkt aus Naturfasern für direkten Wasserkontakt (Bild 2.12).



Bild 2.12: Kanadier-Boot aus naturfaserverstärkten Kunststoffe [87]

Neue Märkte wie die Möbel- und Designindustrie (z.B. Designerbürostühle, Sitze, Schubkästen, Regale oder Rahmenteile [88]) und Gebrauchsgüter (z.B. Koffer und Brillenetuis) können ebenfalls von großer Bedeutung sein.

Darüber hinaus werden Naturfaserverbundwerkstoffe immer öfter in den Bereichen LKW-, Bus-, und Bahnbau eingesetzt [89, 90, 91].

## 2.5 Verarbeitung von naturfaserverstärkten Kunststoffen

Für die Verarbeitung von naturfaserverstärkten Kunststoffen können herkömmliche, etablierte Verfahren übernommen werden. Aufgrund der Eigenschaften der Naturfasern werden sie hauptsächlich im Formpressverfahren verarbeitet. Dennoch können BMC (Bulk Molding Compound) und SMC (Sheet Molding Compound) sowie Spritzguss, Extrusion, Pultrusion oder die Wickeltechnik zur Verarbeitung von naturfaserverstärkten Kunststoffen eingesetzt werden.

Nach Karus et al. [23] werden die zurzeit eingesetzten naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffe vor allem im Pressverfahren (98 %) hergestellt (Bild 2.13).

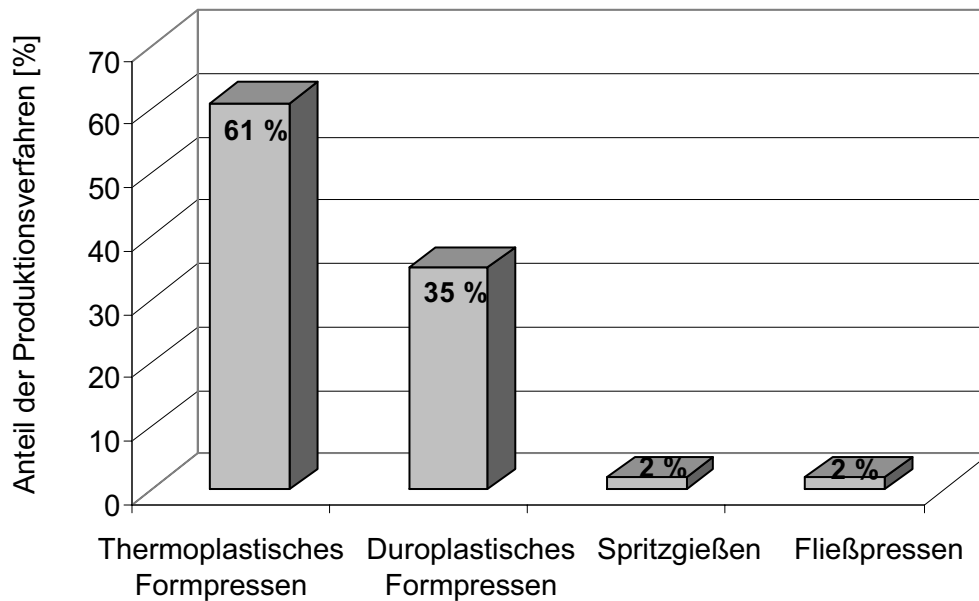


Bild 2.13: Anteile verschiedener Produktionsverfahren für Naturfasern (ohne Holz und Baumwolle) in der Deutschen Automobilproduktion im Jahr 2005 [23]

Dabei wird das Fließpressen bei nur 2 % der eingesetzten Bauteile genutzt, während 96 % im Formpressverfahren hergestellt werden. Im Gegensatz zum Fließpressen ist beim Formpressen das Fließen von Fasern und Kunststoff im Werkzeug durch die Struktur des Halbzeugs blockiert. Für das thermoplastischen Formpressen muss die Matrix vor der Umformung auf die polymerspezifische Verarbeitungstemperatur erwärmt werden. Dies kann z.B. mittels Kontaktheizung, in einem Konvektionsofen oder einem Infrarotstrahlerfeld erfolgen. Anschließend wird das erwärmte Halbzeug zur Presse transportiert und in beheizten Werkzeugen unter Druck verpresst. Beim Umformen von duroplastischen Polymersystemen wird hingegen das nicht temperierte Halbzeug in das auf Verarbeitungstemperatur beheizte Werkzeug eingelegt, unter Druck in Form gepresst und härtet durch chemische Prozesse aus. Nachdem die Aushärtungsreaktion abgeschlossen ist, erfolgt die Entnahme des Bauteiles aus dem heißen Werkzeug. Die Abkühlung des Bauteiles erfolgt bei Raumtemperatur außerhalb des Werkzeuges. Anschließend werden die Ränder der entstandenen Formpressteile besäumt.

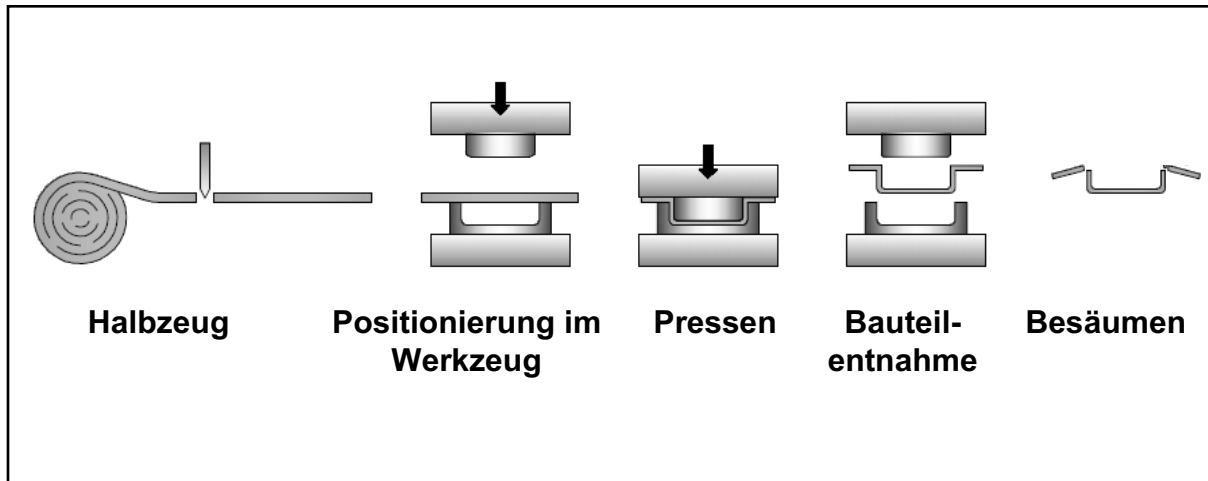


Bild 2.14: Prozessablauf des Umformpressens

Durch das Formpressen, ein etabliertes Verfahren für die Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen, können großflächige Bauteile hergestellt werden. Dafür können die in der Industrie vorhandenen Anlagen für das Umformen naturfaserverstärkte Kunststoffe ohne teure Umrüstungen eingesetzt werden.





### 3 Fasercharakterisierung

#### 3.1 Einleitung

Die mechanischen Eigenschaften von Naturfasern sind sehr inhomogen, da diese durch viele Faktoren wie Herkunft der Pflanzen, Witterung oder Aufschlussprozess beeinflusst und bestimmt werden können. Deshalb gibt es bei Naturfasern kein Datenblatt wie bei Glas- oder Kohlenstofffasern mit exakten Angaben der mechanischen Kennwerte der Fasern. Um Naturfasern erfolgreich als Verstärkung in Verbundwerkstoffen einsetzen zu können, ist Fachwissen über ihre Eigenschaften unabdingbar, besonders bezüglich der mechanischen Charakteristik.

Die Bestimmung der Zugfestigkeit von spröden Fasern wie Naturfasern stellt sich aufgrund der großen Streuung als sehr schwierig dar. Ursache dieser Streuung bei Naturfasern sind hauptsächlich Fehler oder Schwachstellen in der Faserstruktur, aber auch die Testart selbst und die Länge der Testfasern können sich entscheidend darauf auswirken. Sogar bei Fasern einer Pflanze können Schwankungen in den mechanischen Eigenschaften festgestellt werden. Es muss außerdem berücksichtigt werden, dass der Faserdurchmesser eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung der Faserfestigkeit spielt, da die Wahrscheinlichkeit, eine Schwachstelle zu finden, vom Faservolumen direkt abhängt.

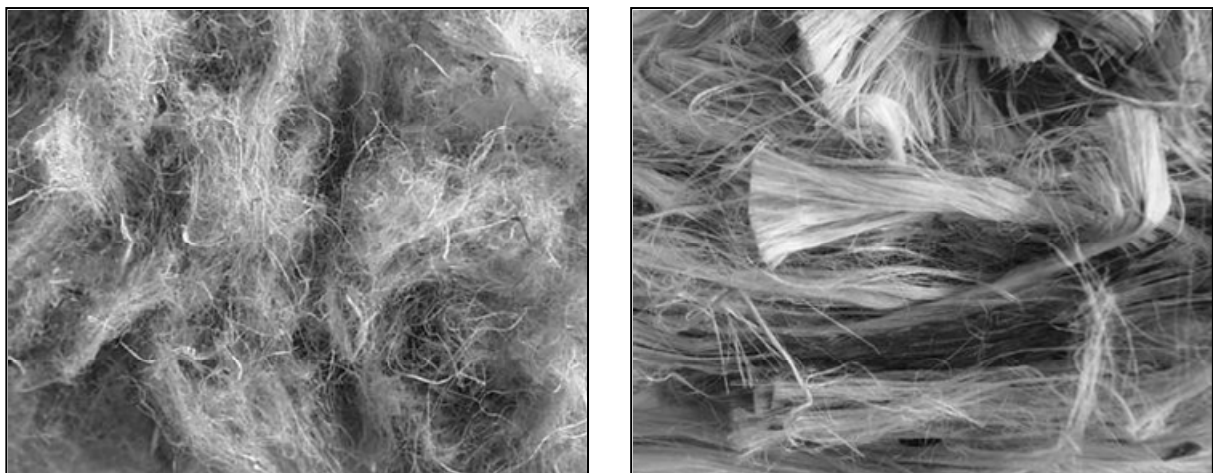


Bild 3.1: Makroaufnahmen der eingesetzten technischen Hanf- und Kenaffasern

Bei Kenaf- und Hanffasern (Bild 3.1), die ohne weitere Behandlung zur Vliesherstellung verarbeitet werden, wird der Festigkeitstest mit einzelnen technischen Fasern

durchgeführt. Aufgrund der großen Streuung bei den Nenndaten von Naturfasern ist eine systematische statistische Vorgehensweise notwendig, um die ermittelten Werte zu analysieren. Für die statistische Auswertung von Messreihen spröder Einzelfasern wird üblicherweise das Weibull Model eingesetzt (s. Kapitel 3.3).

## 3.2 Faserzugfestigkeit

### 3.2.1 Verfahren zur Messung der Zugfestigkeit

Die Bestimmung der Zugfestigkeit von Einzelfasern ist eine weit verbreitete Methode, um die mechanischen Eigenschaften von Fasern zu bestimmen. Manche synthetische Fasern, die eine relativ lange Dehnung vor dem Bruch aufweisen, können direkt in der Prüfmaschine festgeklemmt werden. Da spröde Fasern beim Festklemmen zerbrechen würden, sind herkömmliche Zugprüfverfahren ungeeignet. Daher muss eine andere Prüfmethode für die Zugfestigkeitsbestimmung von Naturfasern angewandt werden. Die Festigkeit solcher Fasern wird nach der Norm ASTM D 3379-75 [92] bestimmt. Dafür werden die technischen Fasern ausgesucht, geschnitten und auf einem Papierrahmen über die gewählte Testlänge mit einem Epoxy-Kleberstoff fixiert (Bild 3.2).

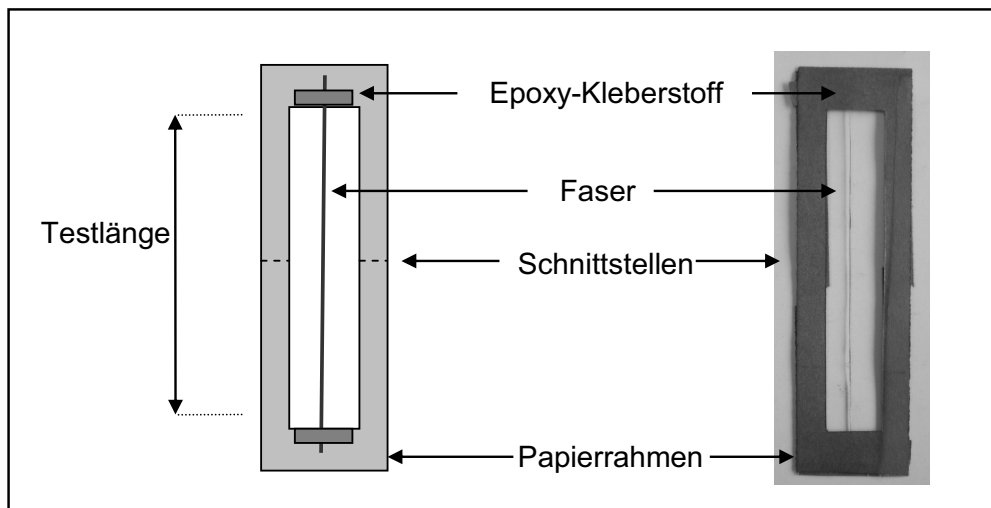


Bild 3.2: Schematische Darstellung und Bildaufnahme einer für den Zugfestigkeitstest präparierten technischen Faser

Die Papierrahmen werden vor der Durchführung des Zugtests geschnitten. Die Rahmen müssen zuerst in die Backen der Zugprüfmaschine eingespannt werden, um Faserbruch vor dem Versuch weitestgehend zu vermeiden.

Da die Fehler oder Schwachstellen der Faserstruktur nicht homogen über die Faserlänge verteilt sind, hängt die gemessene Festigkeit stark von der Einspannlänge der Testfaser ab. Je länger die Fasern sind, desto mehr Schwachstellen existieren und umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine starke Schädigung der Faserstruktur auftritt. Somit sind die Ergebnisse der Zugprüfung in starkem Maße von der Einspannlänge abhängig. Rein rechnerisch sinken die Festigkeitswerte des Zugversuchs mit der zunehmenden Anzahl der beteiligten Elementarfasern, da die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten festigkeitsmindernder Risse zurückgeht. Allerdings ist die Faserbündelprüfung (technische Faser) einfacher als die Elementarfasierzugprüfung. Deshalb wird standardmäßig der Zugfestigkeitstest mit verschiedenen Einspannlängen durchgeführt (innerhalb dieser Arbeit werden die Fasern bei drei verschiedenen Einspannlängen von 20, 40 und 60 mm getestet). Anschließend wird eine statistische Bestimmung der Zugfestigkeit über die komplette Einspannlänge durchgeführt. Diese statistische Verteilung ist sehr hilfreich, um die Festigkeit der Fasern bei niedrigen Messlängen zu bestimmen (experimentell kaum möglich), da die Festigkeit der Fasern bei niedrigen Spannlängen rein rechnerisch extrapoliert werden kann. Diese Werte sind z. B. für die Berechnung von Verbundwerkstoffen notwendig.

Für die Untersuchungen von kommerziellen synthetischen Fasern, die homogene Durchmesser und relativ gleichmäßige mechanische Eigenschaften aufweisen, werden üblicherweise nicht weniger als 30 Fasern getestet. Aufgrund der Ungleichmäßigkeiten der Naturfasern wurden innerhalb dieser Arbeit je Fasersorte und Versuch ca. 50 technische Fasern getestet. Eine Ausnahme bildeten die Hanffasern, da durch ihre meist geringe Länge nur ca. 30 technische Fasern mit einer Einspannlänge von 60 mm untersucht werden konnten.

Für die Berechnung der Faserzugspannung ( $\sigma$ ) werden nicht nur die im Test gemessenen Bruchkräfte ( $F$ ), sondern auch die Durchmesser ( $Q$ ) der geprüften technischen Fasern benötigt.

$$\sigma = \frac{F}{Q} \quad (3.1)$$

Dafür wird jede Testfaser, nachdem sie im Papierrahmen fixiert ist, unter einem Lichtmikroskop fotografiert. Um die Fehler so weit wie möglich zu minimieren, wer-

den die Fasern an mindestens drei verschiedenen Stellen fotografiert und der mittlere Außendurchmesser jeder einzelner Faser ermittelt und vor der Durchführung des Zugtestes angegeben.

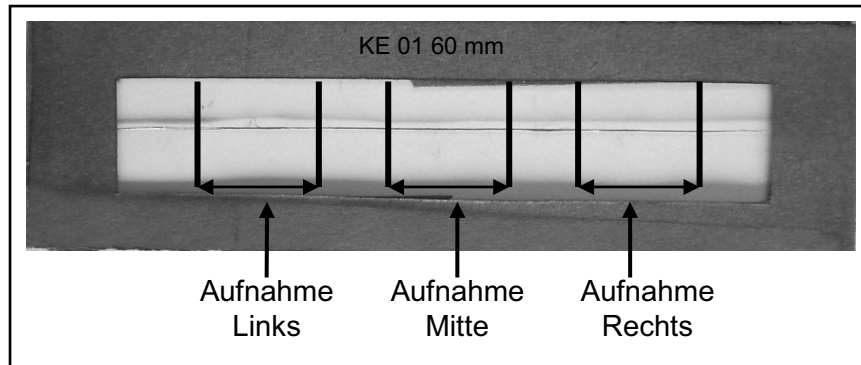


Bild 3.3: Aufnahmestellen einer für den Zugfestigkeitstest präparierten technischen Kenaffaser (Einspannlänge 60 mm)

Die Zugversuche werden anschließend bei einer Raumtemperatur von 23 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 50 % auf einer Instron 4505 Universalprüfmaschine durchgeführt. Die Versuche werden mit einer Kraftmessdose von 2,5 N bei einer Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min durchgeführt.

### 3.2.2 Bestimmung der Faserdurchmesser

Für die Bestimmung der Faserdurchmesser empfiehlt die Norm einen Mittelwert aus mindestens 20 Fasern zu ermitteln. Dies gilt hauptsächlich für kommerzielle Fasern, die relativ niedrige Abweichungen zeigen. Da Naturfasern erhebliche Schwankungen zwischen einzelnen technischen Fasern aufweisen, empfiehlt sich hier den Durchmesser für alle zu prüfenden Testfasern einzeln zu bestimmen.

Aufgrund des ungleichmäßigen Verlaufs der Faserdurchmesser ist es sehr schwierig, die realen Durchmesser von technischen Faserbündeln zu ermitteln. Bild 3.4 zeigt eine geprüfte technische Hanffaser, deren linke Hälfte einen gleichmäßigen Verlauf aufweist, während auf der rechten Aufnahme zu sehen ist, dass zwei Faserbündel zunächst auseinander laufen. Direkt danach waren die zwei Faserbündel wieder als ein einzelnes Bündel zu erkennen.

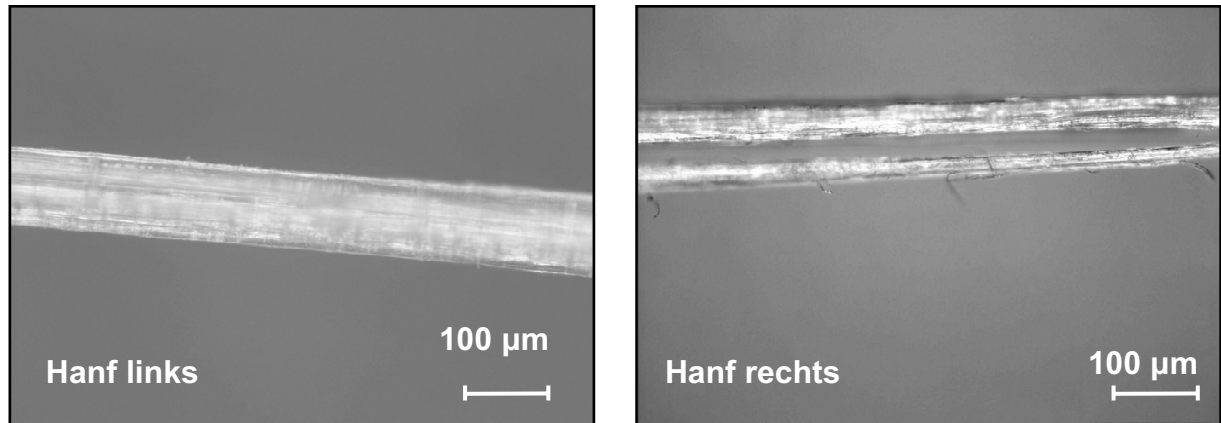


Bild 3.4. Lichtmikroskopische Aufnahme einer Hanffaser

Bild 3.5 zeigt zwei Abschnitte einer Kenaffaser. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Faserquerschnitt nicht homogen über die gesamte Länge ist und der Querschnitt der rechten Hälfte doppelt so groß ist wie der der linken Hälfte.

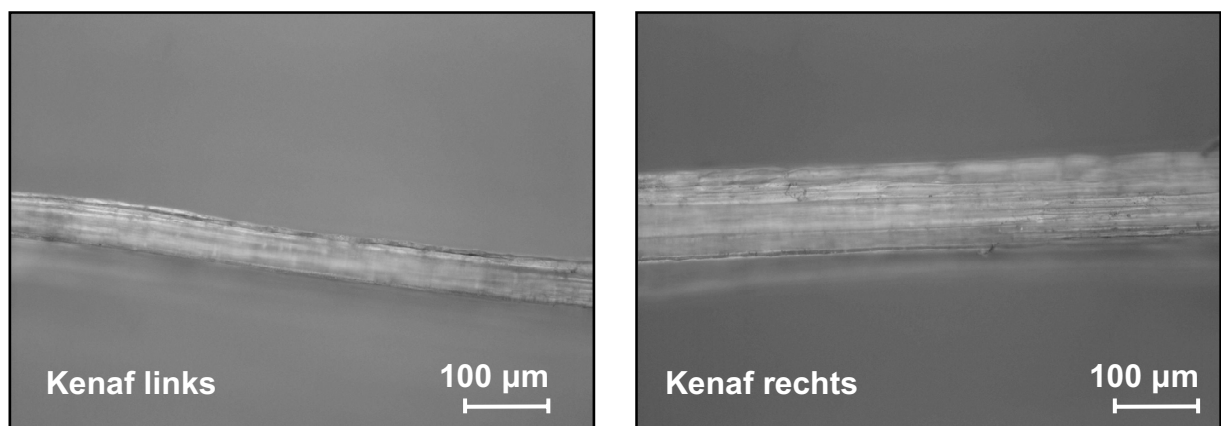


Bild 3.5. Lichtmikroskopische Aufnahme einer Kenaffaser

Um die Unregelmäßigkeiten des Querschnitts einer Faser entlang der Testlänge detaillierter zu analysieren, wurden Kenaf- und Hanffasern ca. alle 10 mm geschnitten, in Harz eingebettet, geschliffen und digital fotografiert. Unter dem Lichtmikroskop konnte der Verlauf des Faserquerschnitts einer einzelnen technischen Faser analysiert werden (Bild 3.6 und Bild 3.7).

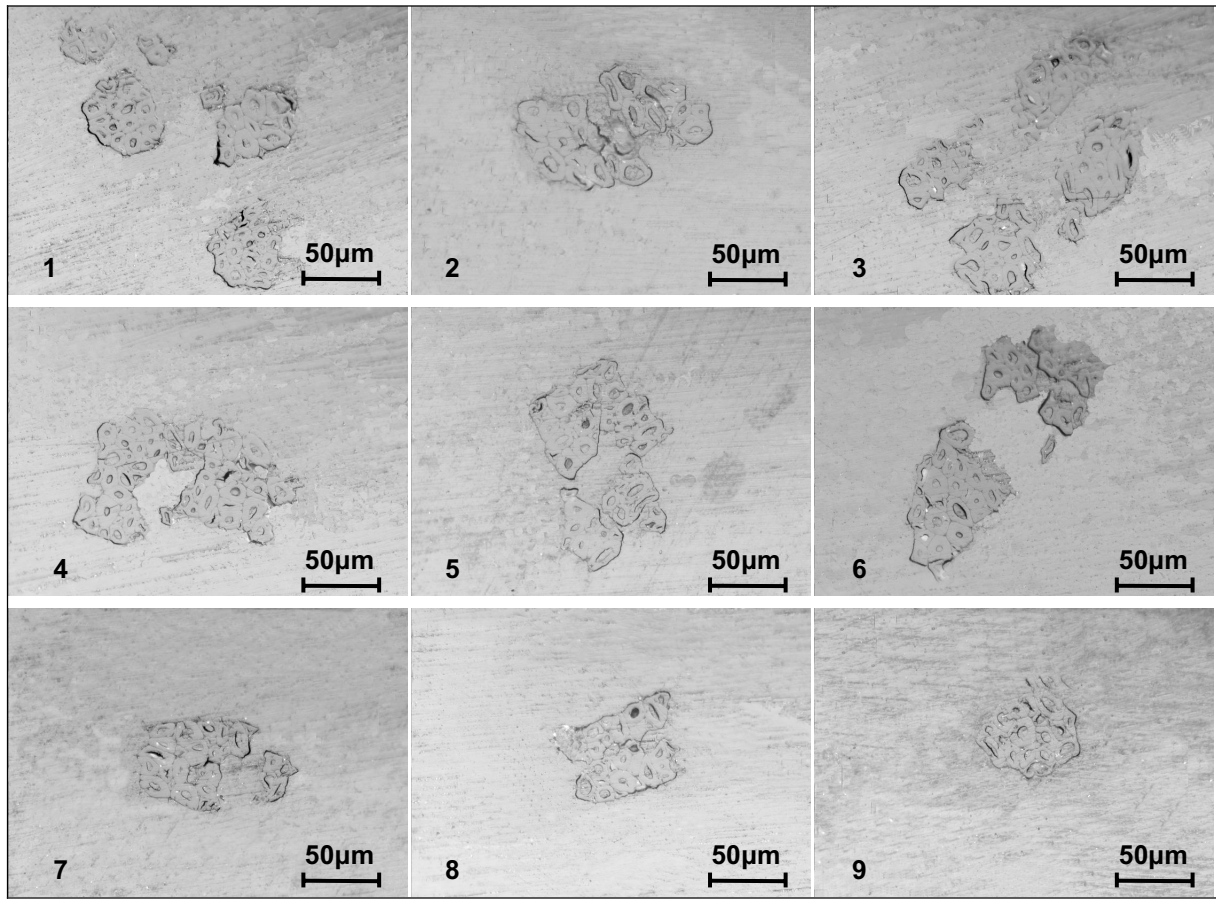


Bild 3.6: Verlauf des Faserquerschnitts einer Kenaffaser entlang der Testlänge

Auf Bild 3.6 ist deutlich erkennbar, wie die Faserbündel, aus denen die technische Kenaffaser besteht, auseinander gehen und kurz danach wieder miteinander verbunden sind. Auch die Anzahl der Bündel ändert sich innerhalb der Faserlänge. Während die ersten Aufnahmen ca. 4 Faserbündel zeigen, ist am Ende der Faser (Aufnahmen 7 bis 9) nur ein einziges Faserbündel zu erkennen.

Bei der technischen Hanffaser (Bild 3.7) kann ein im Vergleich zu Kenaf gleichmäßiger Querschnitt entlang der Testlänge festgestellt werden. Jedoch sind auch hier Unregelmäßigkeiten zu erkennen. Während bei der ersten Aufnahme noch drei Bündel zu sehen sind, ist direkt danach (Aufnahme 2) nur ein einziges Bündel zu beobachten, das allerdings einen sehr viel größeren Durchmesser als die Bündel im dritten Abschnitt aufweist. Danach verläuft der Querschnitt gleichmäßiger bis in den 9. Faserabschnitt, in dem wieder mehrere kleine Bündel zu erkennen sind.

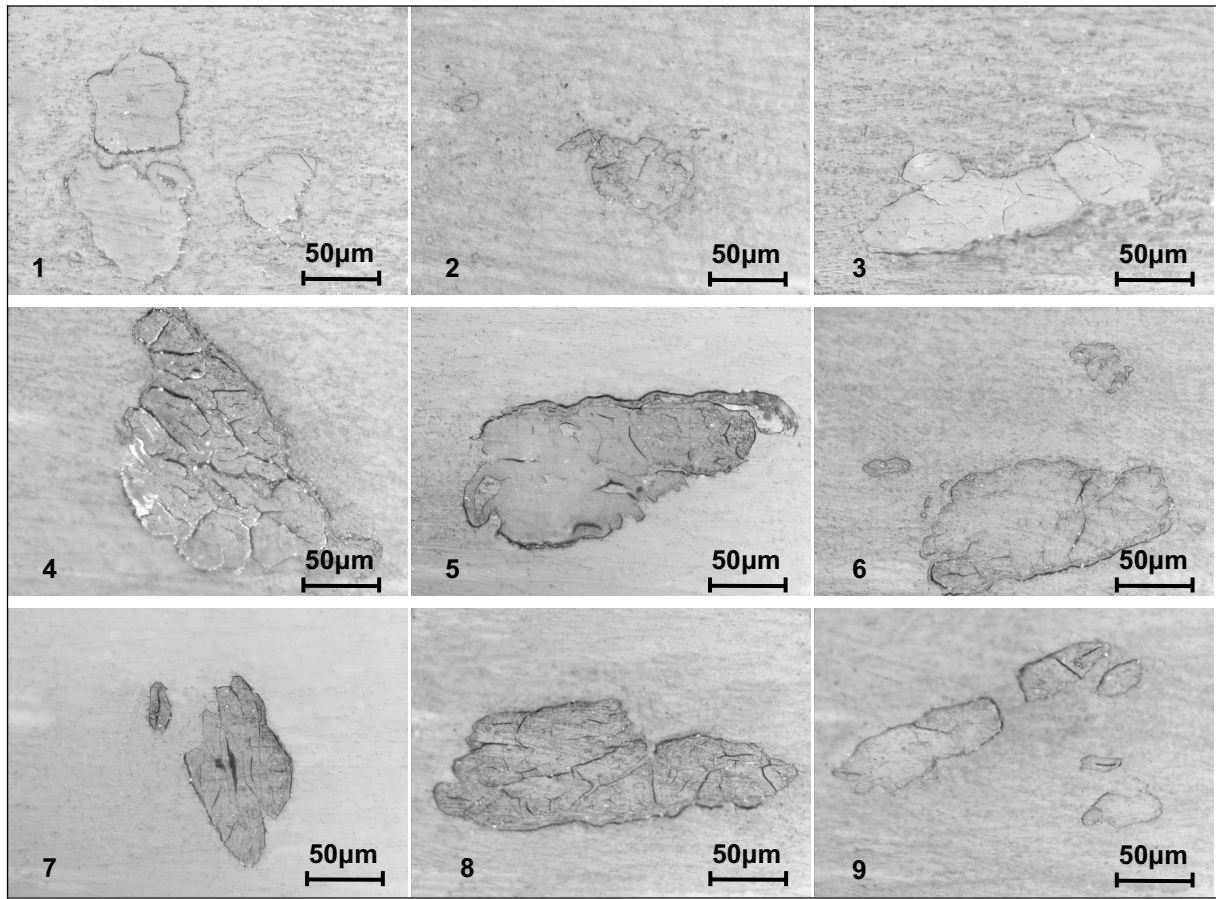


Bild 3.7: Verlauf des Faserquerschnitts einer Hanffaser entlang der Testlänge

Für die Außendurchmesserbestimmung wurde angenommen, dass die Fasern einen runden Durchmesser besitzen, obwohl die technischen Fasern aufgrund der unterschiedlichen Bündelzahl in ihrer Struktur und Elementarfaserzahl im Faserbündel einen sehr ungleichmäßigen Querschnitt aufweisen.

Um den Durchmesser der Fasern zu bestimmen, wurde eine Bildanalysesoftware (IMAGE C von IMTRONIC GmbH) verwendet. Hierzu werden parallel zur Faserlänge zwei Linien markiert und der Abstand zwischen den beiden Linien digital ausgemessen. Bild 3.8 zeigt exemplarisch das Analyseergebnis einer Faserdurchmesserbestimmung.

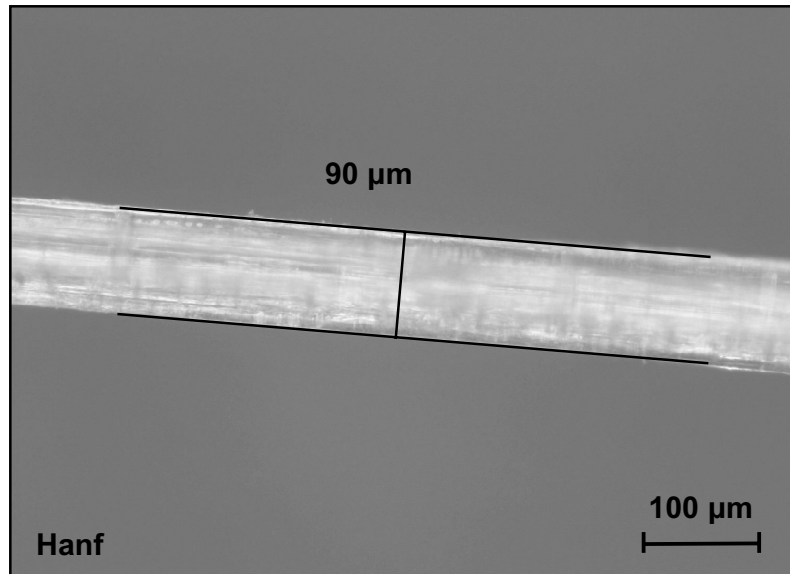


Bild 3.8. Auswertung des Faserdurchmessers einer Testfaser mit Hilfe der Analysesoftware

Die Ergebnisse der statistischen Analyse der Messdaten sind in Tabelle 3.1 zusammen gefasst. Angegeben sind der arithmetische Mittelwert, die Standardabweichung sowie der Maximal- und Minimalwert der jeweiligen Messungen.

Tabelle 3.1: Ergebnisse der statistischen Analyse der Faserdurchmesser

Faser / Einspannlänge [mm]	Außendurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert
Hanf / 20	34	252	$102 \pm 39$
Hanf / 40	30	211	$96 \pm 42$
Hanf / 60	32	240	$96 \pm 42$
Kenaf / 20	35	127	$66 \pm 17$
Kenaf / 40	25	152	$61 \pm 18$
Kenaf / 60	29	127	$56 \pm 16$

Im Anhang 8.1 sind die einzeln gemessenen Außendurchmesser an allen drei Positionen (links, mittig und rechts) für alle geprüften Testfasersorten und Einspannlängen, sowie deren arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen aufgeführt.



Bild 3.9 und Bild 3.10 zeigen das Histogramm aller untersuchten Hanf- und Kenaffasern mit 40 mm Einspannlänge. Die Verteilung erstreckt sich über Durchmesser ab ca. 30 bis zu über 200  $\mu\text{m}$  bei Hanffasern und bis zu 150  $\mu\text{m}$  bei Kenaffasern.

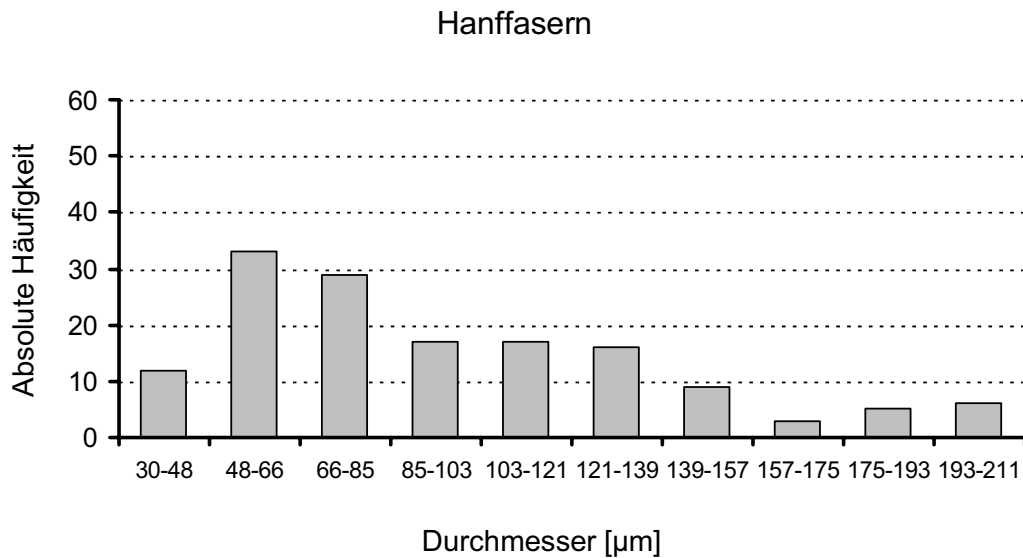


Bild 3.9: Statistische Verteilung der Faseräußendurchmesser von Hanffasern mit einer Einspannlänge von 40 mm

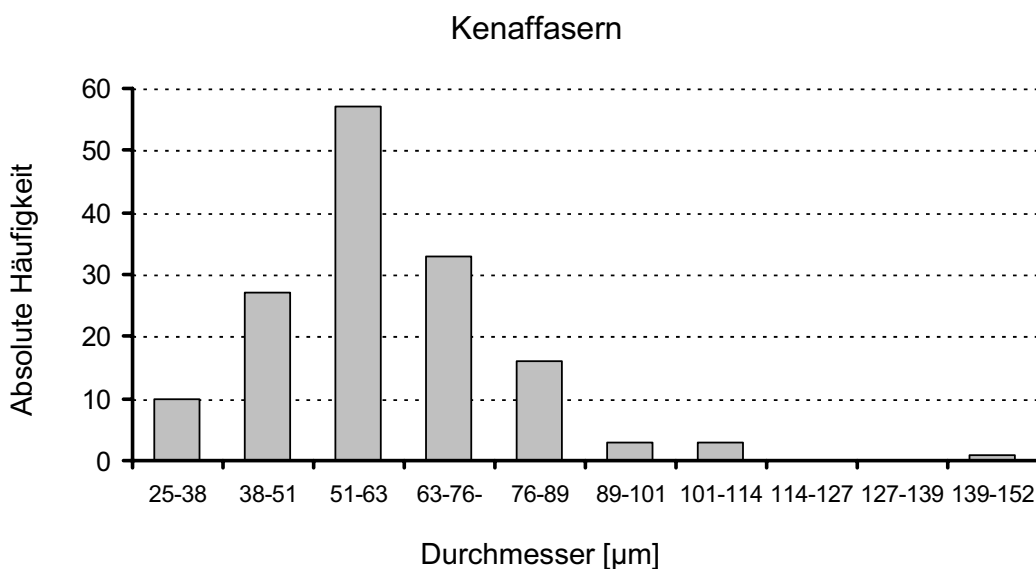


Bild 3.10: Statistische Verteilung der Faseräußendurchmesser von Kenaffasern mit einer Einspannlänge von 40 mm

Die Auswertergebnisse der Messungen zeigen deutlich, dass die untersuchten Kenaffasern einen kleineren mittleren Außendurchmesser als die technischen Hanffa-

ern besitzen. Während sich bei Hanffasern ein Mittelwert von ca. 100  $\mu\text{m}$  ergibt, beträgt er bei Kenaffasern nur 60  $\mu\text{m}$ . Auch die Streuung fällt bei Kenaffasern niedriger als bei Hanffasern aus.

Diese Streuung ist typisch für Naturfasern. Autoren wie Biagiotti et. al. [93] haben für technische Flachsfasern Durchmesser zwischen 36 and 450  $\mu\text{m}$ , Cheney et. al. [94] sogar zwischen 40 und 620  $\mu\text{m}$  festgestellt. Um die Ursache dieser großen Streuung zu untersuchen, wurden mehrere technische Fasern nach dem Zugtest in Harz eingebettet, poliert und lichtmikroskopische Aufnahmen angefertigt. Die morphologische Untersuchung der Bruchstelle der getesteten Fasern zeigt, dass der Faserquerschnitt beim Bruch nicht homogen ist und die Faserbündel sehr große Schwankungen in ihrer Form der Querschnittfläche aufweisen. Bild 3.11 zeigt links die mikroskopische Aufnahme eines relativ gleichmäßigen Kenaffaserbündels. Rechts wird ein anderes Beispiel dargestellt.

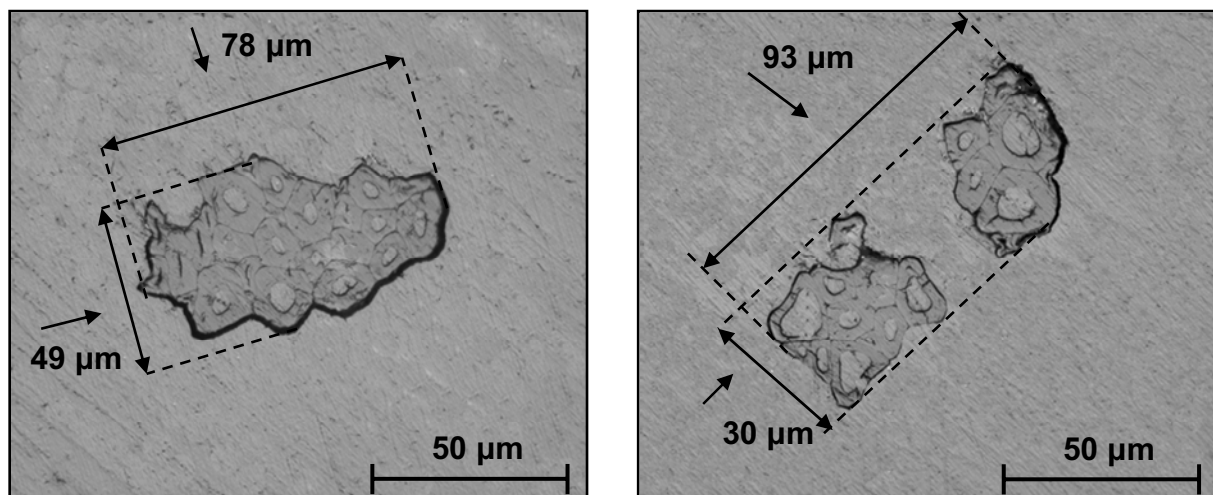


Bild 3.11: Beispiele zweier technischer Kenaffasern mit ungleichmäßigem Faserquerschnitt

Hier ist deutlich zu erkennen, dass sogar diese gleichmäßigen Bündel große Abweichungen bezüglich des Faserquerschnitts aufweisen können. Aufgrund des abgeflachten Querschnitts wurde in diesem Beispiel eine maximale Breite von 78  $\mu\text{m}$  gemessen, quer hierzu beträgt die Breite der Faser lediglich 49  $\mu\text{m}$ . Rechts wird ein anderes Beispiel dargestellt. Zu erkennen sind zwei Faserbündel in einer technischen Faser, die an dieser Stelle geteilt sind. Je nach Messwinkel erscheinen ein oder zwei Bündel, deren Durchmesser entsprechend gemessen.

Ungleichmäßigkeiten treten auch durch die unterschiedliche Anzahl an Elementarfasern in einem Faserbündel auf. Bild 3.12 zeigt links ein Kenaffaserbündel mit ca. 7 Elementarfasern während rechts mehr als 45 Elementarfasern in dem großen Bündel und ca. 6 in dem kleinen Bündel zu erkennen sind.

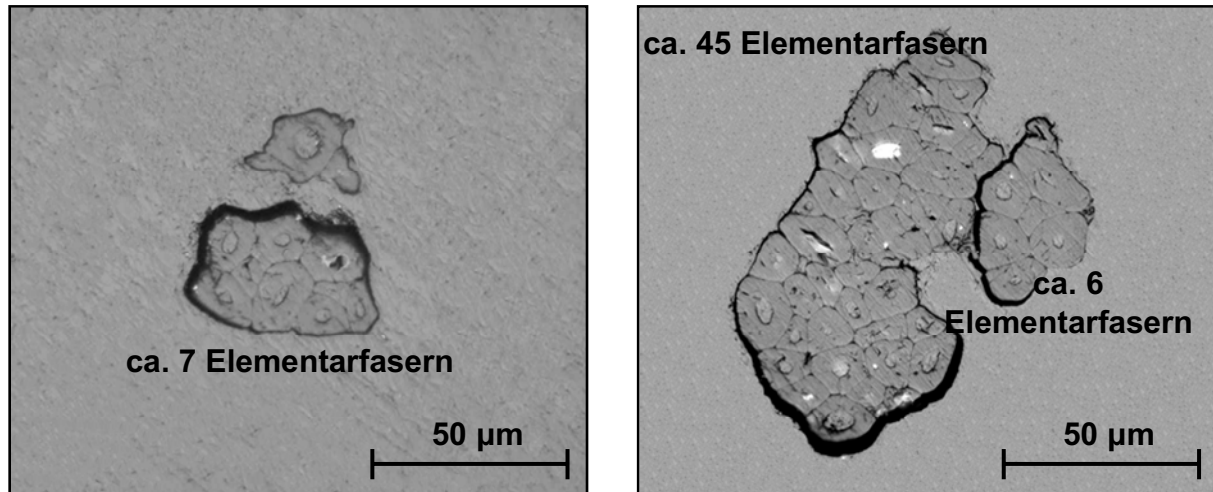


Bild 3.12: Vergleich der unterschiedlichen Einzelfaseranzahl in Faserbündeln

Anhand dieser morphologischen Analyse des Faserquerschnitts kann die gemessene Streuung bei der Bestimmung der Faserdurchmesser erklärt werden.

### 3.2.3 Ergebnisse der Bestimmung der Faserzugfestigkeit

Bild 3.13 und Bild 3.14 geben das typische Spannungs-Dehnungsverhalten einiger getesteter Hanf- und Kenaffasern wieder. Beide Faserarten weisen ein nahezu lineares elastisches Spannungs-Dehnungsverhalten auf. Das Diagramm spiegelt die Ungleichmäßigkeiten wider, die bei der Außendurchmesserbestimmung aufgetreten sind. Die geringste gemessene Zugfestigkeit liegt bei ca. 200 MPa, während die höchsten Messwerte mit ca. 800 MPa viermal so groß sind. Die Kraft-Dehnungsdiagramme beider technischer Fasern zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die Spannungs-Dehnungsdiagramme (Anhang 8.2). Bei Hanf liegt die minimal gemessene Bruchkraft bei 0,3 N während die maximalen Bruchkräfte oft ca. acht Mal höher liegen und Werte von 2,5 N erreichen. Die Bruchkräfte bei Kenaf liegen deutlich niedriger als die von Hanf (die maximale Bruchkraft liegt bei 1,6 N, die minimale bei 0,2 N). Dies ist auf die in der Regel geringeren Außendurchmesser der technischen Kenaffasern zurückzuführen.

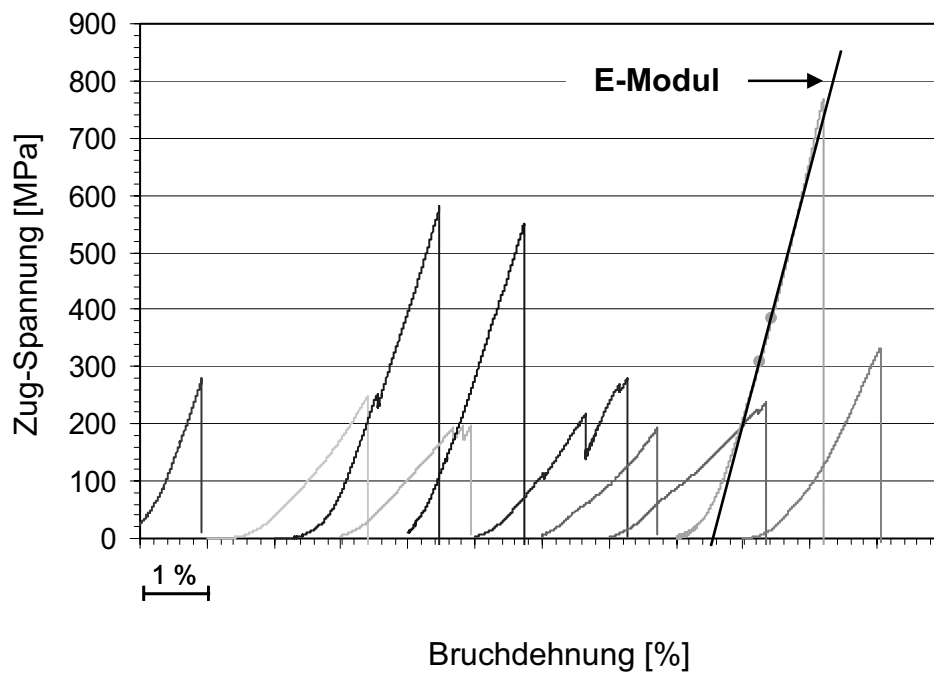


Bild 3.13: Spannungs-Dehnungsdiagramm für Hanffasern (Einspannlänge 40 mm)

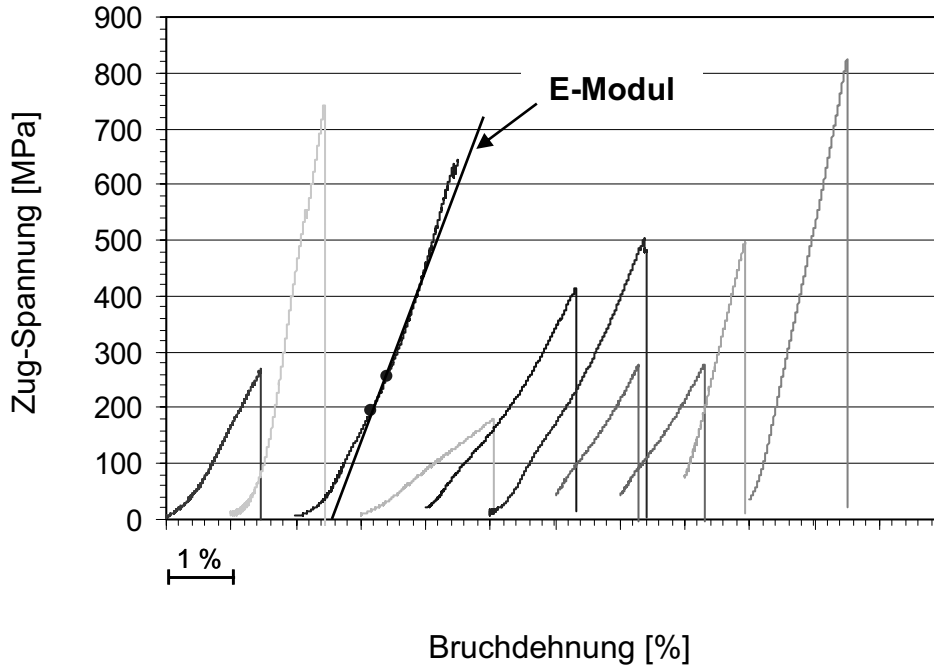


Bild 3.14: Spannungs-Dehnungsdiagramm für Kenaffasern (Einspannlänge 40 mm)

Die Bruchspannung ist als Quotient der Kraft durch den Faserdurchmesser einer technischen Faser definiert. Für die Berechnung des E-Moduls muss die bei fast allen Versuchen detektierte Flachstelle am Anfang des Spannungs-Dehnungsdiagramms berücksichtigt werden. Diese entstehen durch die nicht ausreichende Spannung der technischen Fasern in der Papierrahmenkonstruktion. Zu Beginn des Zugversuches wird eine Anfangskraft zur Einspannung des Faserbündels sowie der Elementarfasern innerhalb des Bündels benötigt. Dies verursacht die Flachstellen am Anfang des Zugspannungs- Bruchdehnungsdiagramm.

Bild 3.15 stellt die Ergebnisse der Faserbruchspannung in Abhängigkeit des Faserdurchmessers dar (Testlänge 40 mm). Die Ergebnisse für Kenaf- und Hanffasern mit Testlängen von jeweils 20 und 60 mm sind im Anhang 8.3 zusammengestellt.

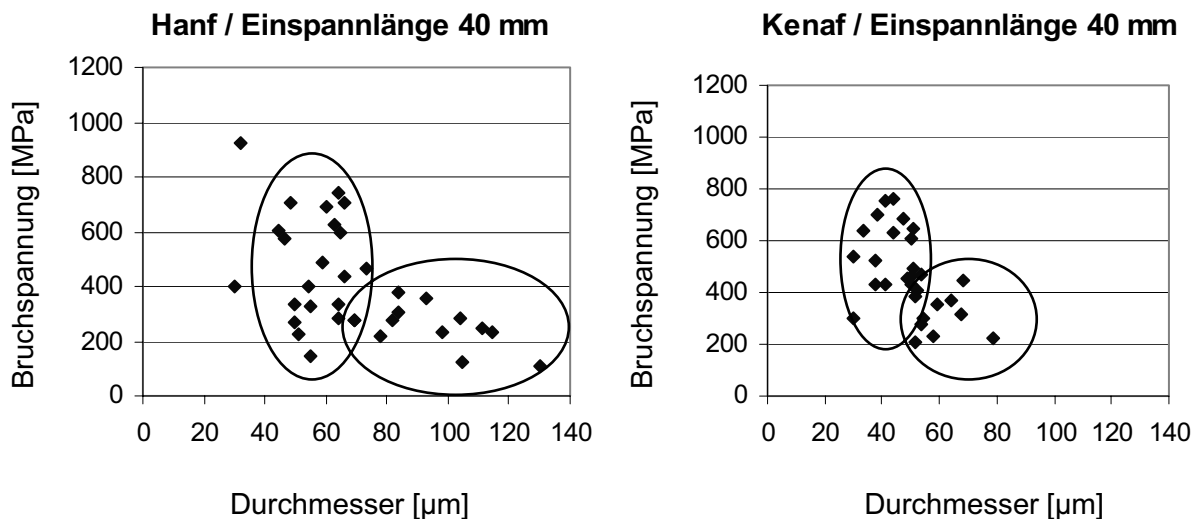


Bild 3.15: Bruchspannung aller getesteten Fasern in Abhängigkeit des Faserdurchmessers (Einspannlänge 40 mm)

Beide Faserarten zeigen die besseren Ergebnisse, d.h. eine höhere Zugfestigkeit, bei niedrigen Durchmessern. Einige technische Fasern mit sehr großem Durchmesser zeigen sogar extrem niedrige Festigkeiten von unter 200 MPa.

Bereits Biagiotti [93] und Morimoto [95] haben die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften vom Faserdurchmesser gezielt analysiert und berichten über denselben Trend, wie er in den Versuchen zu dieser Arbeit festgestellt wurde. Beide Autoren begründen übereinstimmend den Abfall der mechanischen Eigenschaftswerte bei zunehmendem Faserdurchmesser mit der steigenden Wahrscheinlichkeit, dass

Schwachstellen in der Faserstruktur auftreten. Biagiotti berichtet bei Flachsfasern sogar über eine umgekehrte Proportionalität zwischen E-Modul und Faserdurchmesser und bestätigt dies sowohl mit experimentellen Werten als auch mit statistischen Modellen. Im Bild 3.15 ist eine ähnliche Tendenz für die Festigkeit zu erkennen, da die technischen Fasern mit den größeren Außendurchmessern die niedrigsten Spannungswerte aufweisen.

Hanffasern zeigen bei den Versuchen mit Fasern der Einspannlänge von 40 und 60 mm eine sehr ähnliche Zugfestigkeit von ca. 400 MPa. Bei einer Faserlänge von 20 mm steigt die Festigkeit bis auf ca. 500 MPa an. Für Kenaffasern ist keine deutliche Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Einspannlänge festzustellen. Alle Ergebnisse sind in Tabelle 3.2 aufgeführt (Die Ergebnisse aller einzeln getesteten technischen Fasern befinden sich im Anhang 8.4)

Tabelle 3.2: Ergebnisse des Zugfestigkeitstests bei Hanf- und Kenaffasern

Faser / Einspannlänge [mm]	Kraft [N]	Zugfestigkeit [MPa]	E-Modul [MPa]
Hanf / 20	1,6 ± 0,7	482 ± 262	22849 ± 7151
Hanf / 40	1,4 ± 0,7	400 ± 200	25918 ± 13613
Hanf / 60	1,1 ± 0,5	407 ± 195	23838 ± 13571
Kenaf / 20	1,0 ± 0,4	449 ± 153	27694 ± 5629
Kenaf / 40	0,9 ± 0,3	464 ± 160	34551 ± 9734
Kenaf / 60	0,8 ± 0,3	475 ± 184	36068 ± 8463

Hanf- und Kenaffasern sind starke, aber spröde Fasern, die nur eine geringe Dehnung von ca. 2 % bis zum Bruch aufweisen. Die Standardabweichung zwischen Messreihen zur Zugfestigkeit beträgt nicht selten ca. 50 %. Streuungen dieser Ordnung sind bei allen Zugfestigkeitsbestimmungen von Naturfasern in der Literatur zu finden. Diese großen Unterschiede hängen von vielen Faktoren ab. In erster Linie sind sie durch die ungleichmäßigen Faserbündel bedingt, welche aus mehreren Elementarfasern bestehen, die nicht gleichmäßig über die Faserlänge verteilt sind. Sogar innerhalb einer technischen Faser kann die Zugfestigkeit stark variieren, je nach Position der Spannklemmen der Prüfmaschine (Bild 3.16). Die Annahme, dass der Durchmesser der Fasern rund und gleichmäßig ist, kann ferner der Ursprung von

Messfehlern sein. Defekte im Faserinneren oder kleine Beschädigungen durch die Faserbehandlung bzw. Probenvorbereitung können ebenfalls zu großen Schwankungen führen.

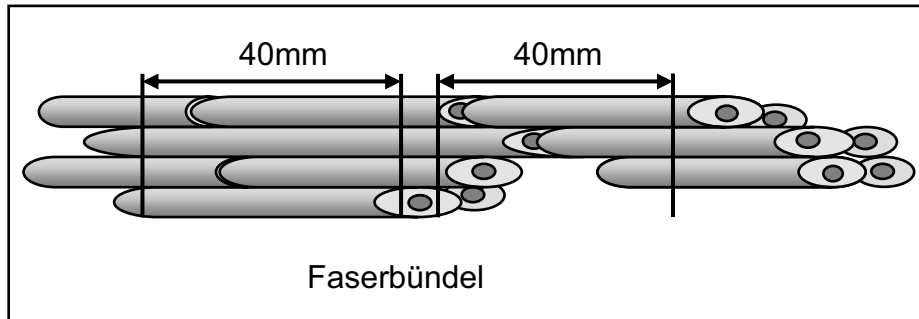


Bild 3.16: Schematische Darstellung eines Faserbündels

Die experimentellen Werte zeigen für beide Faserarten für alle Einspannlängen eine nahezu konstante Zugfestigkeit im Bereich von 400 bis 500 MPa. Boss [96] fand ähnliche Werte in ihrer Studie über Flachsfasern, bei denen kaum Abweichungen der Festigkeit bei größeren Messlängen zwischen 25 und 100 mm festzustellen waren (Bild 3.17).

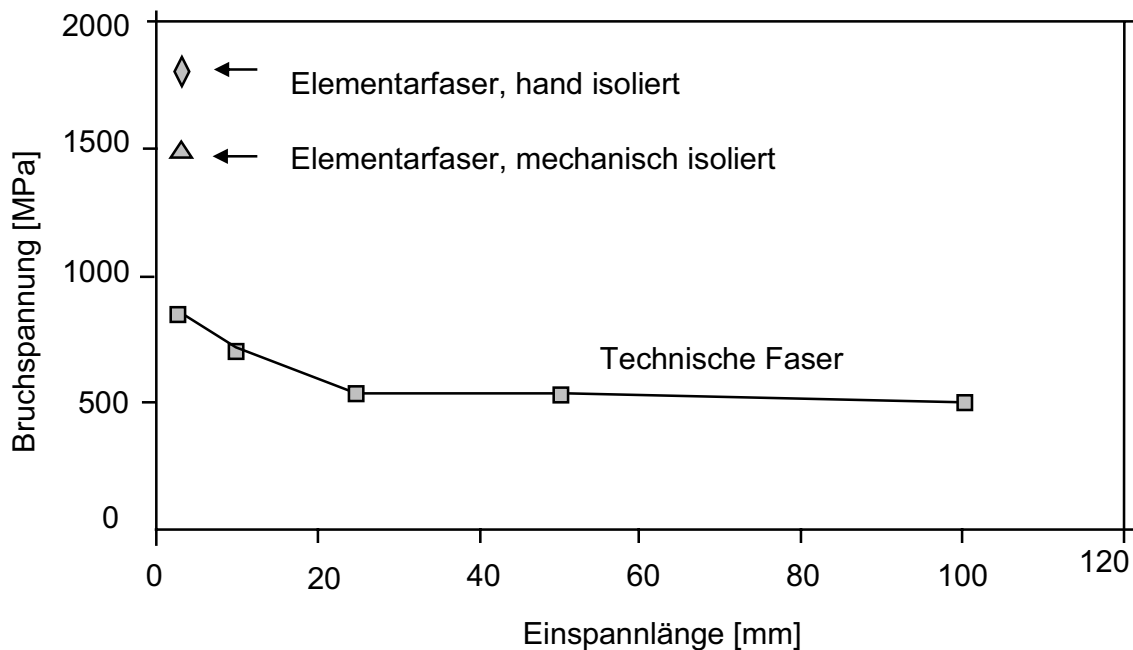


Bild 3.17: Abhängigkeit der Zugspannung technischer Flachsfasern von der Testlänge [nach 96]

Die mittlere Zugfestigkeit liegt hier bei ca. 500 MPa. Erst bei kleineren Einspannlängen steigen die Festigkeitsmesswerte deutlich an (ca. 850 MPa bei 3 mm). Die höchsten Messwerte wurden bei den mechanisch bzw. von Hand isolierten Elementarfasern im Bereich von 1500 bis 1800 MPa festgestellt.

Dieses Phänomen kann mit der Faserstruktur und ihren Bruchmechanismen begründet werden. Romhány et. al. [100] haben die Bruchmechanismen von Flachsfasern mittels in situ REM-Analyse und Schallemissionsanalyse untersucht und den Ablauf eines Faserbruchs aufgrund der Axialstruktur der Flachfasern (Bild 3.18) erklärt. Bei längeren Faserlängen tritt die axiale Spaltung zwischen den einzelnen Fasern auf, da Hemicellulose und Pektine, welche die Fasern zusammenhalten, eine viel niedrigere Festigkeit aufweisen als die Cellulose, Bestandteil der Fibrillen und Microfibrillen. Bei kürzeren Faserlängen gibt es nicht nur weniger Schwachstellen entlang der Testfasern sondern auch die Spannklemmen der Prüfmaschine befinden sich hier innerhalb der Länge der einzelnen Fasern. Der axiale Bruch spielt eine untergeordnete Rolle, während der Querbruch durch die härtere Cellulosestruktur der Elementarfasern den Bruchverlauf dominiert.

Die Querrissbildung beginnt an der Grenze zwischen den Elementarfasern. Diese radialen Mikrorisse in Kombination mit der axialen Rissbildung bewirken eine Umverteilung der Belastung innerhalb der Faser.

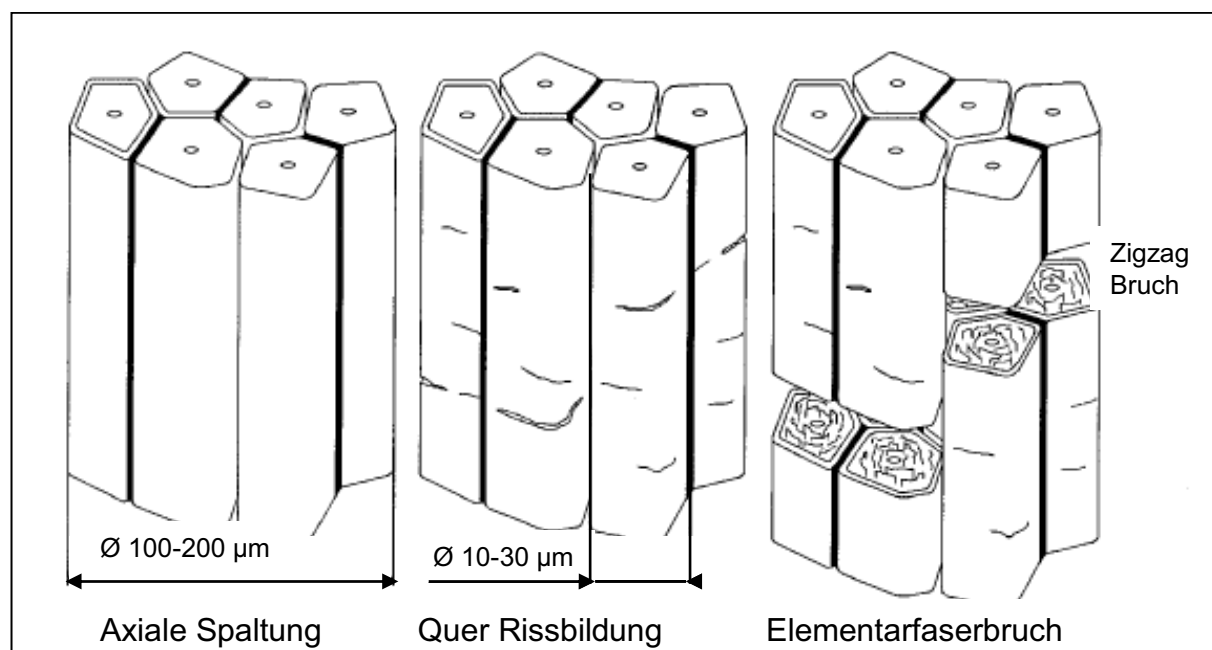


Bild 3.18: Abfolge des Bruchs einer Flachfaser nach Romhány et. al. [100]



Die meisten getesteten Fasern zeigen einen Bruch wie im Bild 3.19 links dargestellt. Die Fasern haben sich durch den axialen Bruch in mehrere kleine Faserbündel aufgespalten. Nur wenige Fasern zeigen einen glatten Bruch wie im Bild 3.19 rechts abgebildet.

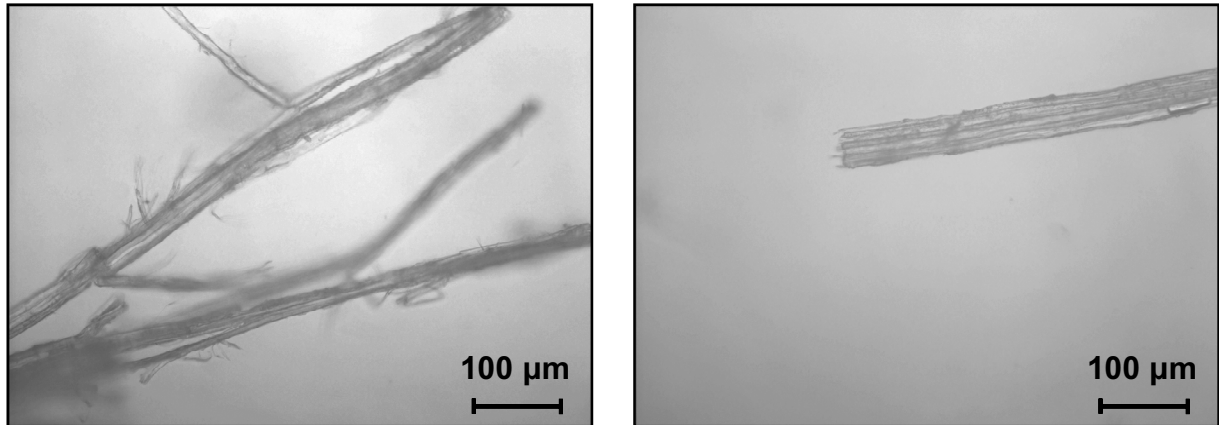


Bild 3.19: Lichtmikroskopische Micrographien der Bruchstelle zweier getestete Fasern

Bild 3.20 zeigt die REM Aufnahme einer getesteten technischen Hanffaser. Hier ist die Abspaltung zwischen den Elementarfasern des Bündels, die nicht zum vollständigen Bruch geführt hat, deutlich zu erkennen.

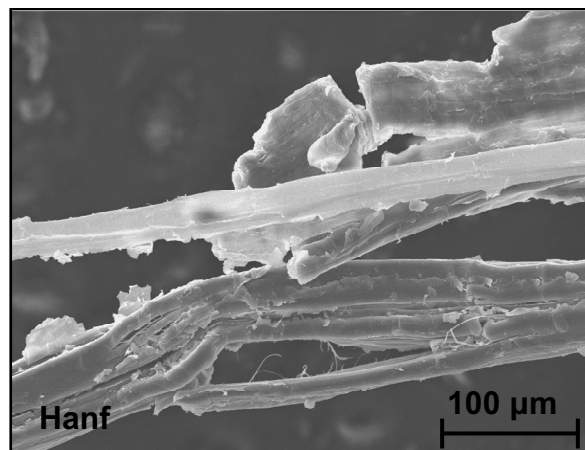


Bild 3.20: Axiale Spaltung und Teilbruch einer technischen Hanffaser

Eine REM-Analyse der getesteten Fasern zeigt, dass dieser Bruchablauf auch bei Hanf- und Kenaf stattfindet. In Bild 3.21 ist die zuerst entstandene axiale Spaltung bei Hanf- und Kenaffasern zu sehen, während in Bild 3.22 (links) exemplarisch die Querrissentstehung einer Hanffaser zu erkennen ist.

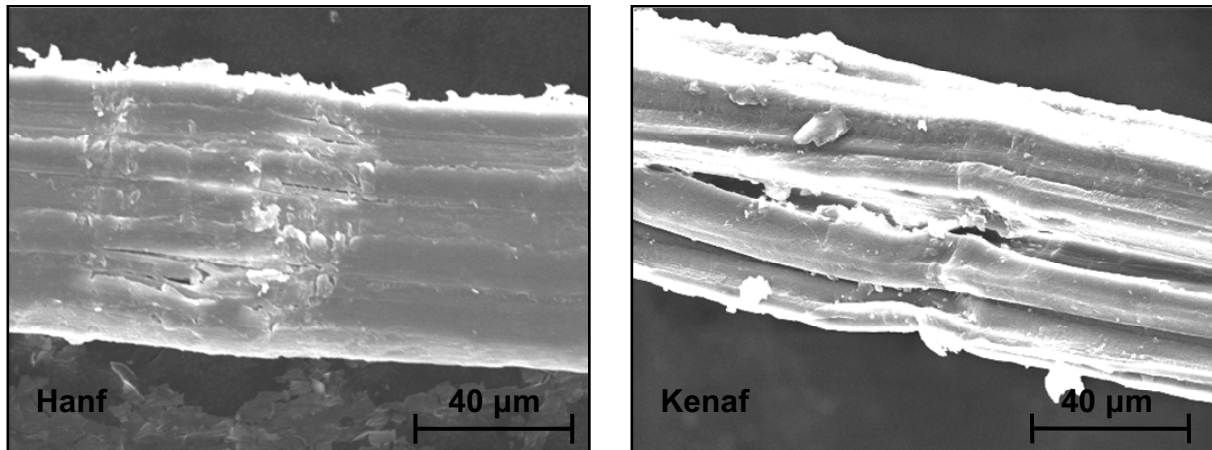


Bild 3.21: Axiale Spaltung von Hanf- und Kenaffasern

Dieser Bruchverlauf tritt nicht nur an einer einzigen Stelle der Faserstruktur auf, sondern simultan an vielen Stellen. Dies kann zu einer Rissbildung führen, wobei die Elementarfasern auseinander gerissen werden, ohne dass es zum vollständigen Bruch kommt (Bild 3.22 rechts).

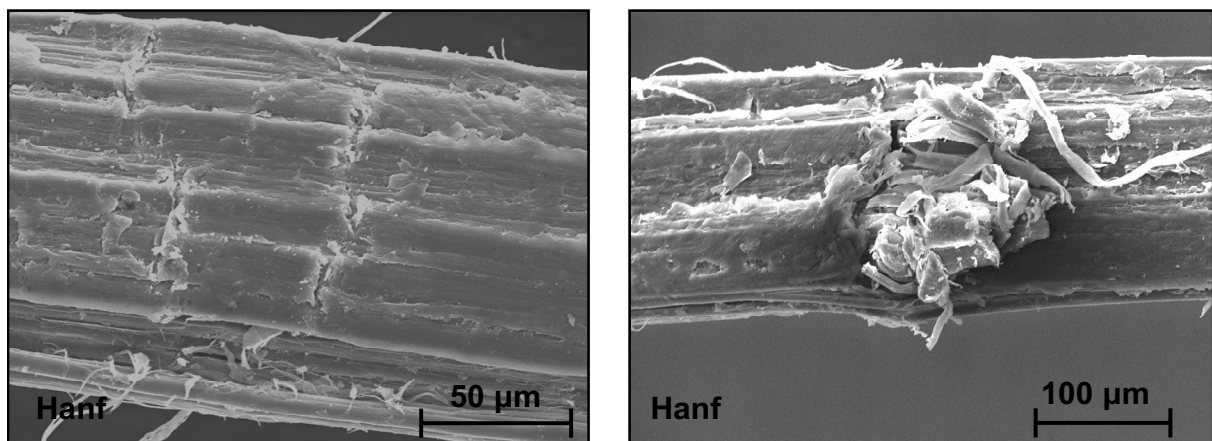


Bild 3.22: Querrissbildung einer Hanffaser (links) und extreme axiale Spaltung ohne vollständigen Bruch einer Hanffaser (rechts)

Aufgrund der ungleichmäßigen Querschnitte der Fasern in Abhängigkeit der Anzahl von Bündeln kann der teilweise Bruch an einer Stelle der Faserstruktur beginnen, wobei lediglich ein Bündel der technischen Faser bricht, während die anderen nicht reißen (Bild 3.23 links). Die mikroskopische Aufnahme eines Faserquerschnitts zeigt, dass es sich in diesen Fällen um technische Fasern handelt, die aus mindestens zwei Faserbündeln bestehen (Bild 3.23 rechts).

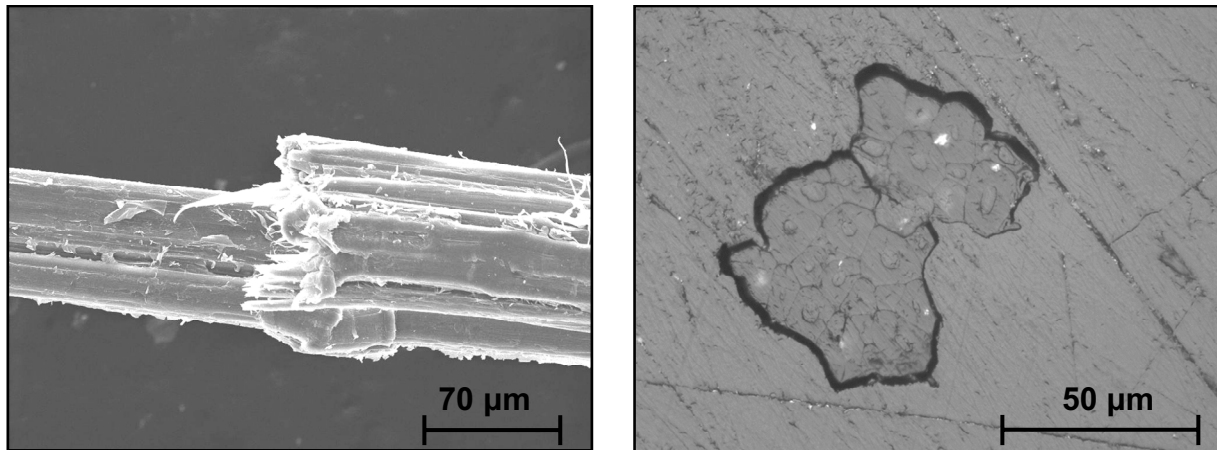


Bild 3.23: REM-Aufnahme eines unvollständigen Bruchs einer technischen Kenaffaser (links) und lichtmikroskopische Aufnahme des Querschnitts einer Kenaffaser bestehend aus zwei Faserbündeln (rechts)

Einer der Faserbündel bricht unter der Belastung, der zweite jedoch nicht. Zum vollständigen Bruch kommt es an einer anderen Stelle der technischen Faser.

### 3.3 Weibullverteilung

#### 3.3.1 Beschreibung der Methode

Aufgrund der großen Standardabweichung bei den Messwerten sollen die experimentellen Zugfestigkeitswerte statistisch geprüft werden. Dazu wurde die Weibullverteilung verwendet. Die Weibullverteilung ist eine der am häufigsten eingesetzten statistischen Verteilungsmethoden für die Analyse der Faserzugfestigkeit [97, 98, 99]. Die Weibullverteilung wird häufig angewendet, um die Versagenswahrscheinlichkeit spröder Materialien, meistens Kohlenstofffasern aber auch Naturfasern [100, 101, 102, 103] bei der Zugfestigkeitsbestimmung zu beschreiben. Hierbei wird die Faserfestigkeit bei geringer Einspannlänge aus den Ergebnissen bei größerer Einspannlänge berechnet. Diese Theorie hat ihre Grundlagen in der „Hypothese des schwächsten Punkts“, wonach der schwächste Punkt die Festigkeit der Fasern bestimmt. Der Faserbruch wird durch in der Faserstruktur existierende Defekte ausgelöst. Infolgedessen entspricht jedem Strukturfehler eine lokale Festigkeit und im Endeffekt wird die Festigkeit der kompletten Faser durch den gravierenden Fehler bestimmt.

Die Faserzugfestigkeit wird bei prüfbareren Einspannlängen bestimmt und auf Basis der experimentell gewonnenen Daten werden die Weibullparameter ermittelt. [98].

Die Weibull kumulative Verteilungsfunktion  $F(\sigma; \sigma_0, m)$  und der entsprechenden Mittelwert der Bruchspannung ( $\bar{\sigma}$ ) sind folgendermaßen definiert [103]:

$$F(\sigma; \sigma_0, m) = 1 - \exp \left[ -L \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (3.2)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 L^{-1/m} \Gamma \left( 1 + \frac{1}{m} \right) \quad (3.3)$$

F: Wahrscheinlichkeit, dass eine Faser bei  $\sigma < \sigma_0$  versagt

$\sigma$ : Bruchspannung der getesteten technischen Faser

$\sigma_0$ : Niveauparameter, Bruchwahrscheinlichkeit 62,3 %

m: Weibull-Modul

L: getestete Faserlänge

$\Gamma$ : Gamma-Funktion

Als  $\sigma_0$  wird die Faserzugfestigkeit verstanden, unterhalb welcher eine individuelle Faser mit einer Wahrscheinlichkeit von 62,3 % versagt. Die Streuung der Messdaten wird durch den zweiten Freiparameter m beschrieben. Die Weibull-Parameter  $\sigma_0$  und m bleiben bei einer Fasermesslänge konstant.

Die Validierung des Weibull-Modells wird graphisch dargestellt, wobei die „Weibull-Quantity“ Q gegen den natürlichen Logarithmus der Festigkeit ausgedrückt wird [103].

$$Q = \ln \left[ \frac{1}{1 - F(\sigma)} \right] = m \ln(\sigma) + m \ln \left( \frac{L^{1/m}}{\sigma_0} \right) \quad (3.4)$$

Aus den originären Daten resultiert ein experimenteller Wert von Q der mit dem mathematischen Modell verglichen wird.

### 3.3.2 Validierung der Zugergebnisse durch das Weibull-Modell

Die berechneten Weibull-Parameter sind in der Tabelle 3.3 dargestellt. Mit ihnen wurde die theoretische Zugfestigkeit der Fasern berechnet.

Tabelle 3.3: Weibull Parameter und berechnete theoretische Zugfestigkeit

Weibull Parameter			Theoretische Festigkeit [MPa]		
	$\sigma$	m	$\sigma_{20\text{mm}}$	$\sigma_{40\text{mm}}$	$\sigma_{60\text{mm}}$
Hanf	2.4414	2.2052	573	432	366
Kenaf	1.7082	3.0627	574	458	401

Die Darstellung der "Weibull-Quantity" Q ergibt sich aus den experimentellen Zugfestigkeitswerten  $\ln(\sigma)$  und den berechneten Weibull Parametern. Bild 3.24 und Bild 3.25 zeigen exemplarisch die Darstellung der Weibull Zugfestigkeitswerte (Testlänge 40 mm), in sehr guter Übereinstimmung mit den gemessenen Werten.

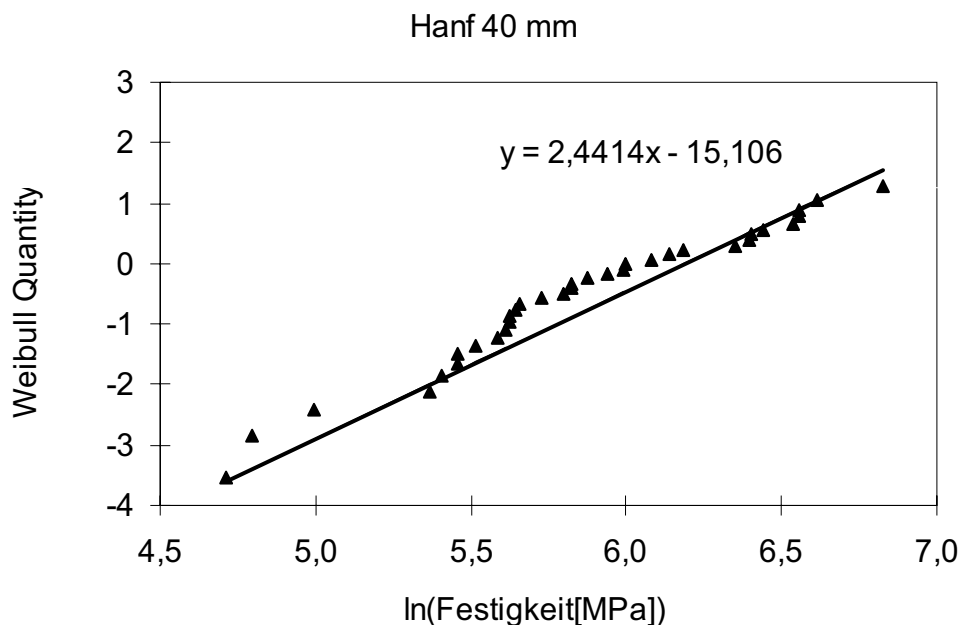


Bild 3.24: Wechselbeziehung zwischen den experimentellen ( $\blacktriangle$ ) und den Weibull (-) Zugfestigkeitswerten für Hanffasern

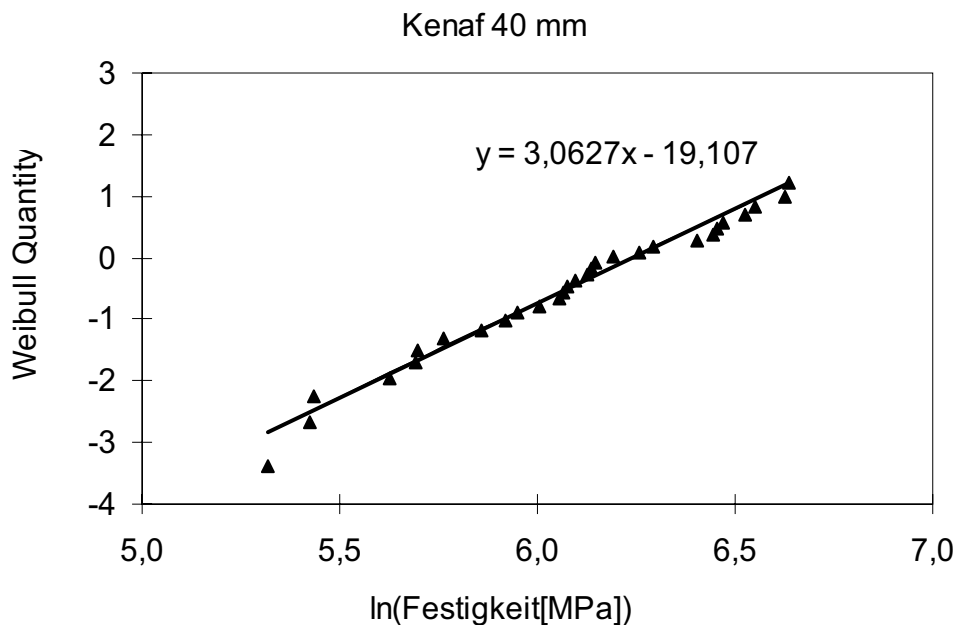


Bild 3.25: Wechselbeziehung zwischen den experimentellen (▲) und den Weibull (-) Zugfestigkeitswerten für Kenaffasern.

Die Steigung der Kurve entspricht dem Weibull Parameter  $\sigma$ . Kenaffasern weisen einen höheren Wert für  $m$  auf. Höhere  $m$ -Werte bedeuten eine niedrigere Versagenswahrscheinlichkeit. Die Variation der experimentellen Festigkeitswerte in Abhängigkeit von der Testlänge, sowie die mit der zweiparametrischen Weibulltheorie berechnete Festigkeit ist im Bild 3.26 dargestellt. Der theoretische Festigkeitswert bei einer Faserlänge von 1 mm ist ebenfalls dargestellt. Wie erwartet, nimmt die Festigkeit bei niedrigen Faserlängen deutlich zu.

Die Weibull-Analyse liefert eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Werten der Faserzugfestigkeit. Gleichzeitig zeigt die Weibullverteilung für alle Messlängen eine gute Kongruenz zwischen den theoretischen und experimentellen Ergebnissen und bietet einen Überblick des Verlaufs der Zugfestigkeit entlang der gesamten Faserlänge.

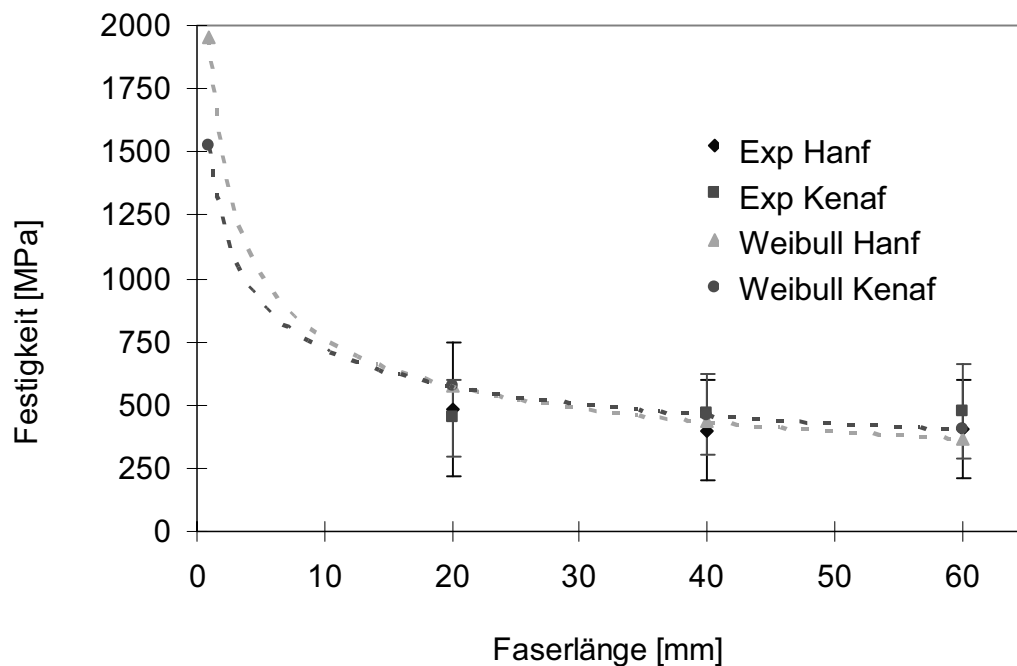


Bild 3.26: Abhängigkeit zwischen den experimentellen und theoretischen Faserfestigkeitswerten und der Faserlänge.

### 3.4 Zusammenfassung der Fasercharakterisierung

Hanf- und Kenaffasern wurden mechanisch und morphologisch charakterisiert. Die starke Streuung der einzelnen mechanischen Kennwerte ist auf unterschiedliche Faktoren zurückzuführen. Entscheidend sind die Schwachstellen innerhalb der Faserstruktur und dass Naturfasern keinen einheitlichen Querschnitt besitzen. Sie variieren stark im Durchmesser, sogar innerhalb einer einzigen technischen Faser. Die Weibullverteilung wurde zur Charakterisierung der Fasern erfolgreich eingesetzt. Anhand der Ergebnisse ist deutlich zu erkennen, dass die mechanischen Eigenschaften der Fasern mit dem Weibull-Model beschrieben werden können.

Die mechanischen Eigenschaften beider technischen Fasern erreichen die Kennwerte des Flachses und können durch die gleichen Bruchmechanismen beschrieben werden.





## 4 Auswahl des Matrixsystems und Halbzeugherstellung

### 4.1 Auswahl des Matrixsystems

#### 4.1.1 Acrylharze

Durch den Einsatz von duroplastischen Kunststoffen können höhere Faseranteile im Verbund als bei Verwendung von Thermoplasten wie beispielsweise PP erreicht werden. Zusätzlich wird ohne den Zusatz von Haftvermittlern eine sehr gute Faser-Matrix-Haftung erzielt, woraus gute mechanische Eigenschaften resultieren. Für ökologisch sinnvolle Anwendungen wie die Vernetzung von Naturfasern wurden in dieser Arbeit alternativ zu den häufig verwendeten Phenolharzlösungen oder UP-Harzen, die üblicherweise Reaktivlösemittel wie z.B. Styrol enthalten, emissionsfreie Polymersysteme auf Acrylbasis ausgewählt.

Die ersten Acrylharze (auch Acrylatharze genannt) wurden vor etwa 60 Jahren hergestellt, ihre technische Anwendung liegt erst ca. 50 Jahre zurück. Acrylharze zeichnen sich die durch eine besonders hohe Beständigkeit gegen Belichtung, Alterung und Witterung aus, da ihre Hydrolysebeständigkeit hervorragend ist und sie durch Bakterien nicht angreifbar sind (beim Eingrabetest von Textilien in stark bakterienhaltige Böden schneiden Acrylfasern besonders gut ab).

Acrylharze werden durch Polymerisation von Acrylaten oder anderen Monomeren mit Acrylgruppe (Bild 4.1) hergestellt [104].

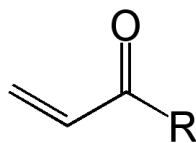


Bild 4.1: Funktionale Gruppe der Acrylharze (Acrylgruppe H<sub>2</sub>C=CH-CO-R)

Die Acrylgruppe kommt z. B. in der Propensäure (Acrylsäure, H<sub>2</sub>C=CHCOOH) und in den Estern dieser Säure, den so genannten Acrylaten (u. a. Methylacrylate, H<sub>2</sub>C=CHCOOCH<sub>3</sub>), vor. Acrylatbindemittel können aus etwa 30 verschiedenen Monomeren durch Homo- oder Copolymerisation hergestellt werden [105]. Dies ergibt zahlreiche Variation von Acrylatpolymersysteme, die in organischer Lösung und als

wasserlösliche Acrylate vorliegen können. Die Anwendung von in organischem Lösemittel gelösten Festsubstanzen oder von Lösungspolymerisaten im organischen Lösemittel bringt einige Nachteile. Viele Lösemittel sind feuergefährlich und die Mischung ihrer Dämpfe mit Luft explosiv. Bei Lösemitteldämpfen müssen außerdem aufgrund ihrer physiologischen Wirkung und ihres Geruchs besondere Schutzmaßnahmen getroffen werden. Durch den Einsatz von wässrigen Systemen wie z. B. wässrigen Dispersionen können solche Probleme vermieden werden.

Acrylverbindungen können sowohl thermoplastische als auch duroplastische Eigenschaften aufweisen. Für die Herstellung duroplastischen Acrylharze müssen neben den Monomeren, die zu thermoplastischen Systemen führen, vernetzungsfähigen Gruppen in Form von multifunktionellen Estern enthalten sein. Die multifunktionellen Monomeren ergeben dem Harz seine duroplastischen Eigenschaften [106]. Die chemische Härtung von Acrylharzen wird durch Radikalbildner ausgelöst. Je nach eingesetztem Härtungssystem kann eine Kalthärtung oder eine Warm- / Heißhärtung vorgenommen werden.

Acrylharze werden in zahlreichen Anwendungsgebieten eingesetzt. Lufttrocknende Acrylharze und ihre wässrigen Dispersionen werden als Bindemittel für Bauten- und Fassadenfarben eingesetzt. Wärmehärtbare Acrylharze sind Bindemittelkomponenten von Einbrennlacken für die Lackierung von Metall- und Kunststoffoberflächen. Auf dem Textil- und Papiergebiet werden in zunehmendem Maße Acrylharze als Bindemittel für Fasern und Farben verlangt, die nach dem Aufbringen und Trocknen, gleichgültig, ob aus Lösung oder Dispersion, nicht mehr lösemittellöslich sind [107]. Diese vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten erfordern eine optimale Anpassung des Harzes und seines Eigenschaftsprofils an den Einsatzbereich.

Mittels Emulsionspolymerisation gewonnene wasserlösliche Acrylate sind aufgrund ihrer Eigenschaften zur Herstellung von Faserverstärkten Halbzeugen geeignet. Es entstehen wasserundurchlässige Materialien von relativ geringer Dichte, die mittels Umformverfahren zu Bauteilen weiterverarbeitet werden können. Im Gegensatz zu den kommerziell erhältlichen ungesättigten Polyesterharzen, die aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Viskosität in Styrol gelöst sind, handelt es sich hier um wässrige Dispersion, bei deren Aushärtungsreaktion, nur gesundheits- und umweltunbedenkliche Wassermoleküle frei werden.

#### 4.1.2 Eingesetzte Matrixsysteme und Matrixauswahl

Um ein geeignetes Matrixsystem für die vorgesehenen Anwendungen und ihren Anforderungen zu finden, wurden sechs verschiedene Polymersysteme auf Acrylatbasis unterschiedlicher Hersteller ausgesucht und eingesetzt (M1 bis M6). Die Bindemittel sind in Abstimmung mit den Herstellern mit angepassten Rezepturen appliziert worden. Alle zu untersuchenden Matrixmaterialien wurden in Dispersionsform gebracht und die Naturfasermischvliese (s. Kap. 4.2.1) im Tauchverfahren (s. Kap. 4.2.2) damit ausgerüstet.

Alle hergestellten Halbzeuge wurde zu Prüfplatten (s. Kap. 4.3) verpresst, ihre mechanischen Eigenschaften bestimmt und verglichen. Das Matrixsystem, das nicht nur bei den mechanischen Kennwerten, sondern auch bei der Verarbeitung zu Prüfplatten die besten Ergebnisse ergaben, wurde für die nächsten Schritte ausgewählt. Dabei handelt es sich um ein hitzereaktives Acrylharz. Dieses Polymersystem besteht aus einer Polycarbonsäure und einem Polyalkohol. Das einkomponentige Harz weist bei Temperaturen unter 100 °C ein thermoplastisches Verhalten auf (Erweichungstemperatur von ca. 50 °C). Es erfolgt keine Vernetzung unterhalb dieser Temperatur. Somit sind die Halbzeuge im Gegensatz zu anderen duroplastischen Systemen wie Exoxid oder Polyurethan, die sofort nach der Imprägnierung verarbeitet werden müssen, lagerstabil (bis zu sechs Monate nach der Imprägnierung). Ab Temperaturen von 130 °C reagiert die Polycarbonsäure mit dem Polyalkohol unter Abspaltung von Wassermolekülen zu einem Polyester (Bild 4.2).

Dieses thermische vernetzbare Acrylharz liegt als wässrige Dispersion vor und kann somit mittels eines Foulards (s. Kap. 4.2.2) auf die Naturfaservliese aufgebracht werden. Im Anschluss wurden die Halbzeuge auf eine Restfeuchte von ca. 14 % getrocknet. Das Wasser wirkt für das unvernetztes Acrylharz als Weichmacher und verbessert somit die thermische Verformbarkeit und die Faser-Matrix-Haftung.

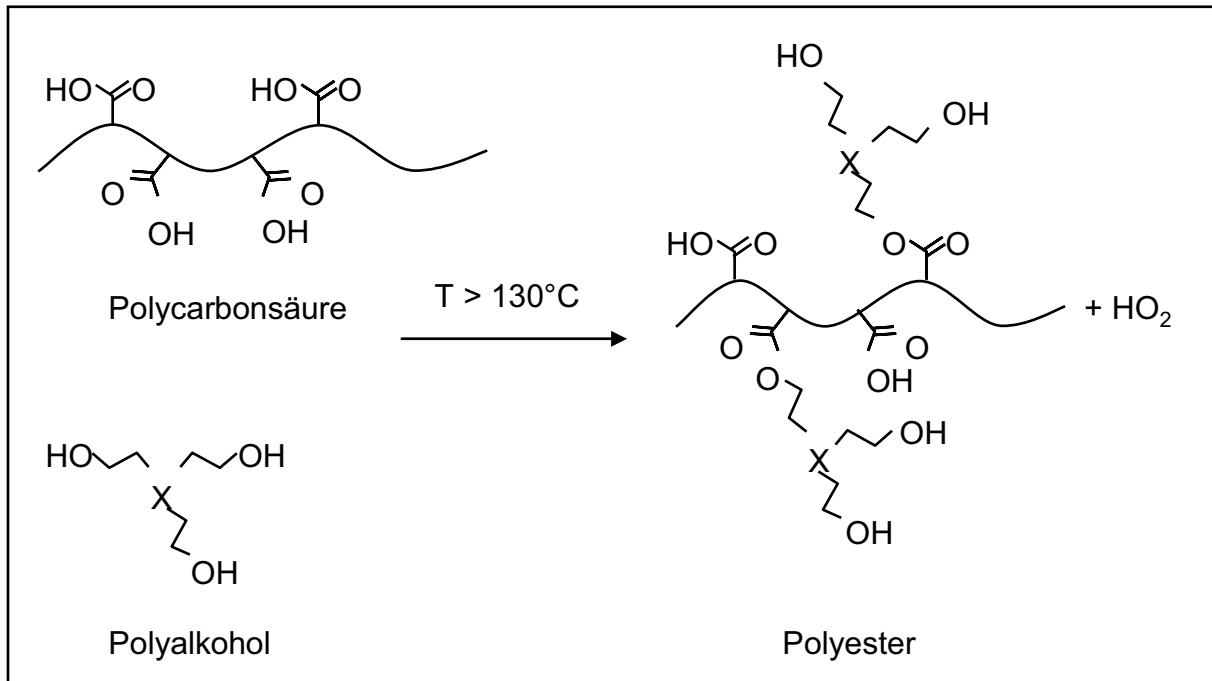


Bild 4.2: Aushärtungsreaktion des Matrixsystems [108]

Die optimale Vernetzungstemperatur liegt bei  $180\text{-}220^{\circ}\text{C}$ . Während der Verarbeitung entsteht nur gesundheitlich unbedenklicher Wasserdampf. Nach der Aushärtung besitzt das Material duroplastische Eigenschaften und ist hydrophob, widerstands- und strapazierfähig.

## 4.2 Halbzeugherstellung

### 4.2.1 Vliesherstellung

Für die Herstellung von Verbundwerkstoffen werden die Rohfasern zunächst zu Garnen, Rovings, Geweben oder Vliesen weiterverarbeitet. Für die Verbundherstellung im Formpressverfahren werden generell Faservliese bevorzugt. Vliesstoffe bestehen aus Fasern, die nahezu ungeordnet im Vliesstoff zueinander liegen. Mit dieser textilen Aufbereitung kann eine werkstoffseitige Kostenreduzierung bei niedrigen Bauteildichten erzielt werden. Weiterhin können die natürlich auftretenden Schwankungen der Fasern aufgefangen werden. Außerdem erwiesen sich Vliese durch die nicht vorhandenen Bindungen zwischen den Fasern als gut drapierbar, was ein wichtiger Faktor im Hinblick auf die Verarbeitung zu dreidimensionalen Bauteilen darstellt.

Die Vliesstoffproduktion gliedert sich üblicherweise in drei Stufen: Vliesbildung, Vliesverfestigung und Vliesstoffausrüstung, die dank neuer technologischer Entwicklungen in einem kontinuierlichen Prozess ablaufen können. Bild 4.3 zeigt eine schematische Darstellung des Vliesherstellungsprozesses.

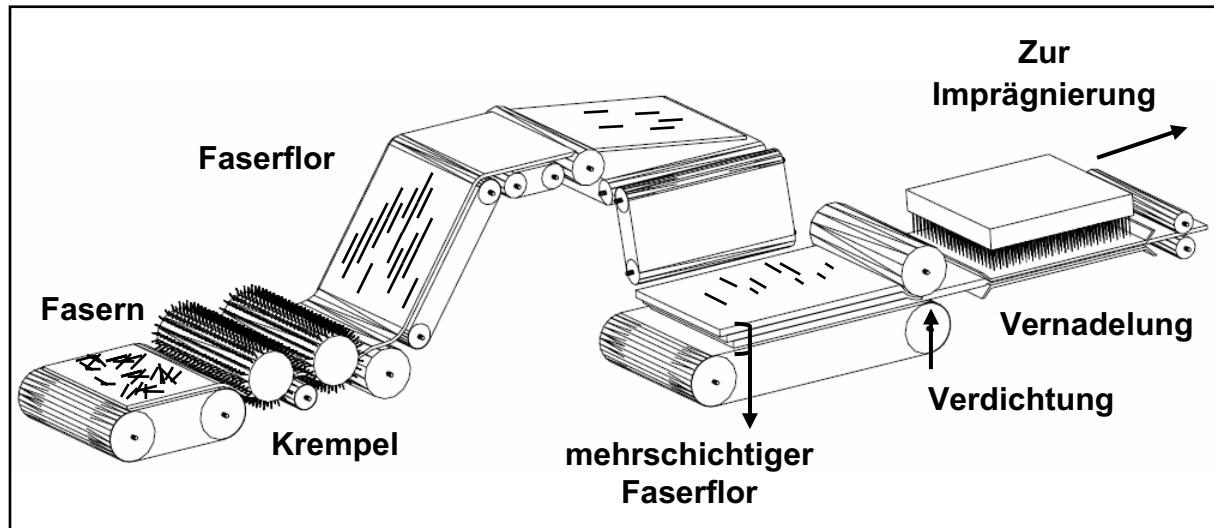


Bild 4.3: Schematische Darstellung der Nadelvliesherstellung

Die Vliesherstellung beginnt mit der flächigen Anordnung der Fasern zum sogenannten Flor. Dafür werden die in Ballen gelieferten Fasern zuerst geöffnet und vermischt. Die Fasern werden dann mittels eines Saugers einer Krempel zugeführt. In der Luftströmung werden die Fasern weiterhin vermischt. Eine Krempel dient im Wesentlichen dazu, mit Hilfe mehrerer rotierender, mit feinen Drähten oder Zähnen bestückten Walzen die Faserflocken aufzulösen und zu einem dünnen Flor zu kämmen. Hierbei werden die Faserbündel parallelisiert, von Fremdbestandteilen, Schmutz und Kurzfasern gereinigt, verfeinert und mechanisch geordnet [105]. Hierdurch entstehen Faserflore mit vorwiegend längsorientierten Fasern und somit anisotroper Festigkeit. Im Vlies wird hingegen eine ausgeglichene Festigkeit in Quer- und Längsrichtung erwünscht. Um das zu erreichen, muss der Faserflor, je nach erwünschtem Flächengewicht des Vlieses, mehrfach übereinandergelegt werden. Der Faserflor (Bild 4.4 links) wird zu diesem Zweck an ein Transportband übergeben und mittels Querleger zu einem mehrschichtigen Faserflor gelegt.

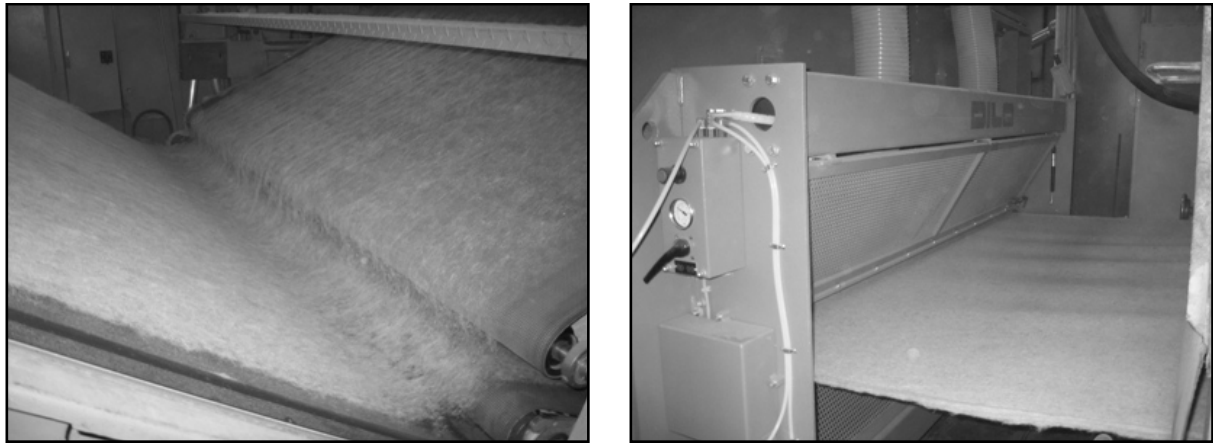


Bild 4.4: Faserflor und Vernadelung bei der Herstellung eines NF-Vlieses

Durch Aufeinanderlegen mehrerer Faserflöre können gewünschte Flächengewichte für die Vliese eingestellt werden. Das Vlies wird zunächst verdichtet und anschließend erfolgt die Vernadelung zum Nadelvlies (Bild 4.4 rechts). Mit kleinen Widerhaken versehene Nadeln durchstoßen das unverfestigte Faservlies und ziehen bei der Aufwärtsbewegung Fasern mit sich, so dass das Vlies mechanisch verfestigt wird und dadurch die gewünschte Festigkeit erreicht wird. Bei der Vernadelung beruht die Verfestigung auf der Faserverschlingung und auf der durch die Verdichtung des Faservlieses erzielten Erhöhung der Faser-Faser-Reibung [105].

Im Gegensatz zu den ursprünglich losen Fasern können vernadelte Vliese in der weiteren Verarbeitung viel besser gehandhabt werden. Durch den Lauf über die Krempel werden die Faserbündel verfeinert und die verschiedenen Fasern besser vermischt. Im Endprodukt sollen die Fasern gänzlich stochastisch orientiert sein (Wirrlagen-Vliesstoff). Wenn die Fasern keine Vorzugsrichtung in ihrer Ausrichtung (Orientierung) haben, spricht man von einem isotropen Vliesstoff. Obwohl vernadelte Vliese durch die wirre Orientierung der Fasern keine bevorzugte Richtung der Fasern aufweisen sollten, zeigt sich in der Praxis eine Orientierung der Fasern. Diese Orientierung ist durch den Lauf über die Krempel, als auch bei der Faserlegung begründet.

In diesem konkreten Fall orientieren sich die Fasern vorzugsweise quer zur Produktionsrichtung des Vlieses, da durch den Schichtaufbau und die mehrmalige Querlegung des Faserflors vor der Vernadelung die Anfangsproduktionsrichtung des Vlieses um  $90^\circ$  gedreht ist. Diese Orientierung kann später in den verpressten Bauteilen nachgewiesen werden und muss bei der Bestimmung der Verbundeigenschaften

berücksichtigt werden. In dieser Arbeit wird für die Probenbezeichnung in Produktionsrichtung (PR) die Längsrichtung des Vlieses definiert (Bild 4.5).

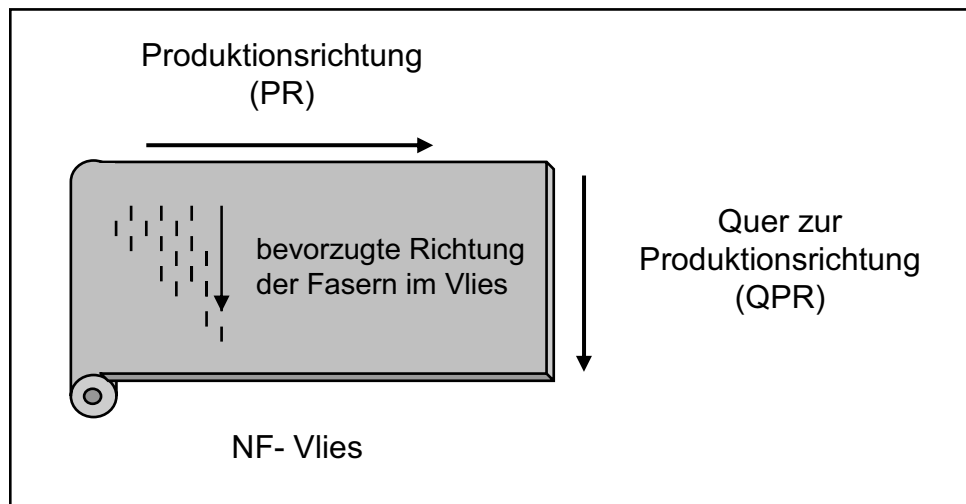


Bild 4.5: Definition der Produktionsrichtung für die Probenbezeichnung

Das endlos hergestellte Naturfaservlies wird zur Rolle aufgewickelt und kann zur Matriximprägnierung weiter geführt werden.

Die Fasern im Vlies sind somit nur durch die Vernadelung mechanisch miteinander Verwirrt und weisen eine sehr geringe Festigkeit auf. Die Festigkeit von unimprägnierten Vliesen konnte durch herkömmliche Zugversuche aufgrund des Auseinanderziehens der Fasern nicht bestimmt werden.

#### 4.2.2 Imprägnierung der Vliese im Tauchverfahren

Die Matrix wird mittels eines Foulards (Bild 4.6) auf das Naturfaservlies appliziert. Der Foulardierprozess ist die am meisten verbreitete Imprägniertechnik in der Textilveredlung [109]. Unter Foulardierung oder Vollbadimprägnierung versteht man ein Verfahren zur Nassbehandlung von Textilien auf einem Foulard (Bild 4.6). Der Foulardierprozess besteht aus einer Tauchphase, bei der das Vlies mit der Matrix vollständig und gleichmäßig über die gesamte Warenbreite imprägniert wird. Danach wird das ausgerüstete Vlies durch zwei Walzen geleitet, um den Matrixüberschuss auf ein genau definiertes Maß abzuquetschen. Nach dem Foulard schließt sich ein Trocknungsprozess an, um die aufgenommene Matrix auf dem Vlies zu trocken. Die Menge des aufgenommenen Feststoffgehalts (Matrixanteil) in Prozent bezieht sich

auf die Menge des Matrixsystems, die nach dem Trocknen auf dem Vlies bleibt, in Bezug auf das Vliesgewicht.

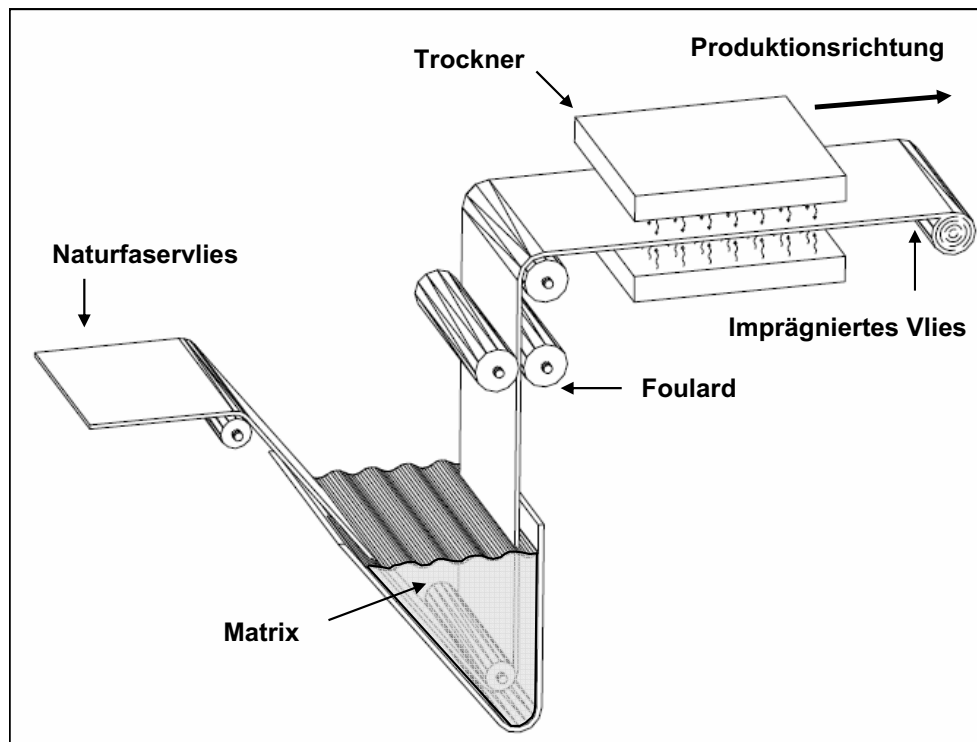


Bild 4.6: Imprägnierung der Halbzeuge im Tauchverfahren

Für Prüfversuche wurden Kenaf-Hanf-Vliese im Mischverhältnis 50:50 Gew.-% mit den sechs zur Verfügung stehenden duroplastischen Matrixsystemen M1 bis M6 (s. Kap. 4.1.2) imprägniert. Alle zu untersuchenden Matrixmaterialien wurden in Dispersionsform gebracht und die Mischvliese im Tauchverfahren damit ausgerüstet. Der Polymeranteil wurde bei allen Halbzeugen reproduzierbar mit ca. 22 Gew.-% eingestellt. Das Flächengewicht aller Halbzeuge betrug ca.  $1800 \text{ g/m}^2$ .

Um die Homogenität der Verteilung der Matrix im Vlies zu analysieren, wurden die mit der ausgewählten Matrix imprägnierten Vliese unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Die REM-Aufnahmen zeigen, dass durch die Imprägnierung im Tauchverfahren eine sehr gleichmäßige Verteilung der Matrix auf die Fasern im Halbzeug erreicht wird und dass die in kleine Teilchen dispergierten Matrixpartikel sehr homogen und gleichmäßig zwischen den Fasern verteilt vorliegen (Bild 4.7). Auf den mikroskopischen Aufnahmen kann ebenfalls beobachtet werden, dass die Matrixpartikel sehr gut an den Fasern haften. Dies deutet schon im Halbzeug auf die gute Faser-Matrix-Haftung beider Komponenten hin.



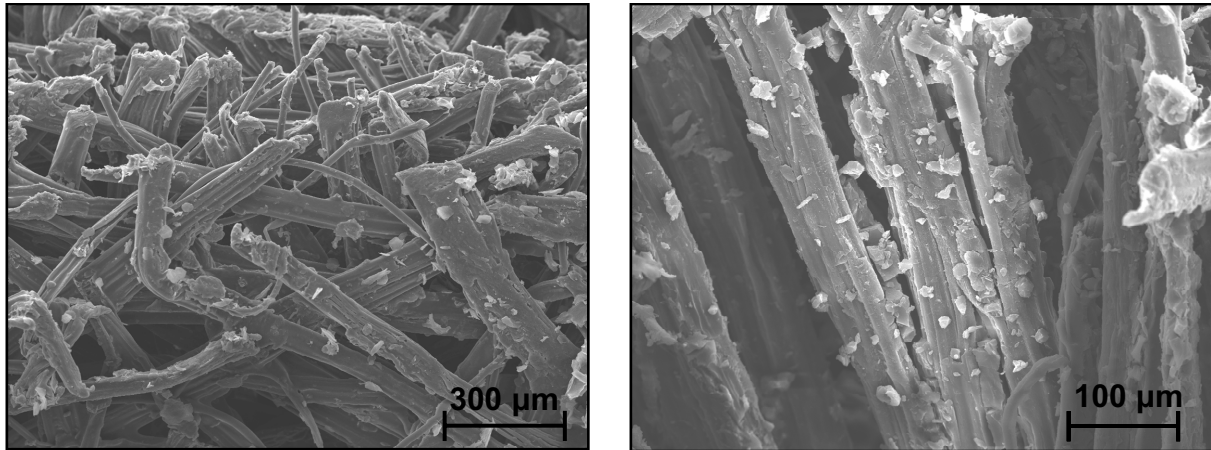


Bild 4.7: REM Aufnahmen des Halbzeugs (Mischvlies aus Hanf- und Kenaffasern mit einem Matrixanteil von ca. 22 %) mit zwischen den Fasern fein dispergierten Matrixpartikeln

### 4.3 Herstellung der Prüfplatten im Pressverfahren

Die Halbzeuge wurden ohne weitere Konditionierung auf einer Laborheizpresse mit einer maximalen Presskraft von 1200 kN und einer Innenfläche von 480 x 340 mm<sup>2</sup> (Bild 4.8) zu Prüfplatten verarbeitet.



Bild 4.8: Laborheizpresse

Die Halbzeugschnitte wurden in einem auf 200 °C vorgeheizten Werkzeug bei einem Flächendruck von 15 bar insgesamt 60 Sekunden gepresst. Aufgrund der Restfeuch-

te im Halbzeug musste die Kavität im Presszyklus mehrmals kurzzeitig zwischenbelüftet werden. Dabei wird die Presse auf Druck gefahren und ca. 5 bis 10 Sekunden gehalten. Danach wird das Werkzeug ca. 3 mm geöffnet, damit der entstandene Wasserdampf entweichen kann. Diese Prozedur wird in der Regel bis zu drei Mal wiederholt. Die Lüftungstakte und Haltezeiten können je nach Prozessbedingungen variiert und angepasst werden. Bild 4.9 zeigt eine schematische Darstellung des Weg- und Druckverlaufs des Pressprozesses.

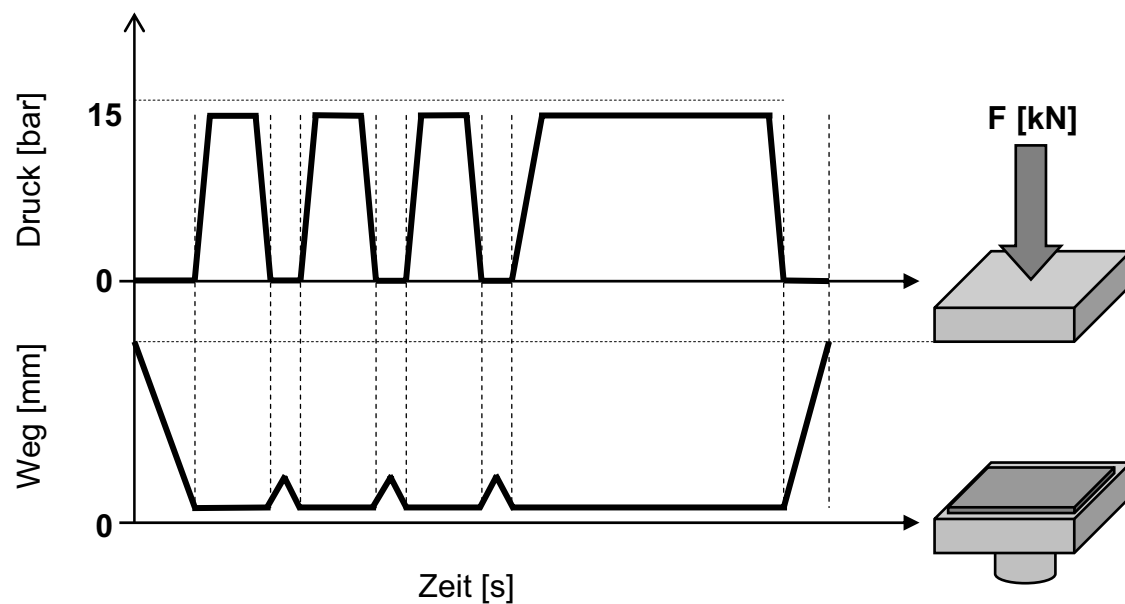


Bild 4.9: Schematische Darstellung des Prozessablaufes beim Pressverfahren

Die bereits verfestigten Platten können direkt aus dem Werkzeug entnommen werden und zeigen nach dem Abkühlen bei Raumtemperatur keinen Verzug oder Verformungen. Für das Pressverfahren bzw. Entnahme der Platten aus dem Werkzeug war der Einsatz von Trennmitteln nicht erforderlich.

Aus den Verbundplatten wurden Prüfkörper für unterschiedliche Materialcharakterisierungen entnommen (Bild 4.10).

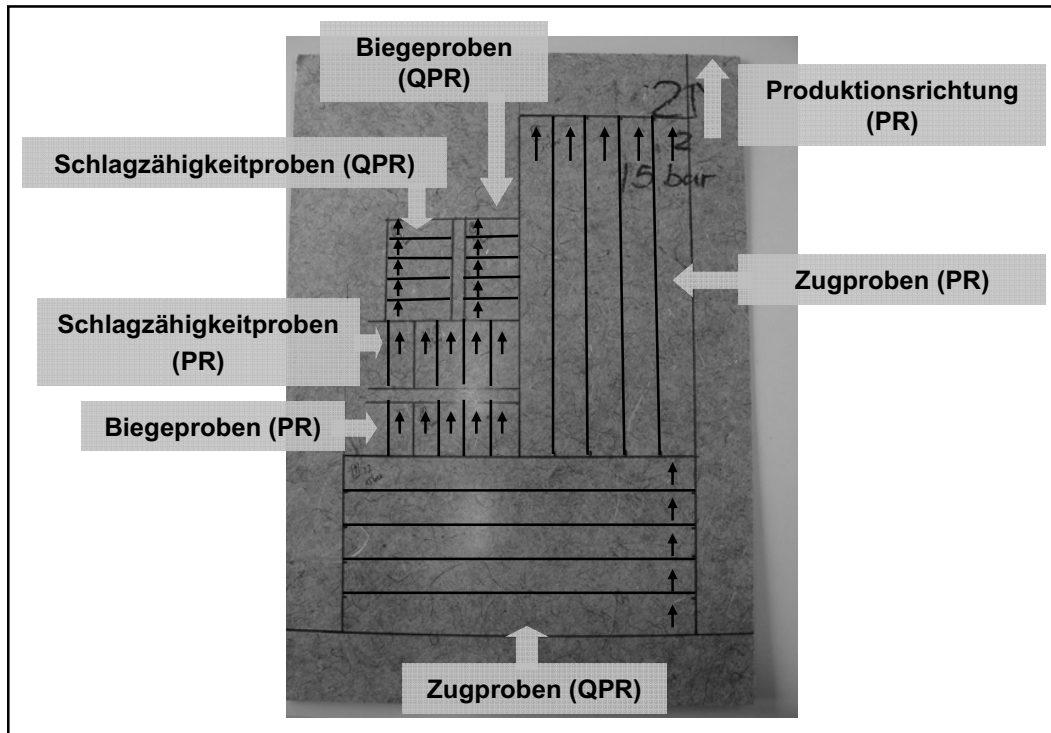


Bild 4.10: Entnahmestelle der Prüfkörper für die mechanische Charakterisierung

Die Ergebnisse werden mit den Vorgaben der Automobilhersteller verglichen, die bestimmte Mindestanforderungen an die Werkstoffe festlegen.

#### 4.4 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Theoretisch sollen die Naturfasern wirt im Vlies verteilt sein und infolgedessen keine Vorzugsrichtung aufweisen. In der Praxis orientieren sich die Fasern jedoch durch ihren Lauf über die Krempel und bei der Faserlegung quer zur Produktionsrichtung. Diese Orientierung der Fasern während der Vliesherstellung verursachen richtungsabhängige mechanische Eigenschaften der Verbunde. Da die Verstärkungsfasern die mechanischen Eigenschaften des Verbunds bestimmen, sollten auch in Faserichtung höhere Festigkeiten zu erwarten sein. Aus diesem Grund werden die Verbundplatten sowohl in Produktionsrichtung als auch quer zur Produktionsrichtung auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Bei der Dokumentation der Kennwerte werden die Ergebnisse in Produktionsrichtung (PR) und quer zur Produktionsrichtung (QPR) gekennzeichnet.

Auf der lichtmikroskopischen Aufnahme einer Pressplatte (Bild 4.11) kann der hohe Anteil der Fasern im Verbund abgeschätzt werden.

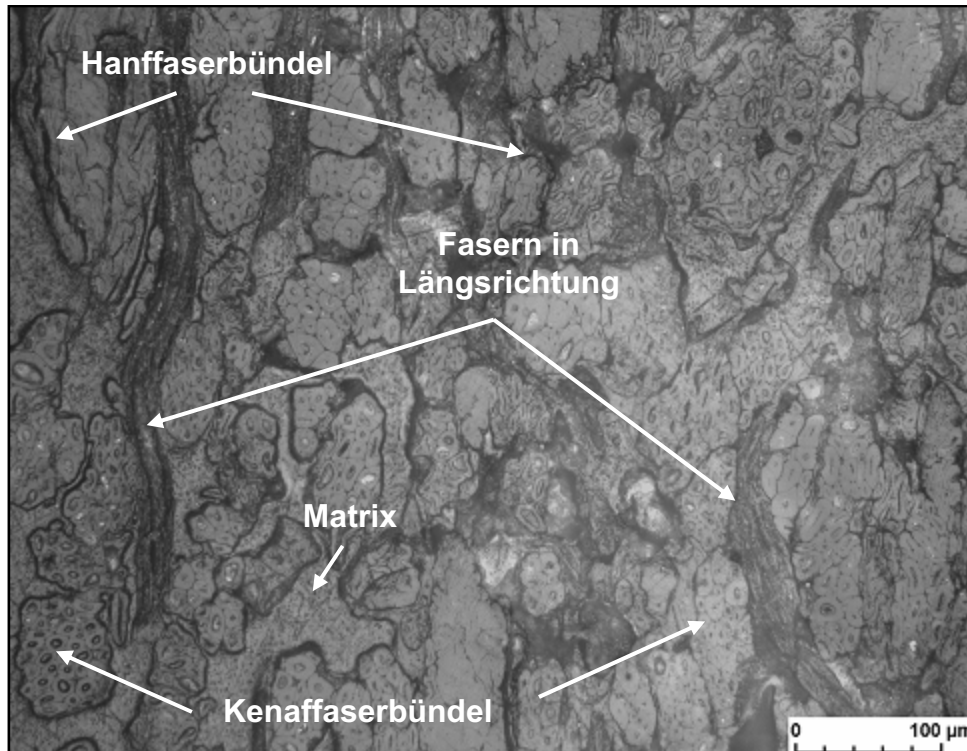


Bild 4.11: Schliffbild einer Pressplatte ( $T = 200\text{ °C}$ ,  $t = 60\text{ s}$ ,  $P = 15\text{ bar}$ )

In Bild 4.11 sind die unterschiedlichen Fasersorten und die ungleichmäßigen Faserbündelgrößen deutlich erkennbar. Es ist ebenfalls zu beobachten, dass die meisten Fasern senkrecht zur fotografierten Fläche liegen. Bei der Aufnahme handelt es sich um die Bruchstelle einer für den Zugfestigkeitstest untersuchten Probe, die senkrecht zur Produktionsrichtung entnommen wurde (Bild 4.12). Somit ist bestätigt, dass die Fasern trotz theoretischer Wirrlage im Vlies eine bevorzugte Richtung im Vlies aufweisen. Die verpressten Prüfplatten weisen in dieser Richtung die höchsten Messwerte auf.

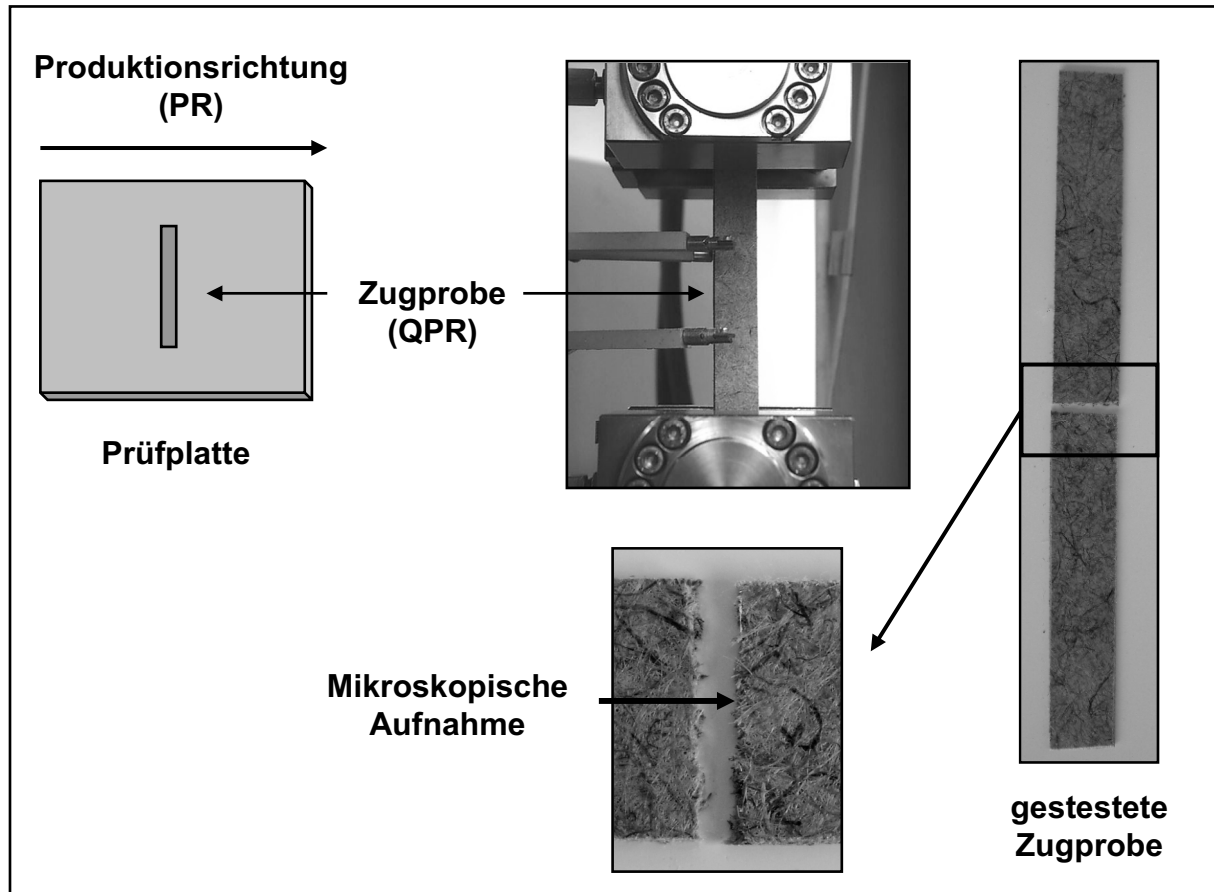


Bild 4.12: Stelle der mikroskopischen Aufnahme an der Zugprobe

Als erstes Kriterium für die Matrixauswahl sollten die mechanischen Eigenschaften der Verbunde bestimmt werden. Dazu wurden Zug-, Dreipunkt-Biege- und Schlagzähigkeitsversuche bei Raumtemperatur durchgeführt. Die einzelnen Normen und die zugehörigen Parameter sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1: Mechanische Prüfungen, Normenübersicht

Mechanische Prüfung	Norm	Probengeometrie	Parameter
Zugversuch	DIN EN ISO 527-4	Probekörper Typ 2	Prüfgeschwindigkeit: 2 mm/min
Biegeversuch	DIN EN ISO 14125	Werkstoffklasse II	Prüfgeschwindigkeit: 2 mm/min
Schlagzähigkeit (Charpy)	DIN EN ISO 179-1	Probekörper Typ 2	Arbeitsvermögen: 4J

Bei den Zugproben handelt es sich um rechteckige Prüflinge ohne Krafteinleitungselemente, die eine einheitliche Geometrie von 250 x 25 mm unabhängig von der Probendicke besitzen. Der Anfangsabstand zwischen den Klemmen beträgt 150 mm und die Messlänge ( $L_0$ ) 50 mm. Dagegen wird die Probengeometrie beim Biege- und Schlagzähigkeitstest durch die Dicke ( $h$ ) der Proben bestimmt (Bild 4.13). Die Stützweite ( $l_v$ ) beim Prüfen wird ebenfalls auf die Dicke der Proben bezogen.

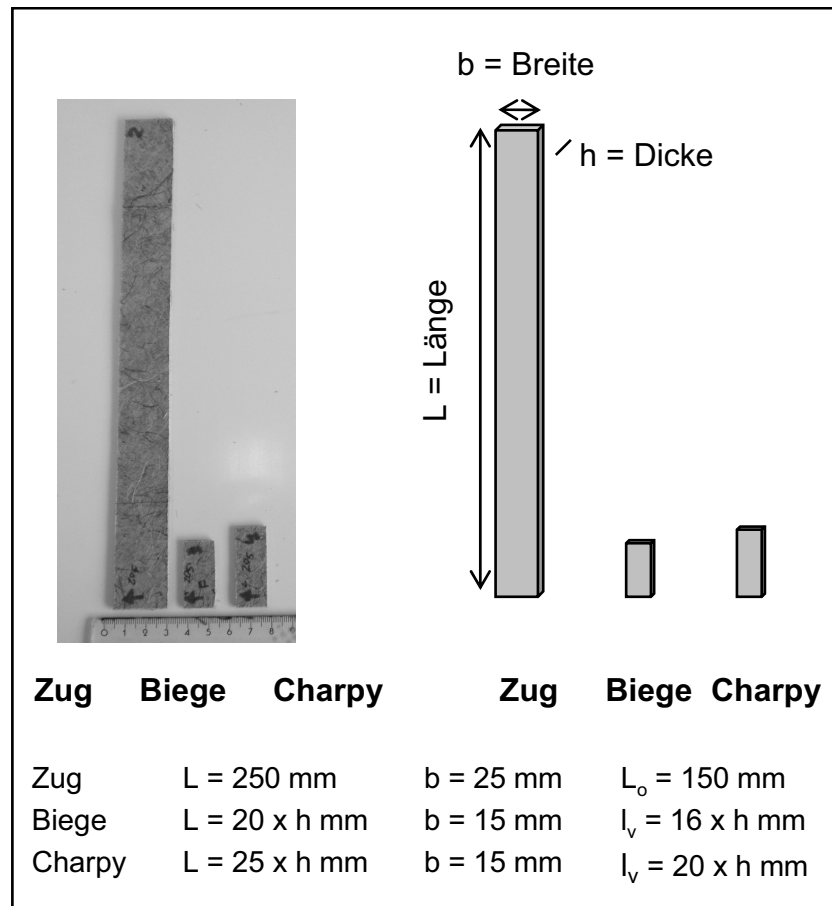


Bild 4.13: Probengeometrie für den Zug-, Biege- und Schlagzähigkeitstest

Die Prüfergebnisse der mechanischen Untersuchungen zeigen entgegengesetzten Tendenzen der quasi-statischen (Bild 4.14 und Bild 4.15) und der dynamischen Belastung (Bild 4.16). Bei M2 z.B. sind Zug- und Biegefestigkeit bei quasi-statischer Belastung im Vergleich zu den anderen Materialien hoch, die Schlagzähigkeit bei dynamischer Belastung jedoch gering.

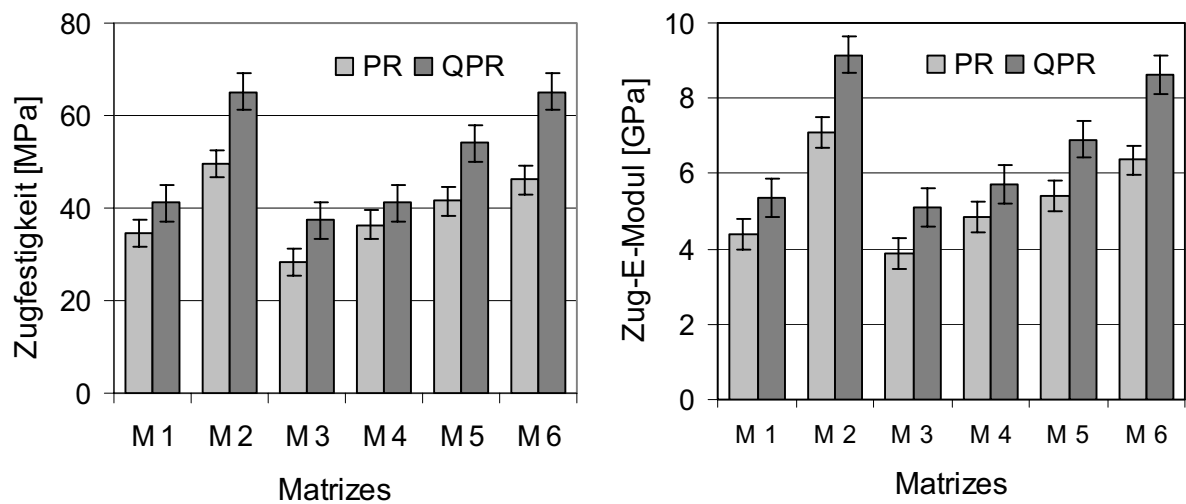


Bild 4.14: Ergebnisse der Zugfestigkeitsprüfung in Abhängigkeit der eingesetzten Matrixsysteme M1 bis M6 (T = 200 °C, t = 60 s, P = 15 bar)

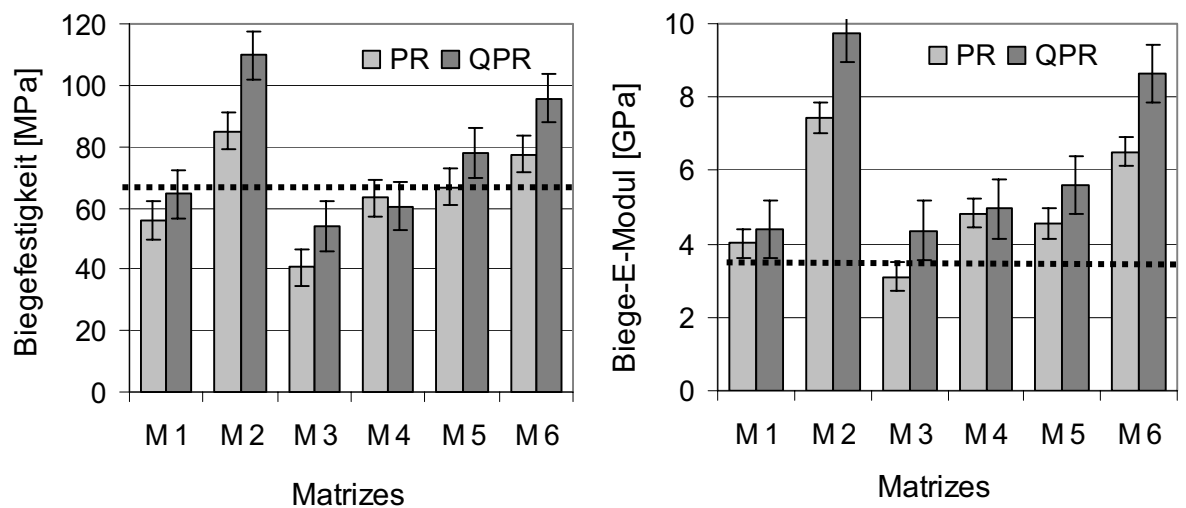


Bild 4.15: Ergebnisse der Biegeversuche (T = 200 °C, t = 60 s, P = 15 bar) (im Diagramm eingetragener Mindestwert gemäß Liefervorschrift für Pressverformte Faserstoffe DBL 5768 der DaimlerChrysler AG)

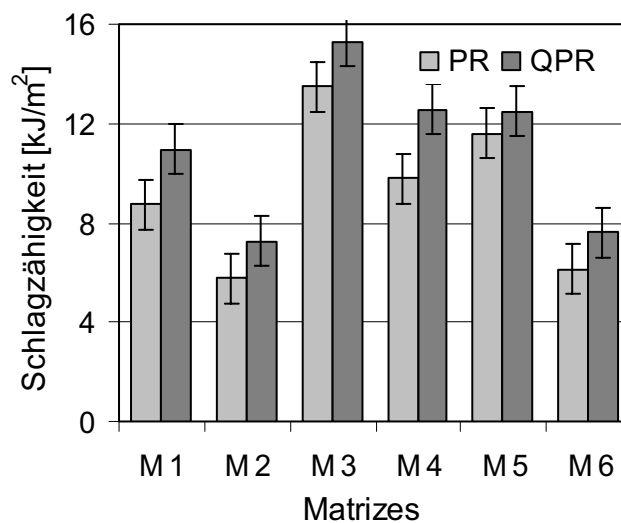


Bild 4.16: Ergebnisse der Schlagzähigkeitsprüfung in Abhängigkeit der eingesetzten Matrixsysteme M1 bis M6 ( $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t = 60 \text{ s}$ ,  $P = 15 \text{ bar}$ )

Die Bruchflächenanalyse der Verbunde mittels REM zeigte, dass die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Verbunde durch die unterschiedliche Anbindung zwischen Fasern und den verschiedenen Matrixsystemen verursacht werden. Bei den Materialien mit den besseren Ergebnissen in den Zug- und Biegeversuchen ist eine sehr gute Faser-Matrix-Haftung zu beobachten die zu einem Fibrillieren der Fasern führt (Bild 4.17 links). Bei schlechterer Faser-Matrix-Haftung ist dagegen an der Bruchstelle des Verbundes eine glatte Faseroberfläche zu sehen (Bild 4.17 rechts).

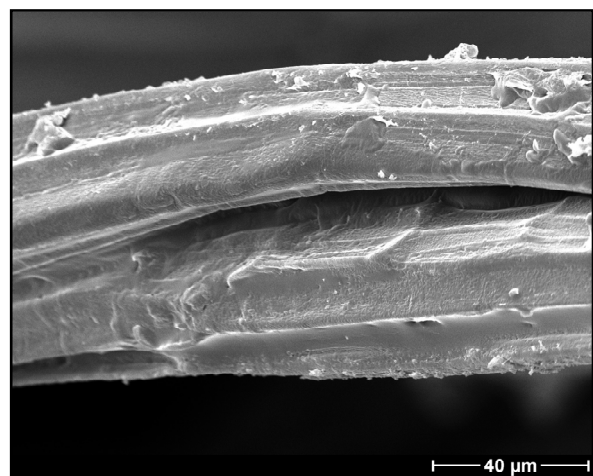
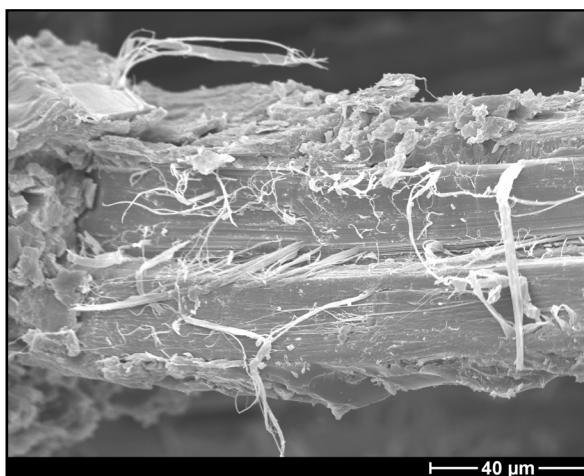


Bild 4.17: Faser nach dem Zugversuch bei guter (links) und schlechter (rechts) Faser-Matrix-Haftung



Durch die schlechte Anbindung kann die Matrix beim Bruch über die Oberfläche der Fasern gleiten ohne die Faserstruktur zu schädigen (anzugreifen).

Bei den Materialien mit guter Faser-Matrix-Haftung ist allgemein ein eher sprödes Bruchverhalten zu beobachten. Hingegen zeigen die Proben mit der geringeren Faser-Matrix-Haftung ein komplexes Bruchbild mit energieverzehrendem Faserauszug (Bild 4.18). Bei Schlagbeanspruchung zeigen diese Materialien keinen glatten Bruch sondern ein Auffächern.

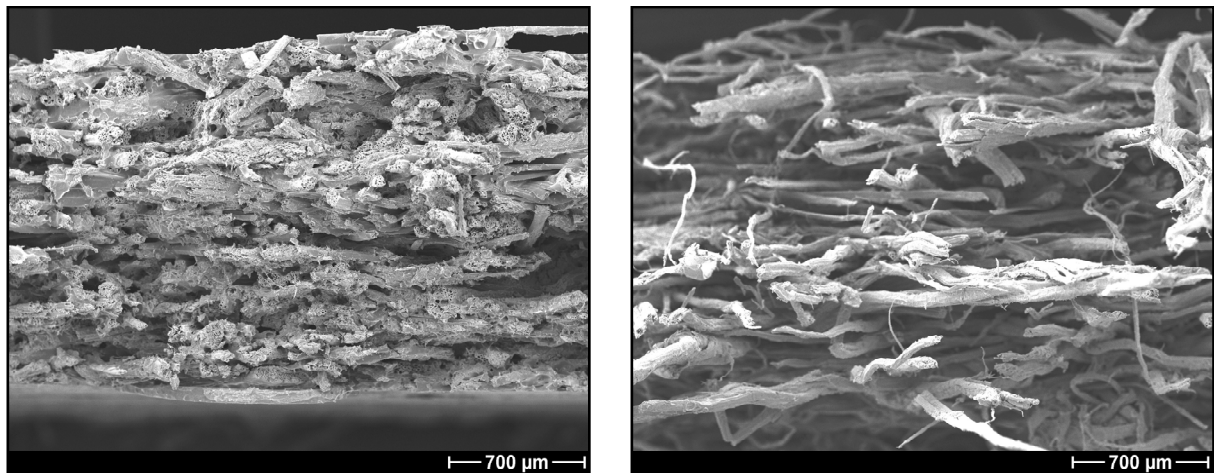


Bild 4.18: Bruchbild einer Probe nach dem Zugversuch mit guter (links) und schlechter (rechts) Faser-Matrix-Haftung

Bei allen untersuchten Materialkombinationen zeigt sich trotz der geringen Matrixmenge eine sehr gute Imprägnierung der einzelnen Fasern in den Faserbündeln mit dem Matrixmaterial (Bild 4.19).

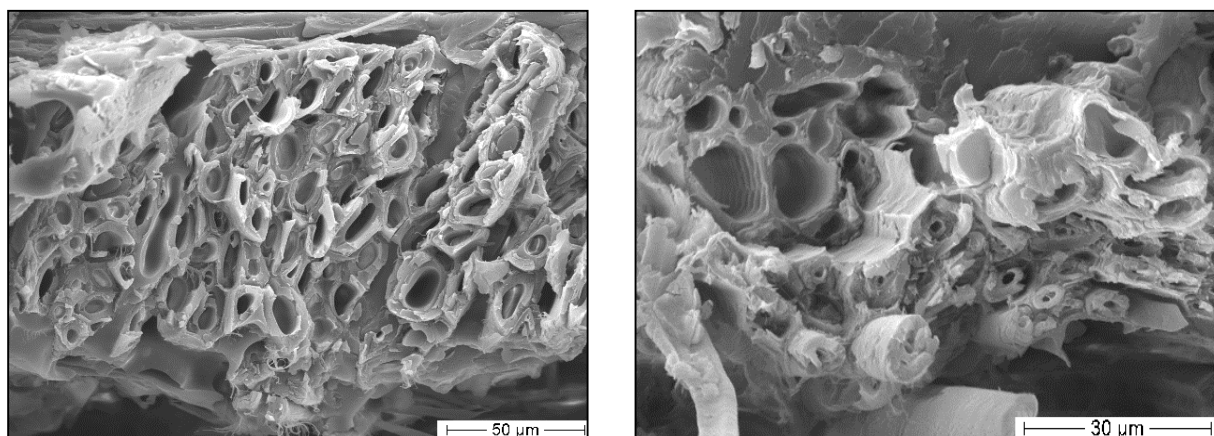


Bild 4.19: Beispiele für die gute Imprägnierung der Fasern mit dem Matrixmaterial bei guter (links) und schlechter (rechts) Faser-Matrix-Haftung

Bei den Verbunden mit einer guten Faser-Matrix-Haftung kann ein glatter Bruch ohne Faserauszug beobachtet werden, bei der schlechten Faser-Matrix-Haftung kann sowohl die einzelnen ausgezogenen Fasern, als auch die Löcher, welche die herausgezogenen Fasern in der Matrix hinterlassen haben, deutlich erkannt werden.

#### **4.5 Zusammenfassung und weitere Vorgehensweise**

Die erfolgreiche Applizierung der Matrix auf die NF-Vliese wurde durch das in der Textilindustrie weit verbreitete Tauchverfahren, bei der die Matrix in Dispersionsform vorliegt, erreicht. Mehrere Bindemittel mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen verschiedener Hersteller wurden untersucht, um der Frage der Umsetzbarkeit des Applizierungsverfahrens mit verschiedenen Polymersystemen nachzugehen. In allen Fällen konnten Matrixanteile von ca. 22 Gew.-% reproduzierbar eingestellt werden. Beim Imprägnierungsverfahren verteilt sich die Matrix in kleinen Partikeln zwischen den Fasern, so dass beim Pressverfahren eine sehr gleichmäßige Verteilung der Matrix und Konsolidierung des Bauteils trotz des geringen Matrixanteils erreicht wird. Die Applizierung des Polymers auf die Vliese und die Verarbeitung zu Prüfplatten im Formpressverfahren konnten erfolgreich für alle untersuchten Systeme umgesetzt werden. Die breite Einsatzmöglichkeit des Applizierungsverfahrens konnte damit bestätigt werden.

Die Matrizes M2 und M6 ergaben nicht nur bei den mechanischen Kennwerten, sondern auch bei der Verarbeitung zu Prüfplatten die besten Ergebnisse. Bei diesen zwei Systemen handelt es sich um Modifikationen derselben Matrix (s. Kap. 4.1.2). Diese besteht aus zwei in Wasser gelösten Komponenten, die erst ab Temperaturen über 130 °C zu einem Polyester reagieren. Die Lösungen und Dispersionen können mit beliebigen Mengen Wasser verdünnt werden, was sehr vorteilhaft für die Applizierung der Matrix auf die Vliese ist. Das System weist vor der Aushärtung ein thermoplastisches Verhalten auf. Dies macht die Halbzeuge lagerstabil und sie müssen nicht direkt nach der Applizierung des Polymersystems verarbeitet werden. Das System enthält kein Formaldehyd oder Phenol und bei der Härtingsreaktion (Polykondensation) entstehen nur Wassermoleküle. Außerdem wird kein Trennmittel benötigt, um die ausgehärteten Bauteile aus dem heißen Werkzeug zu entnehmen.

Mit dem ausgewählten Matrixsystem werden weitere Versuche durchgeführt. Der Pressprozess soll im Bezug auf die drei Pressparameter Verarbeitungstemperatur,

Pressdruck und Presszeit optimiert werden. Weiterhin werden Prüfplatten zur mechanischen Charakterisierung hergestellt. Die Ergebnisse werden mit den Anforderungen und Grenzwerten der Automobilindustrie, u.a. bzgl. Biegefestigkeit, Biege-E-Modul, Schlagzähigkeit, Wasseraufnahme, Emissions- oder Geruchswerten, verglichen.



## **5 Einfluss der Pressparameter auf die Verbundeigenschaften**

### **5.1 Verarbeitungsparameter Temperatur, Zeit und Pressdruck**

Neben der Zusammensetzung der Halbzeuge spielen die Verarbeitungsparameter Temperatur, Zeit und Pressdruck eine entscheidende Rolle bei der Herstellung und Qualität von Bauteilen aus naturfaserverstärkten Kunststoffen.

Höhere Temperaturen führen zu einer schnelleren Aushärtungsreaktion der Matrix und dadurch zu einer Reduzierung der Taktzeiten beim Pressen. Bei der Festlegung der Verarbeitungstemperatur muss jedoch die thermische Instabilität der Naturfasern berücksichtigt werden. Bei höheren Temperaturen können Naturfasern thermisch degradieren (Lignine ab ca. 220 °C), weshalb bei der Verarbeitung solcher Materialien möglichst geringe Temperaturen aufgebracht werden sollten.

Der Pressdruck kann die Verbundeigenschaften stark beeinflussen. Sind die isolierenden Eigenschaften der Verbunde (akustische Dämpfung, Wärmedämmung) von großer Bedeutung, wird in der Regel bei niedrigem Druck gepresst. Stehen hingegen mechanische Eigenschaften im Vordergrund, so kann ein höherer Verarbeitungsdruck gewählt werden. Wird jedoch die Presskraft mit dem Ziel der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften zu stark erhöht, so besteht zunehmend die Gefahr der Schädigung der Faserstruktur [110], wodurch die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflusst würde. Demzufolge muss der Druck auf die Erfordernisse der Endanwendung des Bauteils angepasst werden.

Kurze Zykluszeiten spielen bei der Verarbeitung eine entscheidende Rolle, da lange Presszeiten mit hohen Energie- und Zeitkosten verbunden sind. Aufgrund der Restfeuchte im Verbund führt die Reduzierung der Presszeit bei der Verarbeitung zu Blasen an der Oberfläche der Bauteile. Deshalb ist eine Reduzierung der Presszeit unter normalen Pressbedingungen nicht möglich. Mit dem Einsatz der Vakuumtechnologie beim Pressverfahren könnten die Presszeiten und somit die Herstellungskosten deutlich reduziert werden.

## 5.2 Verarbeitungstemperatur

Die Verarbeitungstemperatur beim Pressverfahren wird durch die Vernetzungstemperatur der Matrix und im oberen Bereich durch die thermische Beständigkeit der Naturfasern bestimmt. Die Aushärtung der Matrix beginnt ab einer Temperatur von ca. 130 °C, wobei es im Bereich von ca. 180 bis 220 °C zu einer schnellen Aushärtungsreaktion kommt. Da Verarbeitungstemperaturen von ca. 200 °C kritisch für die Verarbeitung von Naturfasern sein können, muss ein genauer Temperaturbereich ermittelt werden.

### 5.2.1 Thermisches Verhalten der Naturfasern

Um das thermische Verhalten der Naturfasern zu bestimmen, wurde eine thermogravimetrische Analyse (TGA) nach DIN 51006 durchgeführt. Mit Hilfe der Thermogravimetrie wird die Masse bzw. Masseänderung einer Probe in Abhängigkeit von der Temperatur oder Zeit kontinuierlich gemessen. Masseänderungen treten bei Verdampfung, Zersetzung oder chemischen Reaktionen der Probe auf. Die Masseänderung wird im Diagramm entweder absolut in mg oder relativ in % bezogen auf die Ausgangsmasse gegen die Temperatur oder die Zeit aufgetragen. Die Masseänderung (M) in % ergibt sich aus der Ausgangsmasse ( $m_{ini}$ ) und der Endmasse ( $m_{fin}$ ) nach folgender Gleichung:

$$M [\%] = \frac{m_{ini} - m_{fin}}{m_{ini}} \times 100 \quad (5.1)$$

Die thermogravimetrische Analyse kann sowohl unter kontinuierlicher Heizrate als auch unter isothermen Bedingungen durchgeführt werden. Durch eine TGA Analyse kann die Degradationstemperatur der Fasern bestimmt werden. Diese Temperatur sollte bei der Verarbeitung von naturfasernverstärkten Kunststoffen nicht überschritten werden.

#### 5.2.1.1 Thermogravimetrischen Analyse

Hanf- und Kenaffasern wurden bis zu einer Temperatur von 600 °C mit einer Heizrate von 20 K/min analysiert. Bild 5.1 zeigt die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse bei Hanf- und Kenaffasern.

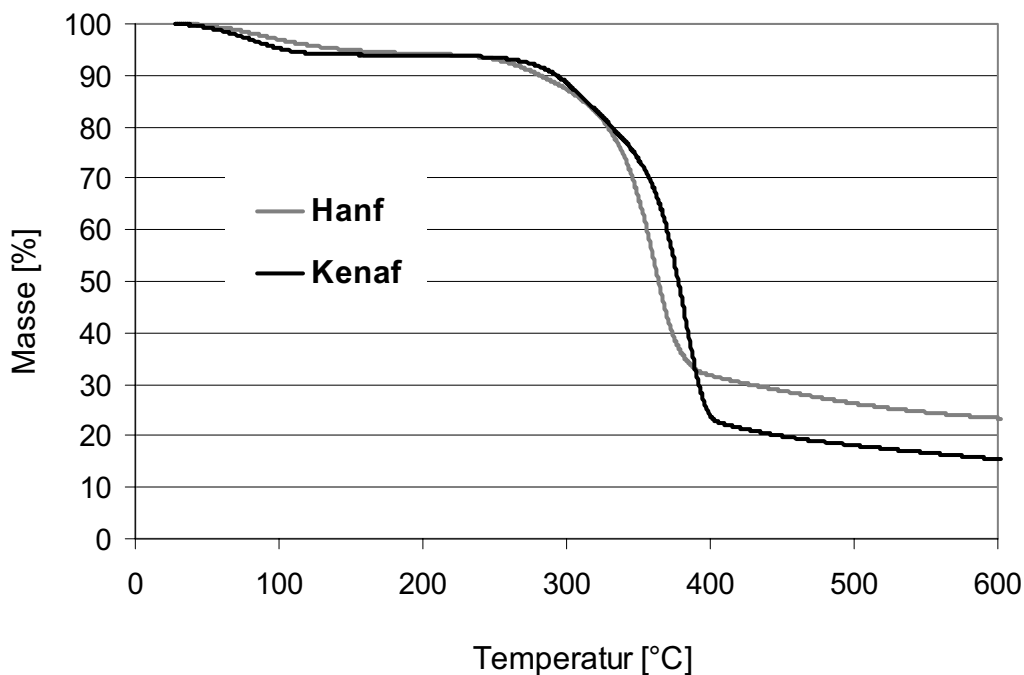


Bild 5.1: Thermogravimetrische Analyse an Hanf- und Kenaffasern

Beide Faserarten zeigen quantitativ vergleichbare Reaktionen. Ein mehrstufiger Masseverlust der Fasern verursacht überlagernde Masseänderungen auf die TGA-Kurve. Dadurch liegen keine Kurvenabschnitte mit konstanter Masse vor, wodurch die Analyse der TGA-Kurven erschwert wird (Bild 5.2). Die Tangenten der einzelnen Stufen zusammen mit den Anfangs- und Endbasislinien bzw. des konstanten Masseänderungsverlaufs zwischen zwei Reaktionen bestimmen die Anfangs- und Endtemperatur jeder Reaktion. Die Anfangs- und Endbasislinien der TGA-Kurve sowie der konstante Masseänderungsverlauf nach der ersten Stufe (Dehydratation der Fasern) können deutlich erkannt werden, aber die Stufen der nächsten einzelnen Reaktionen sind aufgrund dicht aufeinanderfolgender Masseänderungen schwer voneinander zu unterscheiden und sowohl die Endtemperatur der zweiten Reaktion (Degradation der Lignine) als auch die Anfangstemperatur der dritten Reaktion (Degradation der Cellulose) können damit nicht bestimmt werden.

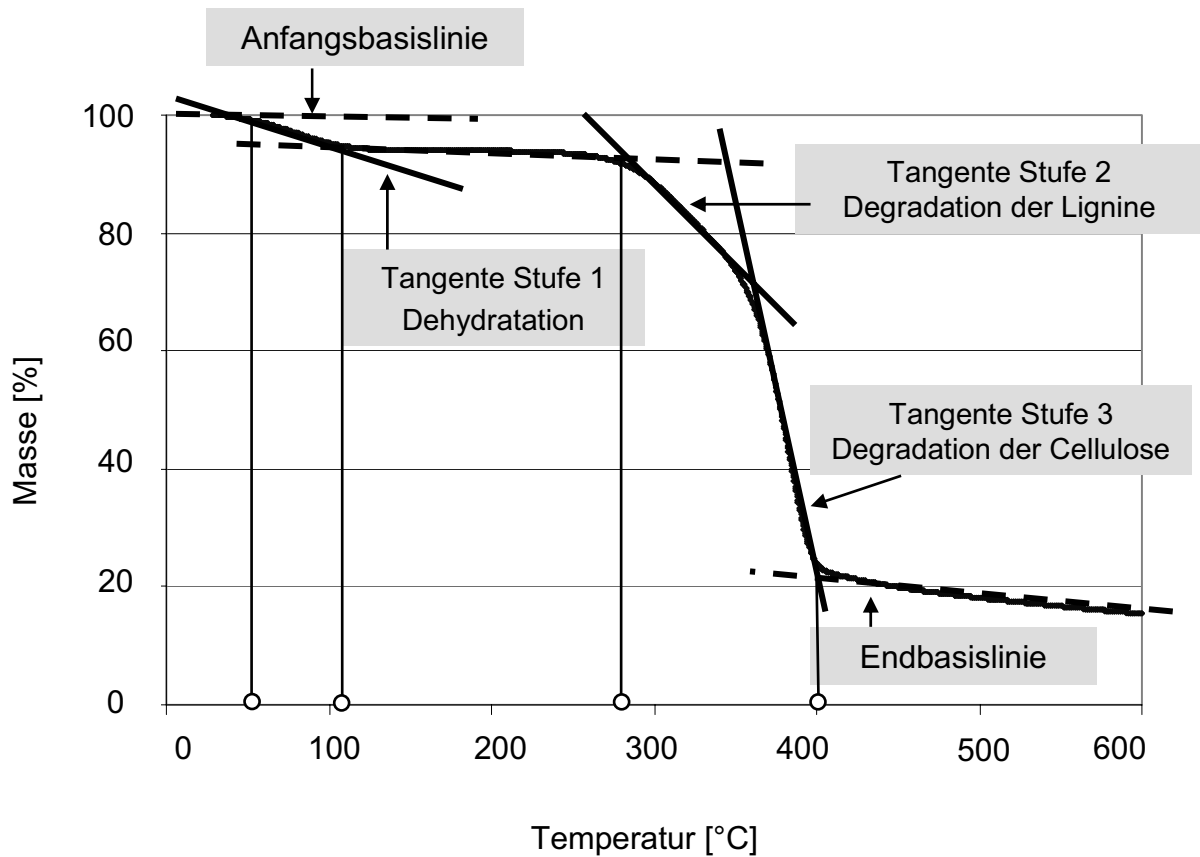


Bild 5.2: Auswertung der mehrstufigen TGA-Kurve (Kenaffaser)

Hilfreich für die Analyse ist die Darstellung der ersten Ableitung des Messsignals nach der Temperatur  $d(TG)/dT$ , die als differenzierte thermogravimetrische Kurve (DTG) bezeichnet wird. Die DTG-Kurve lässt den Kurvenverlauf besser interpretieren, da auf dieser Kurve sowohl die Anfangs- und Endtemperaturen der unterschiedlichen Reaktionen als auch der Zeitpunkt des maximalen Umsatzes besser zu erkennen sind (Bild 5.3).



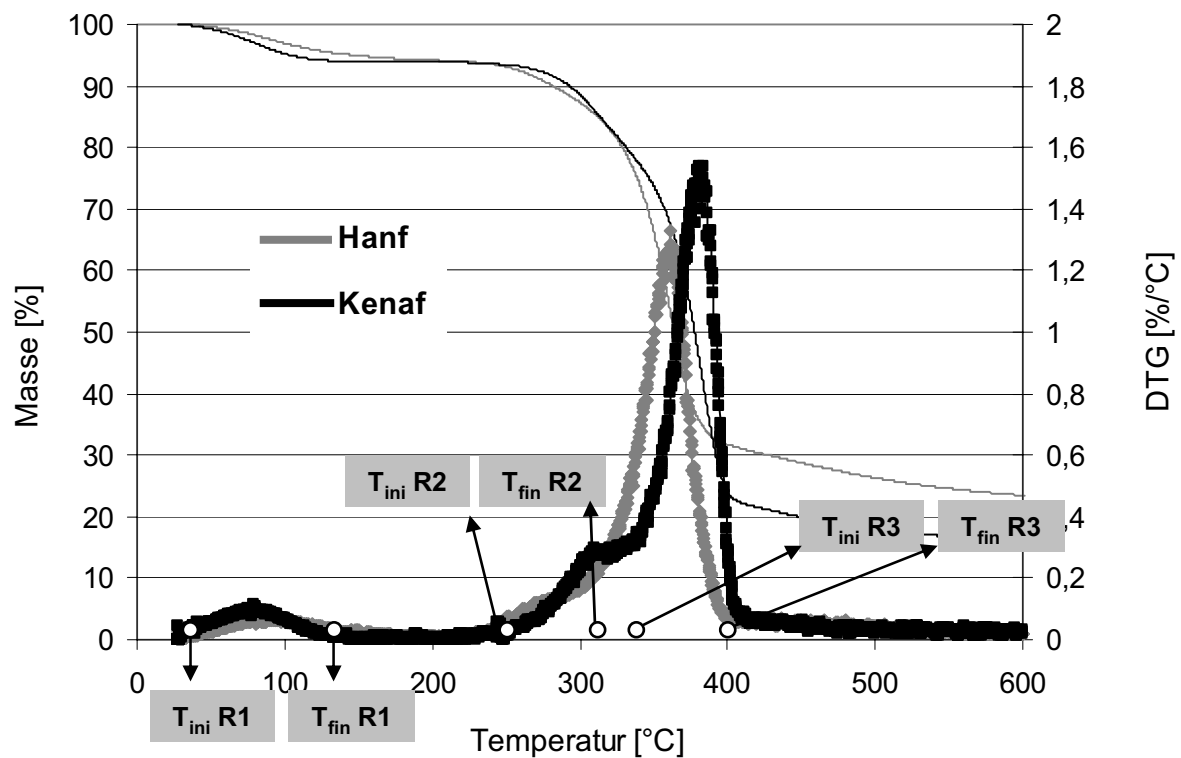


Bild 5.3: Auswertung der thermogravimetrischen Analyse der Hanf- und Kenafasern mit Hilfe des DTG-Signals

Wie aus der Grafik ersichtlich fangen die getesteten Fasern schon ab 40 °C ( $T_{ini} R1$ ) an, Gewicht zu verlieren. Diese Reaktion erreicht ihr Maximum bei ca. 80°C und die Abschlussreaktion findet bei ca. 120 °C ( $T_{fin} R1$ ) statt. Diese erste Reaktion ist auf die Dehydratation der Fasern zurückzuführen. Der Masseverlust von ca. 6 % entspricht der Wasserreprise der Fasern, die bei Kenaf- und Hanffasern zwischen 5 % und 10 % liegen. Zwischen 120 °C und ca. 240 °C tritt kein Masseverlust der Fasern auf. Ab ca. 250 °C ( $T_{ini} R2$ ) beginnt eine zweite Reaktion, die durch den thermischen Abbau der Lignine verursacht wird. Diese Reaktion überlagert sich mit dem Abbau von Cellulose, der ab ca. 350 °C ( $T_{ini} R3$ ) beginnt. Beide Fasern zeigen einen einheitlichen Abschluss der Reaktionsstufe bei ca. 400 °C ( $T_{fin} R3$ ). Die kleinen Unterschiede zwischen Hanf- und Kenaffasern (bei Hanffasern beginnt die dritte Reaktion früher) sind auf die unterschiedlichen Anteile an Hemicellulose, Pektinen, Ligninen und anderer Komponenten wie Wachsen zurückzuführen. Lampke [36] zeigt in seinen Untersuchungen, dass die in den Naturfasern enthaltenen Begleitsubstanzen für die komplexen und zeitlich früher einsetzenden Reaktionen mitverantwortlich sind. Je

stärker Pektine, Lignine, Wachse, Fette oder mineralische Substanzen entfernt wurden, umso größer ist die Annäherung an das Reaktionsverhalten der Cellulose.

Um eine Degradation der Fasern beim Pressen ausschließen zu können, sollen Kritische Temperaturen bei der Verarbeitung zwischen 150 °C und 280 °C durch die isotherme thermogravimetrische Analyse näher untersucht werden. Um neben der Temperatur auch Aussagen über die Haltezeit treffen zu können, wurde die isotherme gravimetrische Analyse über eine Dauer von zwei Stunden durchgeführt (Bild 5.4 und Bild 5.5) (der Temperaturverlauf in den ersten drei Minuten des Versuches ist auf der unteren Grafik deutlicher zu erkennen).

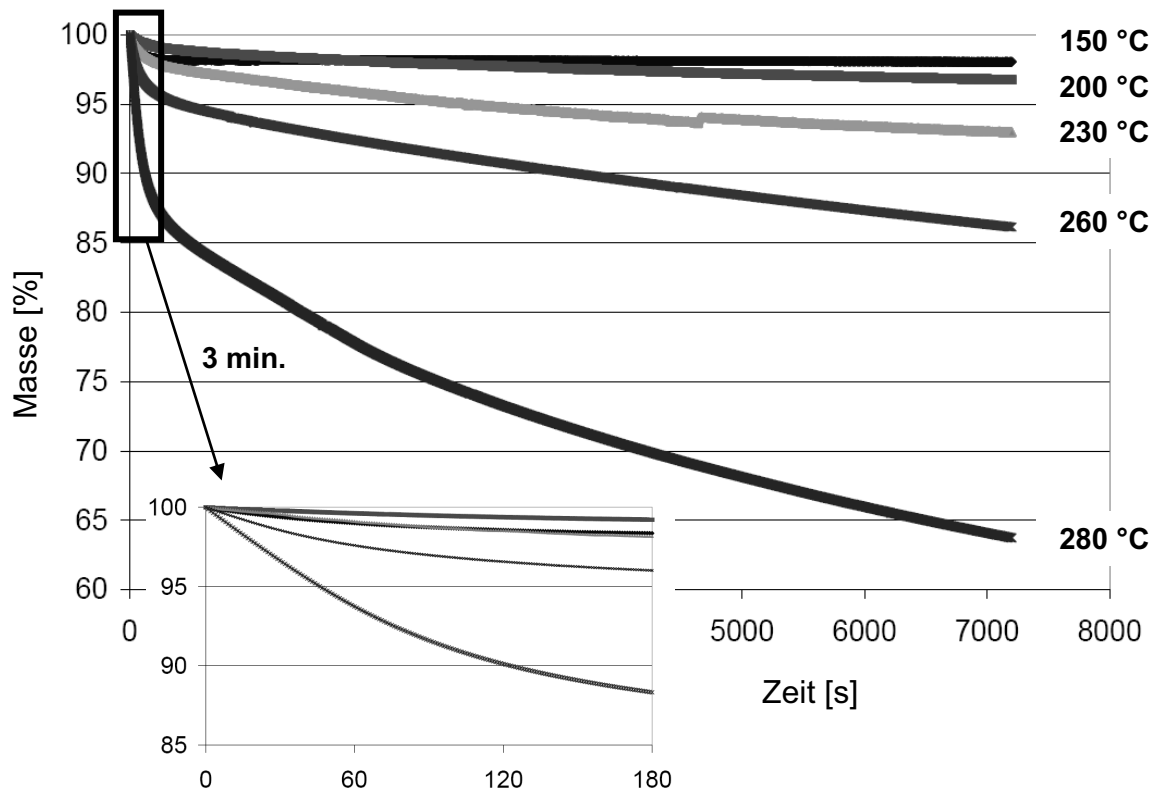


Bild 5.4: Isotherme thermogravimetrische Analyse an Hanffasern

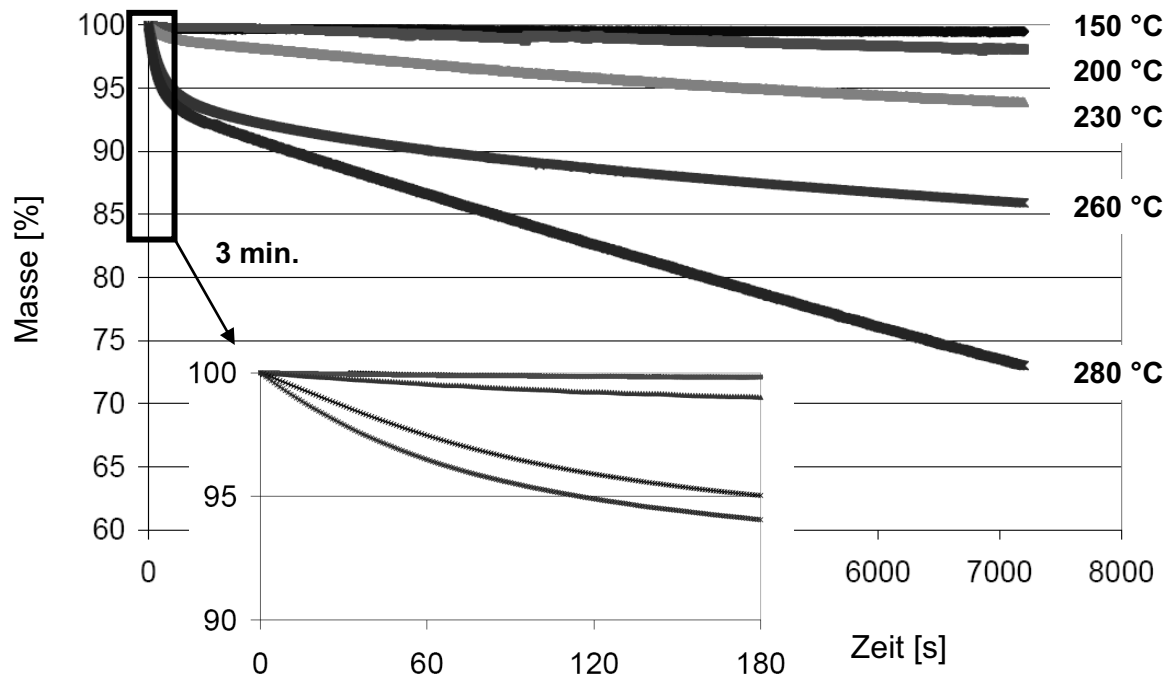


Bild 5.5: Isotherme thermogravimetrische Analyse an Kenaffasern

Aus den Grafiken ist zu erkennen, dass über den gesamten Untersuchungszeitraum Temperaturen von 150 °C bis 230 °C offenbar unbedenklich für die Verarbeitung sind (wichtig für die Verarbeitung von Naturfasern mit thermoplastischen Matrixsystemen, die längere Verarbeitungszeiten benötigen). Der Masseverlust bei diesen Temperaturen von 2 % bis 7 % ist auf den Wasserverlust durch an der Faser angebondenes (adhäsives) Wasser zurückzuführen. Bei 230 °C wird dieser Massenverlust durch das Herauslösen der chemisch gebundenen Wassermoleküle noch verstärkt.

Bei Temperaturen von 260 °C und 280 °C ist ein stärkerer Masseverlust festzustellen, der mit steigender Temperatur und Haltezeit signifikanter wird. Bei Hanffasern findet der Masseverlust früher als bei Kenaffasern statt. Dies bestätigt die Ergebnisse der TGA-Analyse, bei der die thermische Degradationreaktionen bei Hanf früher als bei Kenaf auftreten, was auf eine größere Anzahl an Begleitsubstanzen wie Pektinen oder Ligninen in der Faserstruktur von Hanf hindeutet.

Die thermische Degradation der Fasern kann zu einer Minderung der Faserzugfestigkeit und in Folge zu Einbußen in den mechanischen Eigenschaften der Verbunde führen. Wuttke [102] berichtet über Zugversuche von Flachseinzelfasern und unidi-

rektional verstärkten Verbunden in Abhängigkeit der Probentemperatur. Bei einer Temperung der Proben bei 170 °C über 10 Minuten konnte kein Festigkeitsverlust festgestellt werden, während es bei einer Temperatur von 220 °C in der gleichen Zeitspanne zu einem Festigkeitsverlust um ca. 40 % kommt. Zusätzlich kann die Faserschädigung optisch festgestellt werden, da sich die thermisch geschädigten Fasern dunkelbraun verfärben.

### 5.2.1.2 Pressversuche bei unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen

Bei der Verarbeitung im Pressverfahren werden die Halbzeuge bei konstanter Temperatur verarbeitet. Ab einer Temperatur von ca. 130 °C beginnt die Aushärtungsreaktion der Matrix, wobei höhere Temperaturen die Aushärtegeschwindigkeit erhöhen. Die Verarbeitungstemperatur wird dann durch die thermische Stabilität der Naturfasern begrenzt.

Zunächst wurden Pressversuche bei 200 °C durchgeführt (s. Kapitel 4.4). Die Ergebnisse der TGA-Analyse haben jedoch gezeigt, dass bis 230 °C keine bedeutende Gewichtsveränderung der Fasern festzustellen ist.

Übertragen auf die Pressversuche führt die Erhöhung der Verarbeitungstemperatur auf 230 °C zu einer Reduzierung der Gesamtpresszeit von 60 Sekunden auf 45 Sekunden. Die Belüftungstakte wurden für beide Versuche auf jeweils 3 Takte mit einer Haltezeit von 10 s und einem Pressdruck von 15 bar festgelegt. Nach der Entnahme der Prüfplatten aus der Presse konnte eine dunkelbraune Verfärbung der Plattenoberfläche festgestellt werden (Bild 5.6).

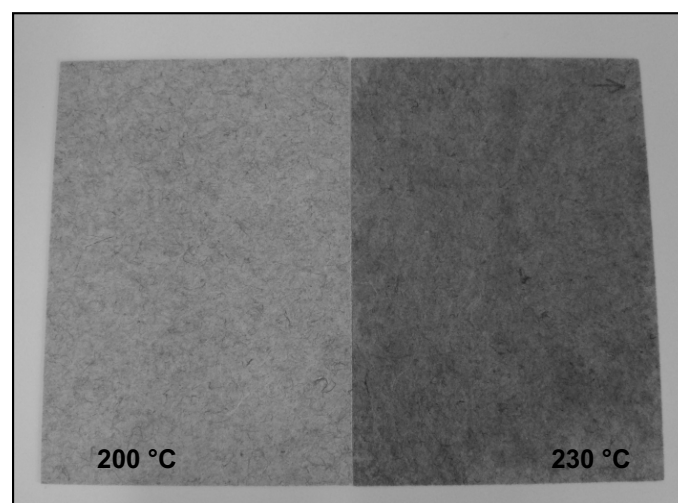


Bild 5.6: Verpresste Prüfplatten (200 und 230 °C)

Die starken Färbungen der Verbunde deuten auf die thermische Degradation der Fasern hin. Um die mechanischen Eigenschaften der durch thermische Degradation verursachten Faserschädigungen im Verbund zu analysieren, wurden Biege- und Zugfestigkeitstests durchgeführt.

Die Biege- und Zugeigenschaften (Bild 5.7 und Bild 5.8) der Verbunde zeigen, dass trotz starker Verfärbung der Oberfläche keine Einbußen in den mechanischen Eigenschaften festzustellen sind.

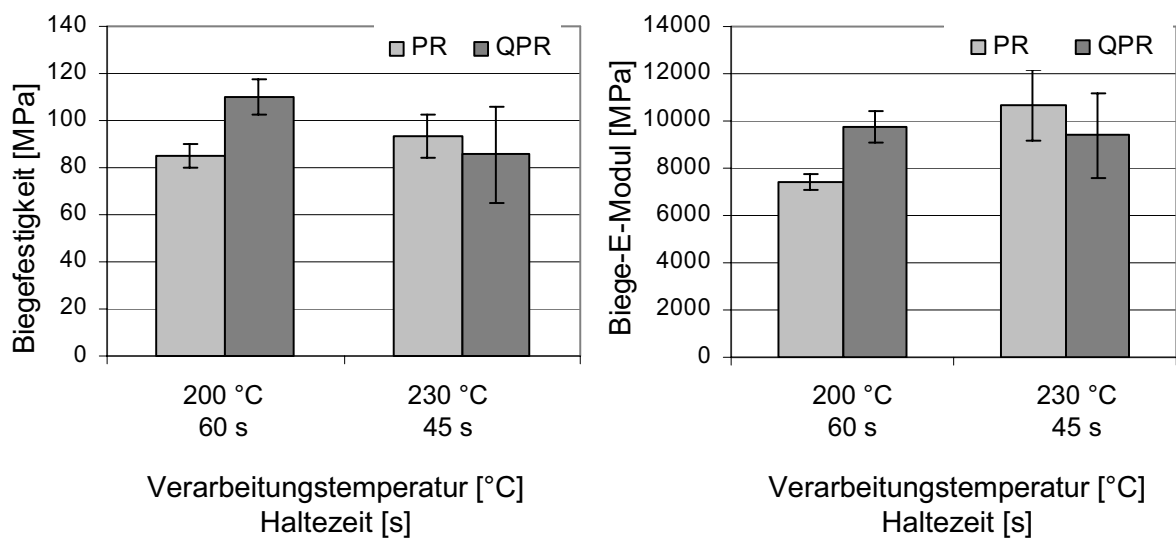


Bild 5.7: Ergebnisse der Biegefestigkeitstests bei Verarbeitungstemperaturen von 200 °C und 230 °C (P = 15 bar)

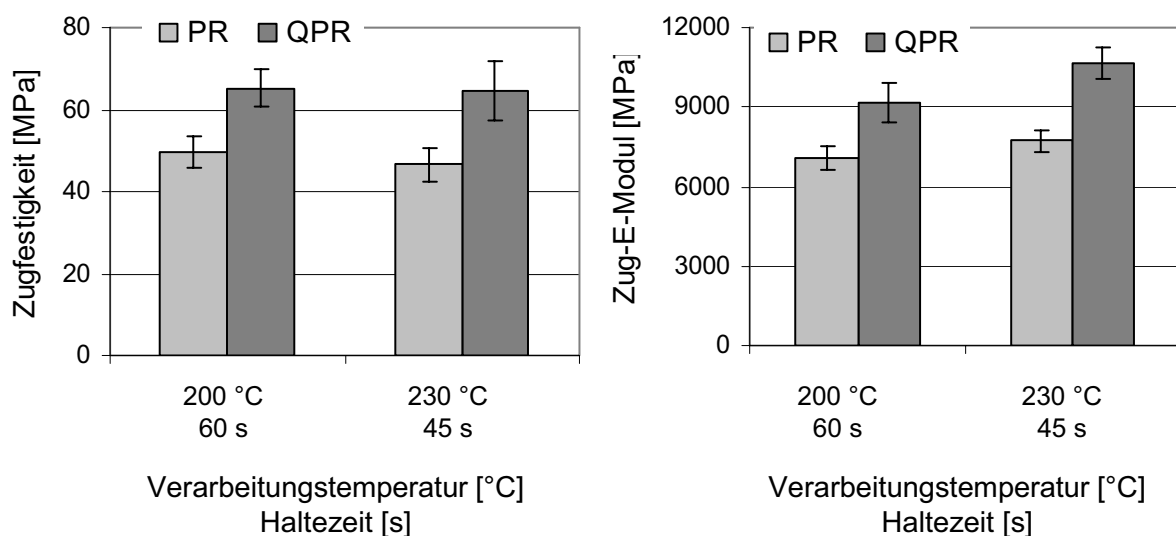


Bild 5.8: Ergebnisse der Zugfestigkeitstests bei Verarbeitungstemperaturen von 200 °C und 230 °C (P = 15 bar)

Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass höhere Temperaturen oder längere Presszeiten zu einer stärkeren Degradation der Fasern mit den entsprechenden Einbußen der Verbundeigenschaften führen. Um diese Effekte zu vermeiden, wurden weitere Pressversuche bei maximalen Werkzeugtemperaturen von 200 °C durchgeführt.

### 5.3 Pressdruck

Wie beschrieben sind Verarbeitungstemperatur und Presszeit durch das Matrixsystem bestimmt und durch die Eigenschaften der Naturfasern begrenzt. Der Einfluss des Pressdrucks auf die Verarbeitung von naturfaserverstärkten Kunststoffen ist bisher kaum untersucht worden. In vielen Veröffentlichungen wird der Pressdruck bei der Verarbeitung nicht einmal genannt. Cescutti et. al [111] berichten über den Einfluss unterschiedlicher Verpressungsdicken auf die akustischen und mechanischen Eigenschaften von naturfaserverstärkten Kunststoffen. Sie berichten, dass sich mit zunehmenden Bauteildicken die Absorptionseigenschaften der Verbunde deutlich verschlechtern, während die mechanischen Eigenschaften deutlich ansteigen. Es wird darauf hingewiesen, dass ein Grenzwert bei der Verpressung zu beachten ist, da ein Überschreiten zu Materialschädigungen führen kann. In welchem Bereich diese Grenzwerte sich bewegen können, wird jedoch nicht erwähnt. Wuzella [112] berichtet dagegen, dass eine Variation des Pressdrucks zwischen 80 und 200 bar keinen signifikanten Einfluss auf die Verbundeigenschaften zeigt. Bertram et. al [113] berichtet über einen viel niedrigeren eingesetzten Pressdruck von 30 bar bei der Verarbeitung von Naturfaserverbunde für Automobilinnenverkleidungen.

In der Literatur besteht eine große Varianz bezüglich des nötigen Pressdrucks und dessen Einfluss auf die Verarbeitung von NF-Verbunden. Bisher konnte kein allgemeiner Zusammenhang zwischen dem Verarbeitungsdruck und den Verbundeigenschaften hergestellt werden.

Um den Einfluss des Pressdrucks auf die Naturfasern und insbesondere auf die Eigenschaften des Verbunds zu analysieren, wurden die Halbzeuge auf der Laborheizpresse in einem Bereich zwischen 15 und 200 bar insgesamt 60 Sekunden verpresst. Die mechanischen und morphologischen Eigenschaften des Verbunds wurden anschließend analysiert.

### 5.3.1 Einfluss des Pressdrucks auf die mechanischen Eigenschaften

Um den Einfluss des Pressdrucks auf die mechanischen Eigenschaften zu bestimmen, wurde ein Mischvlies aus Hanf- und Kenaffasern (Verhältnis 50:50) angefertigt. Das NF-Vlies wurde anschließend mit dem ausgewählten thermisch vernetzbaren Acrylharz imprägniert (s. Kap. 4.1.2). Der Matrixanteil betrug dabei ca. 22 Gew.-%. Die Restfeuchte nach der Produktion wurde bei ca. 14 % festgelegt.

Die Laborheizpresse besitzt eine maximale Presskraft von 1200 kN und eine Innenfläche von 480 x 300 mm<sup>2</sup> (s. Kapitel 4). Bei voller Belegung der Pressfläche kann ein maximaler Pressdruck von ca. 60 bar erreicht werden. Für die Versuche mit höheren Pressdrücken mussten entsprechend kleinere Halbzeuge verwendet werden (für Pressdrücken zwischen 80 und 150 bar wurden Halbzeuge der Abmessung 400 x 200 mm<sup>2</sup>, und für Versuche mit 200 bar von 300 x 200 mm<sup>2</sup> verwendet).

Um die mechanischen Eigenschaften der Verbunde zu bestimmen, wurden Prüfplatten bei einer Werkzeugtemperatur von 200 °C 60 Sekunden verpresst. Ab einem Pressdruck von ca. 60 bar traten gelegentlich Blasen an der Oberfläche der Platten auf. Diese konnten durch Erhöhung der Belüftungszeiten und gleichzeitiger Reduzierung der Haltezeiten verhindert werden, ohne dabei die Gesamtpresszeit zu verlängern.

Dreipunkt-Biege, Zug und Schlagzähigkeitsversuche (s. Tabelle 4.1) wurden zunächst durchgeführt. Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften erfolgte an Probenkörpern aus unter gleichen Pressbedingungen hergestellten Pressplatten. Für die Bestimmung der Spannung werden die gemessenen Bruchkräfte auf die Querschnittsfläche der Proben bezogen. Somit ist die Verdichtung des Materials (Bild 5.9) durch die Erhöhung des Pressdrucks berücksichtigt.

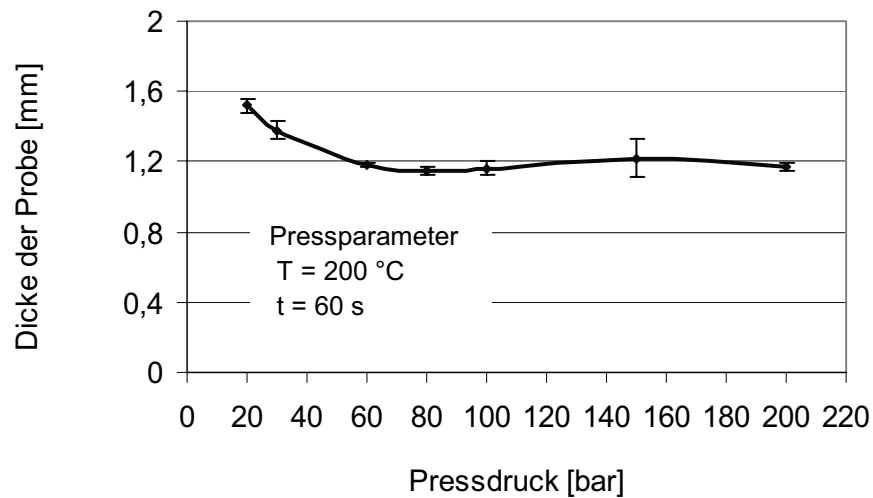


Bild 5.9: Dicke der Proben in Bezug auf den Pressdruck

Bei der Vorbereitung der Prüfkörper wurde darauf geachtet, dass die Proben aus mindestens zwei verschiedenen Prüfplatten entnommen wurden, um lokale Material oder Prozessfehler bei der Ermittlung der Verbundeigenschaften auszuschließen. (Die Ergebnisse aller Prüfungen sind in Anhang 8.5 zusammengefasst. Angegeben sind der arithmetische Mittelwert aus 10 Prüfkörpern und die Standardabweichung der jeweiligen Messwerte).

In Bild 5.10 und Bild 5.11 sind exemplarisch die Biegefestigkeit und der Biegemodul für die unterschiedlichen Pressdrücke dargestellt. Wie in den Grafiken ersichtlich, zeigen die mechanischen Eigenschaften eine deutliche Abhängigkeit von den Pressbedingungen.



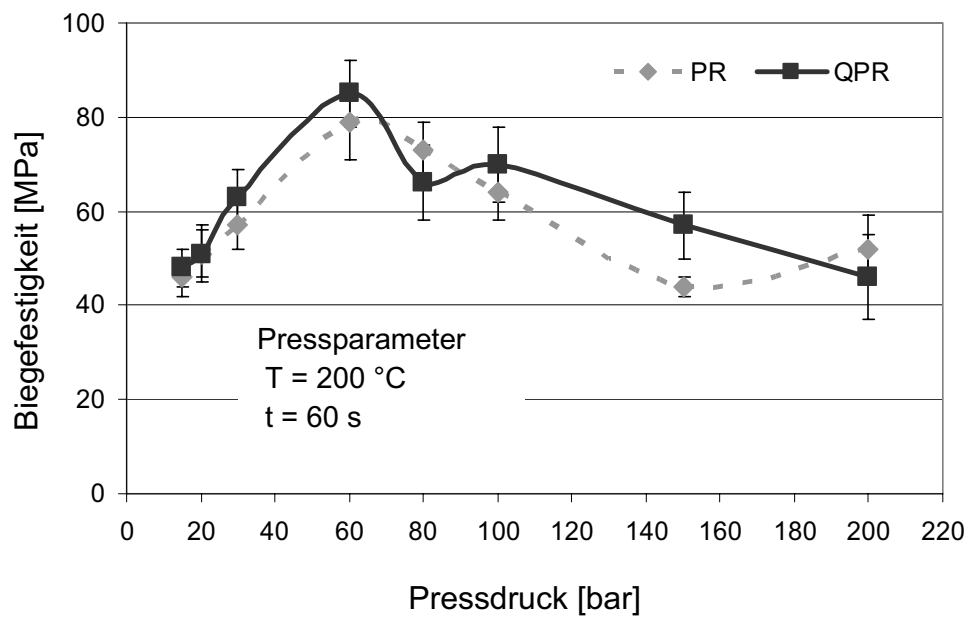


Bild 5.10: Prüfergebnisse der Biegeeigenschaften der Verbunde (Mischvlies aus Hanf- und Kenaffasern mit einem Matrixanteil von ca. 22 Gew.-%) in Bezug auf den Pressdruck

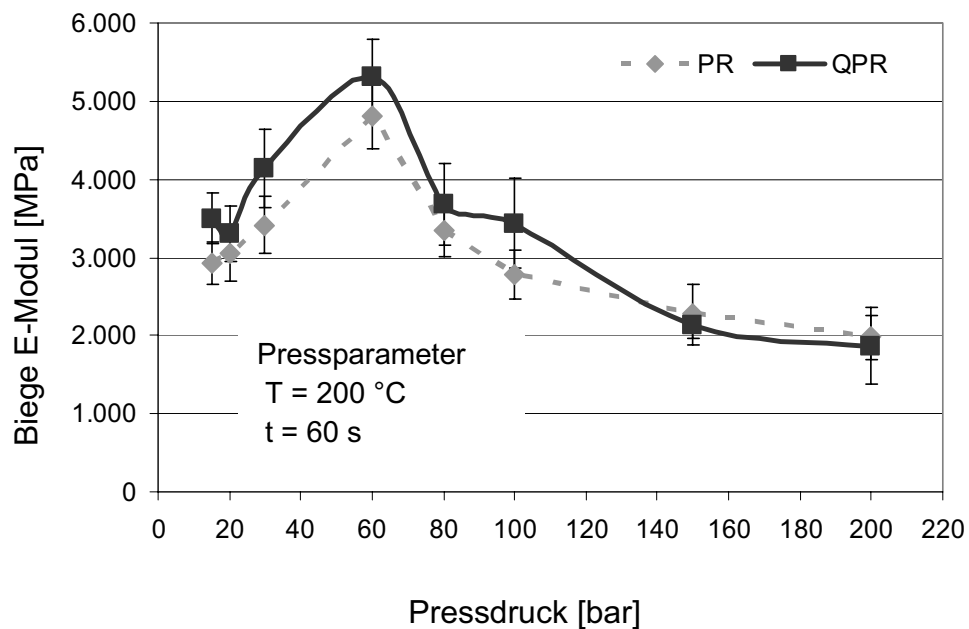


Bild 5.11: Prüfergebnisse der Biege-E-Modul der Verbunde (Mischvlies aus Hanf- und Kenaffasern mit einem Matrixanteil von ca. 22 Gew.-%) in Bezug auf den Pressdruck

Die Prüfergebnisse zeigen, dass die Biegefestigkeit und die Biegesteifigkeit zunächst mit steigendem Pressdruck ansteigen. Das Maximum wird bei einem Pressdruck von 60 bar erreicht. Die weitere Erhöhung des Drucks führt zu einem deutlichen Abfall der Messwerte. Dieselbe Tendenz ist bei den Zugeigenschaften festzustellen (Bild 5.12).

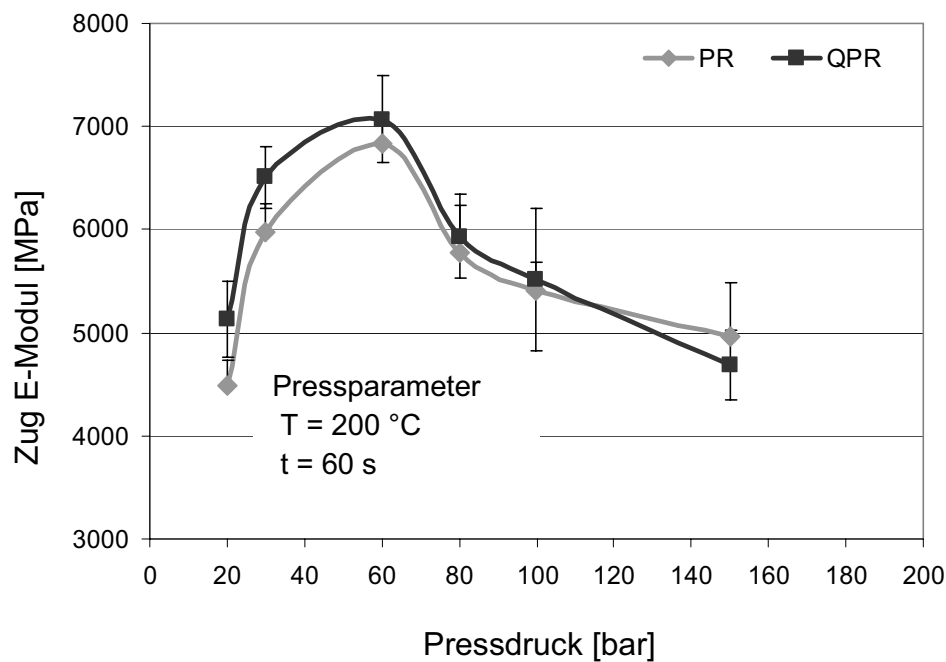


Bild 5.12: Prüfergebnisse der Zugeigenschaften der Verbunde (Mischvlies aus Hanf- und Kenaffasern mit einem Matrixanteil von ca. 22 Gew.-%) in Bezug auf den Pressdruck

Die morphologische Untersuchung der Bruchfläche der Verbunde mittels REM-Analyse lässt die guten mechanischen Eigenschaften nicht nur auf die Verteilung der Matrix im Verbund, sondern auch auf die sehr gute Faser-Matrix-Haftung zurückführen. In den nachfolgenden REM-Aufnahmen fällt die oft auftretende Faserfibrillierung bei jeder Pressdruckstufe auf (Bild 5.13), die in manchen Fällen sogar zu Faserbruch in Längsrichtung führen kann (Bild 5.14 links).

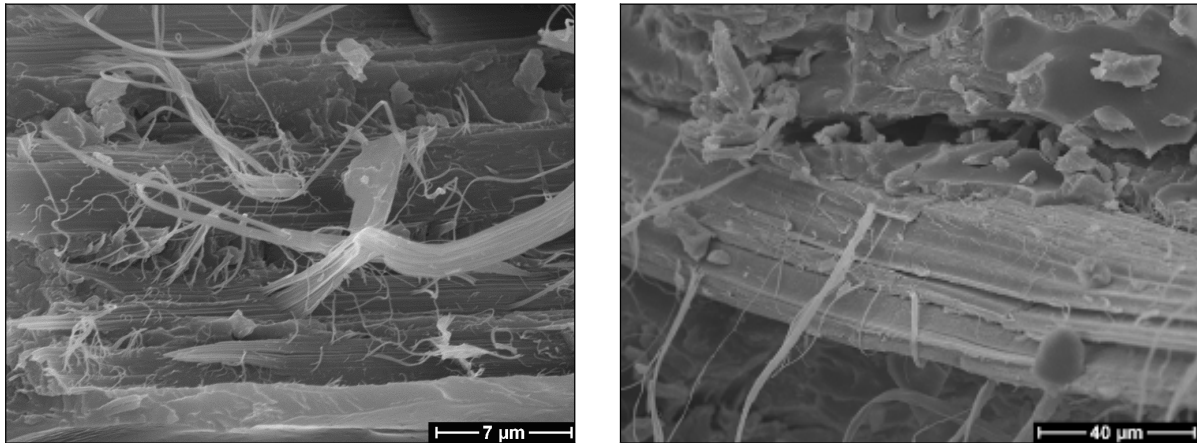


Bild 5.13: Fibrillierung der Fasern in einer Zugbruchstelle der Verbunde bei 15 bar (links) und 60 bar (rechts) Pressdruck

In Bild 5.14 (rechts) ist eine sehr gute Benetzung der Faseroberfläche durch die Matrix festzustellen, da an den Grenzflächen keine Luftspalten zu erkennen sind. Bei einer schlechten Haftung ummantelt die Matrix die Faser, ohne dass eine direkte Anbindung besteht.

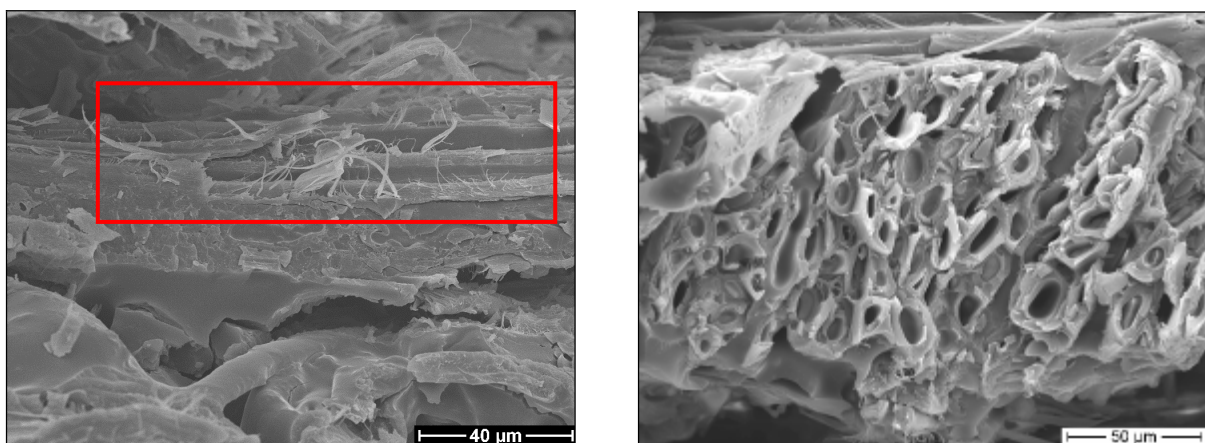


Bild 5.14: Faserbruch in Längsrichtung (links) und gute Benetzung der Fasern durch die Matrix im Verbund (rechts)

Eine Erklärung für den Abfall der mechanischen Kennwerte ab 80 bar Pressdruck ist anhand der mikroskopischen Untersuchungen deutlich zu erkennen. Bei niedrigem Druck verursacht die Steigerung des Pressdrucks eine Verdichtung des Materials (Bild 5.15). Je höher die Dichte ist, desto weniger Poren sind zu erkennen und desto größer ist die Kontaktfläche zwischen der Matrix und den Fasern, die eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften herbeiführt.

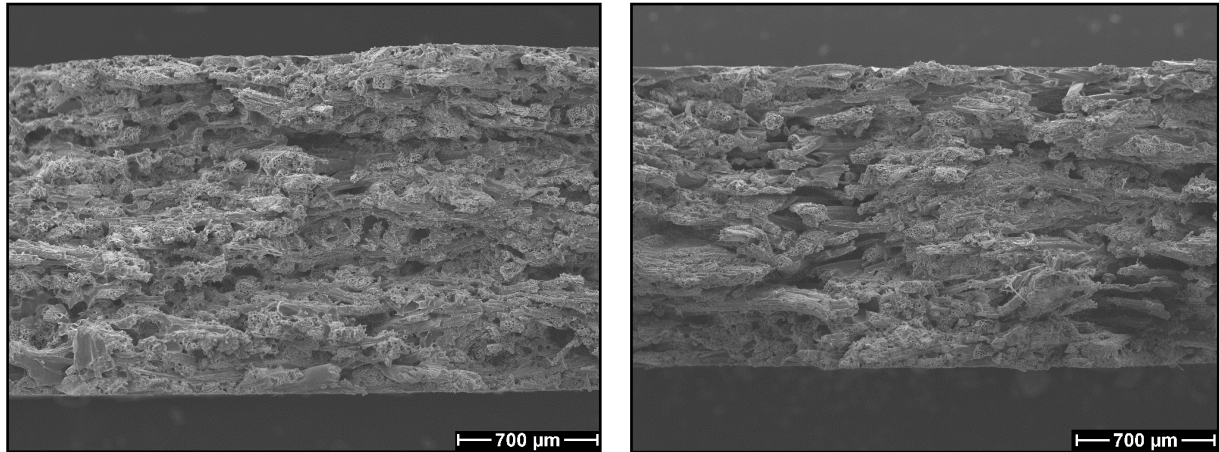


Bild 5.15: Bruchbild der Verbunde nach Zugbeanspruchung: bei 15 bar (links) und 60 bar Pressdruck (rechts)

Ab einem kritischen Pressdruck, ab dem keine weitere Verdichtung mehr möglich ist, tritt eine Schädigung der Faserstruktur auf. Dabei erwiesen sich die Hanffasern druckempfindlicher als die Kenaffasern. Schon bei einer mit 60 bar gepressten Platte sind einige geschädigte Hanffaserbündel im Verbund zu erkennen (Bild 5.16). Die Struktur der Kenaffasern bleibt aufgrund der stärkeren Zellwände unverändert. Prüflplatten, die bei 80 bar verarbeitet wurden, zeigen nicht nur beschädigte Hanf-, sondern auch schadhafte Kenaffaserbündel (Bild 5.17).

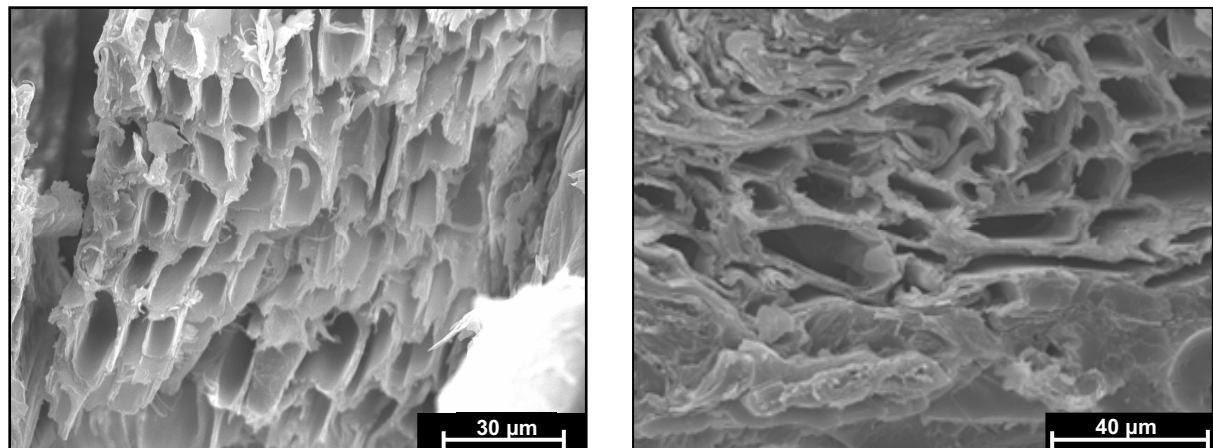


Bild 5.16: Ungeschädigte Hanffaserbündel bei 15 bar (links) und partiell zusammengepresste Hanffaserbündel bei 60 bar Pressdruck (rechts)

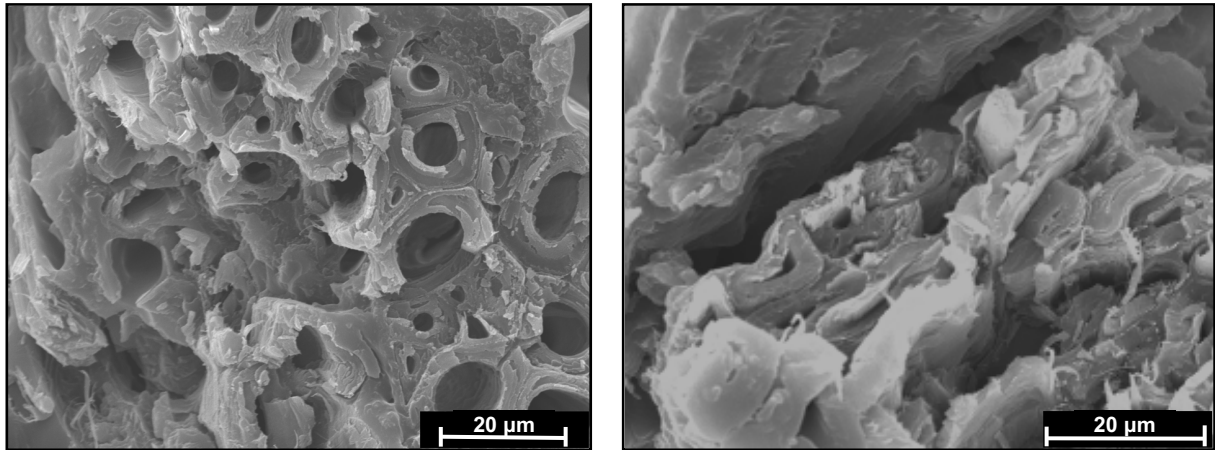


Bild 5.17: Ungeschädigte Kenaffaserbündel bei 60 bar (links) und geschädigte Kenaffaserbündel bei 80 bar Pressdruck (rechts)

Bei höherem Pressdruck über 80 bar ist die Struktur aller Fasersorten so beschädigt (Bild 5.18), dass die Eigenschaften des Verbunds teilweise unter die der mit niedrigstem Druck verpressten Platten sinken.

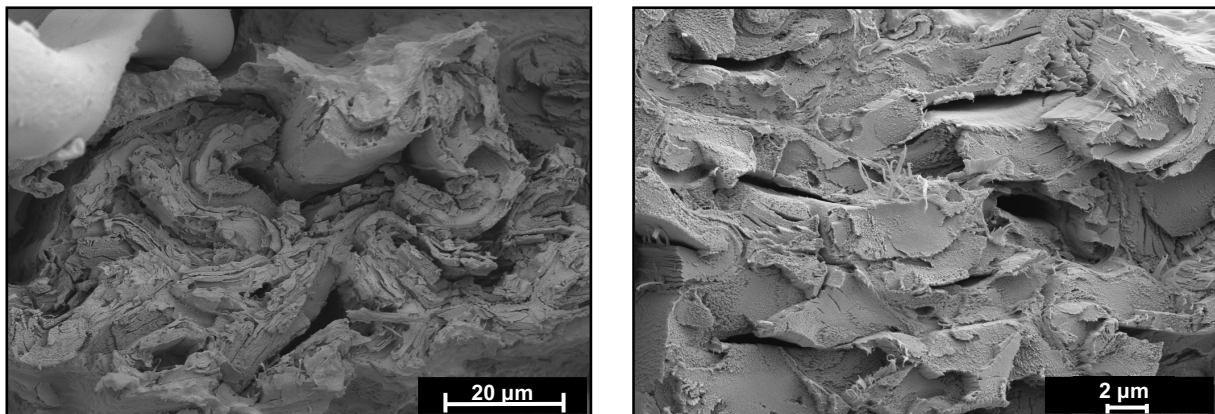


Bild 5.18: Geschädigte Struktur mit 100 bar (links) und mit 150 bar (rechts) verpressten Fasern

### 5.3.2 Wasseraufnahme

Wie bei allen naturfaserverstärkten Kunststoffen wirkt sich auch bei diesem Verbundwerkstoff das hohe Wasseraufnahmevermögen der Naturfaser störend aus. Damit pressverformte Faserstoffe in der Automobilindustrie Einsatz finden, darf deren Wasseraufnahme je nach Anwendung 50 bzw. 60 % nach 24 Stunden unter Wasser nicht überschreiten.

Der Wasseraufnahmetest wurde nach DIN Norm 53 495 Verfahren 1 [114] durchgeführt. Die Norm beschreibt die Bestimmung der Wasseraufnahme mit Hilfe der Masseänderung nach Lagerung in Wasser. Dafür werden die Proben auf eine Größe von  $50 \pm 0,5$  mm geschnitten. Nach Verfahren 1 werden die Proben  $24 \pm 1$  Stunden im Wärmeschrank bei  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  getrocknet, anschließend 2 Stunden im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt und dann sofort auf 1 mg genau gewogen. Nach dem Trocknen und Wiegen ( $m_1$ ) werden die Probekörper  $24 \pm 1$  Stunden in destilliertem Wasser gelagert und unmittelbar danach wieder gewogen ( $m_2$ ). Die Werte der Wasseraufnahme werden in %, auf das Probengewicht bezogen, angegeben (Gleichung 5.2).

$$W [\%] = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (5.2)$$

### 5.3.2.1 Wasseraufnahme der reinen Komponenten

Duroplastische Matrizen auf Acrylatbasis sind generell hydrophob und nach Angaben des Herstellers wasserbeständig. Reines Polymer wurde in Filmform ausgehärtet und die Wasseraufnahme bestimmt. Dafür werden fünf Messproben 24 Stunden im Wasser ausgelagert, abgetropft und gewogen. Nach 24 Stunden unter Wasser konnte eine Wasseraufnahme von ca. 0,8 % festgestellt werden. Dies kann im Vergleich zu der Wasseraufnahme von Naturfasern vernachlässigt werden.

Naturfasern sind sehr hygroskopisch und nehmen bekanntlich sehr viel Wasser auf. Um die Ausmaße dieser Aufnahme festzustellen, wurde die Wasseraufnahme des reinen Naturfaservlieses bestimmt. Hierzu wurden zehn Prüfkörper im Wasser ausgelagert. Um die Sättigung der Proben zu bestimmen, wurde die Wasseraufnahme nach unterschiedlichen Lagerungszeiten ermittelt. Die Prüflinge wurden nach 1, 3, 10 und 30 Minuten, sowie nach 2 und 24 Stunden aus dem Wasser geholt, abgetropft und gewogen. Wie in Bild 5.19 deutlich ersichtlich, waren die Proben schon in den ersten Minuten gesättigt. Danach stieg die Wasseraufnahme nur noch leicht an und erreichte Werte von über 500 %.

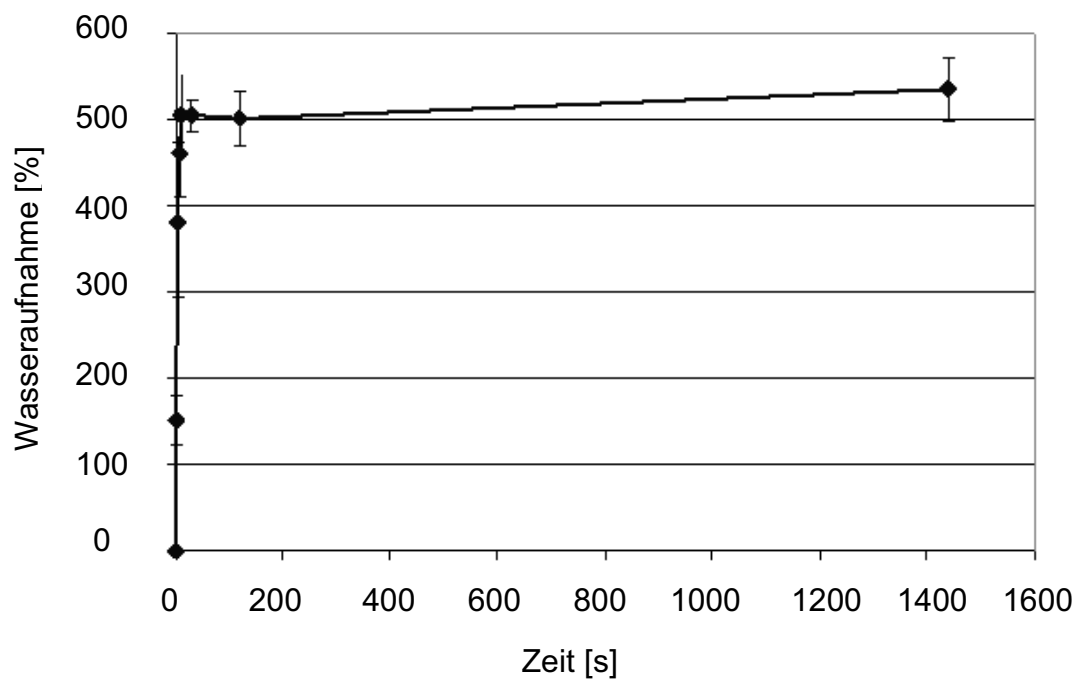


Bild 5.19: Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme des reinen Naturfaservlieses

Diese Ergebnisse belegen, dass die Wasseraufnahme des Verbundes deutlich von den Fasern dominiert wird. Damit die Wasseraufnahme im Bauteil unter den Zielgröße von 50% bleibt, muss die Matrix sich sehr gut durch die Fasern verteilen und eine geschlossene Oberfläche bilden, die das Eindringen des Wassers in den Verbund verhindert.

### 5.3.2.2 Einfluss des Pressdrucks auf die Wasseraufnahme der Verbunde

Aus den bei unterschiedlichem Pressdruck hergestellten Bauteilen wurden fünf Messproben entnommen und in destilliertes Wasser eingelegt. Die Proben wurden, wie in den vorherigen Versuchen, in festgelegten Zeitabständen aus dem Wasser geholt und die Wasseraufnahme gravimetrisch bestimmt. Im Bild 5.20 ist der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme ausgewählter Verbunde dargestellt. Dieser hat sich im Vergleich zu den nicht imprägnierten Vliesen insofern verändert, dass das Wasser nicht mehr so schnell in den ersten Minuten aufgenommen wird, sondern dass sich die Wasseraufnahme innerhalb der 24 Stunden stetig steigert. Der Verlauf ist ähnlich für alle Pressdrücke und bleibt unter dem 50 %igen Grenzwert für die Anwendung in der Automobilindustrie.

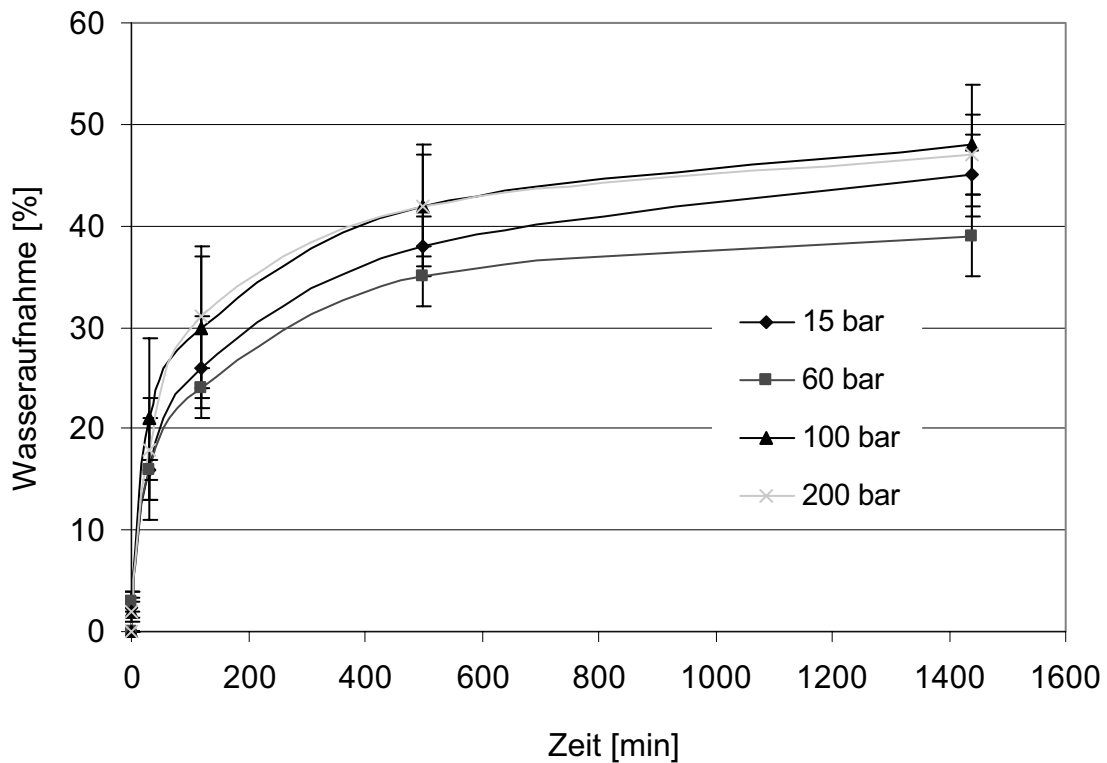


Bild 5.20: Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme der Verbunde ausgewählte Pressdrücke

In dem nicht imprägnierten NF-Vlies sind die Fasern nicht miteinander verbunden und das Wasser kann hauptsächlich durch Diffusion sehr schnell in die inneren Hohlräume und in das Lumen (Mikrohohlräume) der Fasern fließen und sich im Vlies- und Faserinnen ablagern. Die Verbunde weisen dagegen eine relative gut geschlossene Oberfläche auf und die Hohlräume zwischen den Fasern haben sich deutlich reduziert, da sie mit Matrix aufgefüllt sind. Jetzt muss das Wasser im ersten Schritt in die Grenze zwischen die Faser und Matrix eindringen und deren Verbindungen zerstören, bevor es in den Verbund weiter einfließen kann. Je besser die Grenzflächenhaftung zwischen Fasern und Matrix ist, desto langsamer wird der Verbund das Wasser aufnehmen.

Bei der Bestimmung der Wasseraufnahme (Bild 5.21) ist die gleiche Tendenz wie bei den mechanischen Eigenschaften (s. Bild 5.11) zu erkennen.



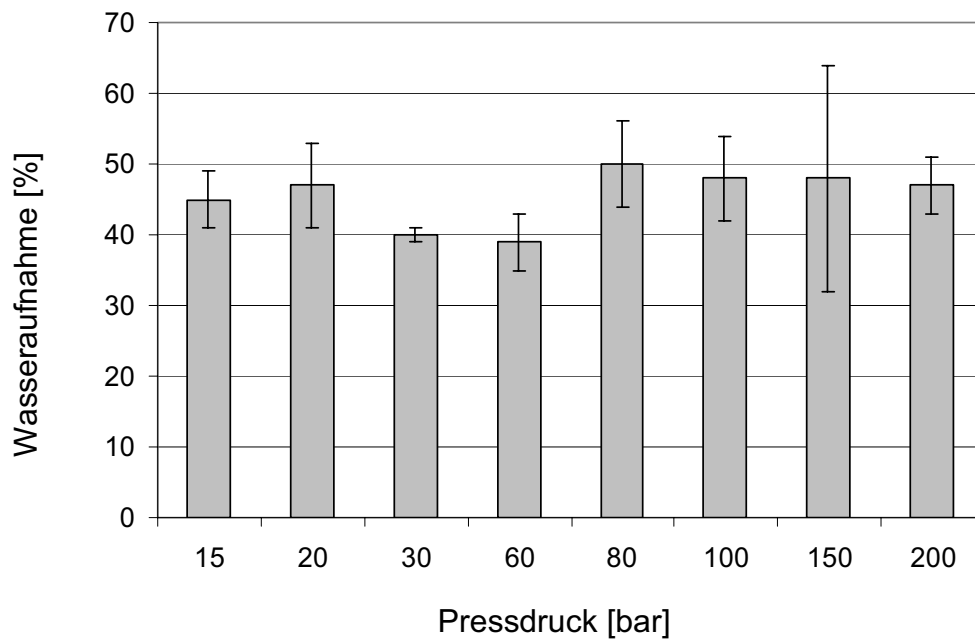


Bild 5.21: Wasseraufnahme der mit verschiedenen Pressdrücken verpressten Verbunde

Bei niedrigem Pressdruck von 15 und 20 bar bleibt die Wasseraufnahme knapp unter 50 %. Bei Verarbeitungsdrücken zwischen 30 und 60 bar verringert sich die Wasseraufnahme auf ca. 40 %. Dies kann auf die starke Verdichtung der Fasern (weniger Hohlräume und weniger innere Oberflächen) und der daraus resultierenden schlechteren Diffusion und Einlagerung von Wasser zurückgeführt werden (Bild 5.22).

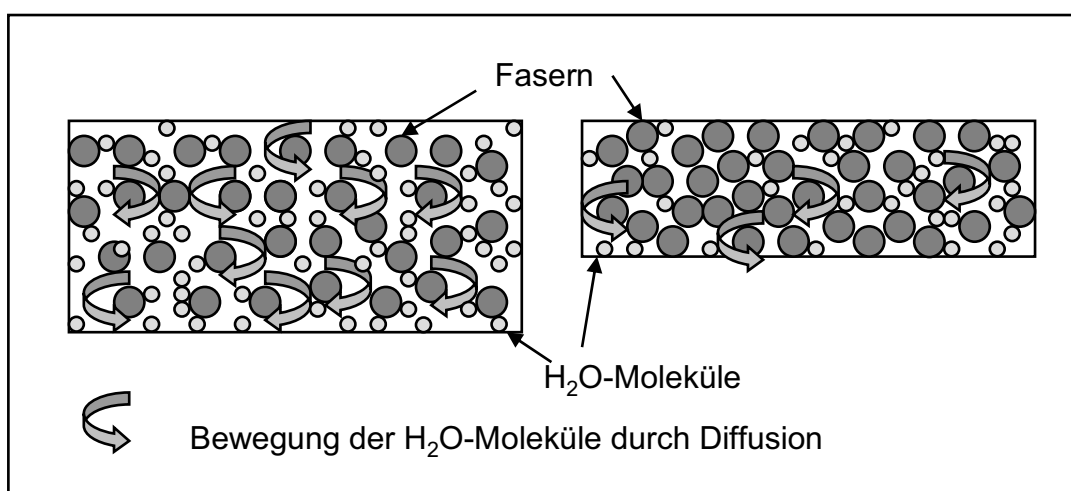


Bild 5.22: Modell zur Wasseraufnahme durch Diffusion im Verbund in Abhängigkeit der Verdichtung des Materials

Ab 80 bar steigt die Wasseraufnahme wieder auf 50 % an. Ab diesem Druck ist die Struktur der Fasern beschädigt und das Wasser kann besser zwischen die Fasern fließen.

## 5.4 Druckhaltezeit beim Pressen

Lange Presszeiten in der Verarbeitung sind unwirtschaftlich und sollten minimiert werden, ohne dass sich die Verbundeigenschaften verschlechtern dürfen. Durch den Einsatz der Vakuumtechnologie kann das Pressverfahren durch exakte Reproduzierbarkeit und bessere Rahmenbedingungen deutlich verbessert werden. Zugleich steigt die Qualität der Bauteile, da Lufteinschlüsse im Formteil deutlich reduziert und typische Fehler, wie Blasen, Schmierstellen, Fließlinien, Porosität, Bindenahtfehler etc, vermieden werden können.

### 5.4.1 Einsatz der Vakuumtechnologie beim Formpressen

Das Vakuumpressen wird üblicherweise bei der Herstellung von Bauteilen im Handlaminierverfahren oder Formpressen beim Gummiteilen eingesetzt. Bild 5.23 zeigt den prinzipiellen Aufbau und die Bauelemente einer Vakuumpresse.

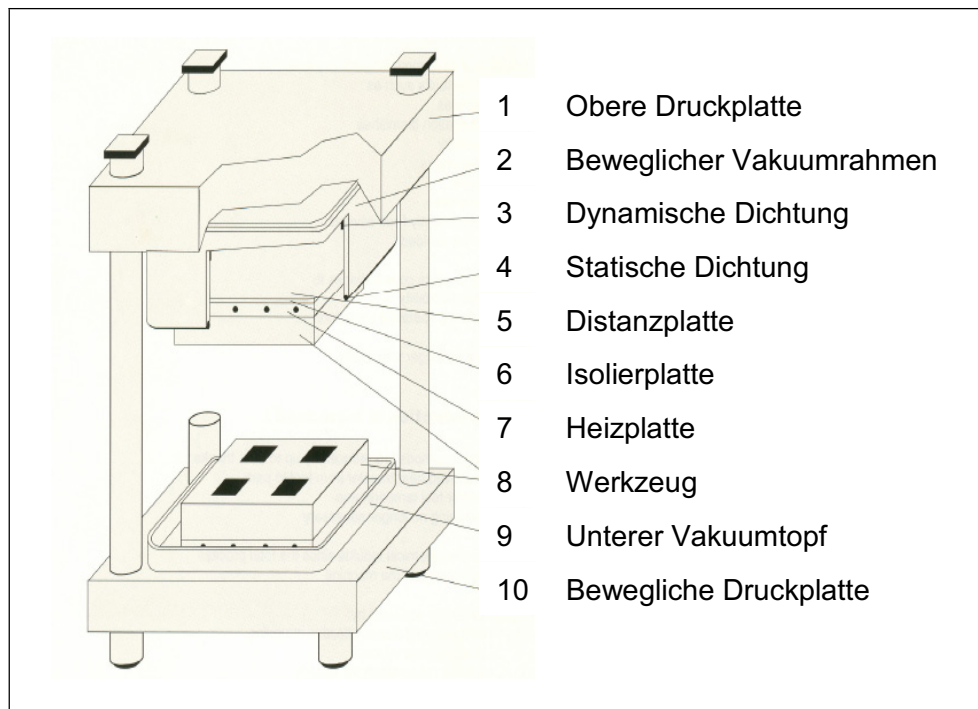


Bild 5.23: Elemente einer Vakuumpresse [115]

Die Vakuumtechnologie wird hauptsächlich bei der Herstellung von Gummibauteilen eingesetzt, um die Zykluszeiten maßgeblich zu reduzieren. Eine Kombination aus Speicher und Pumpe verkürzt die Evakuierzeit. Dank des Speichers liegt das Vakuum sehr viel schneller an (3 bis 4 s), als bei üblicher Vakuumerzeugung per Pumpe allein (ca. 30 s) [116]. Die Absauganschlüsse der Vakuumkammer sind reinraumgerecht konzipiert, so dass beim Evakuieren Trennmittelrückstände, Schmutzpartikel und Austriebe mit abgesaugt werden.

Bei der Verwendung von Vakuumanlagen ist darauf zu achten, dass die Sauggeschwindigkeit groß genug ist, um Verformungen schnell durchführen zu können und kleine Taktzeiten zu erzielen. Moderne Anlagen sind mit hochentwickelten Steuerungs- und Regelungssystemen ausgestattet. Dadurch ist es möglich, Bauteile mit reproduzierbaren Eigenschaften anzufertigen [117, 118]. Die Vakuumkammerpresse garantiert einen sehr sicheren Prozess, da Lufteinschlüsse zuverlässig vermieden werden. In den Kavitäten wird ein Restdruck von 18-25 mbar erreicht [119]. Auch die Temperaturverteilung über die gesamte Werkzeugfläche ist innerhalb der geschlossenen Vakuumkammer konstruktionsbedingt wesentlich gleichmäßiger als bei herkömmlichen Pressen. Diese neue Technologie kann nicht nur bei dem Verfahren appliziert werden, sondern auch bei anderen Verarbeitungsprozessen wie z.B. Spritzpressen, CTM, ITM, etc. (Bild 5.24).

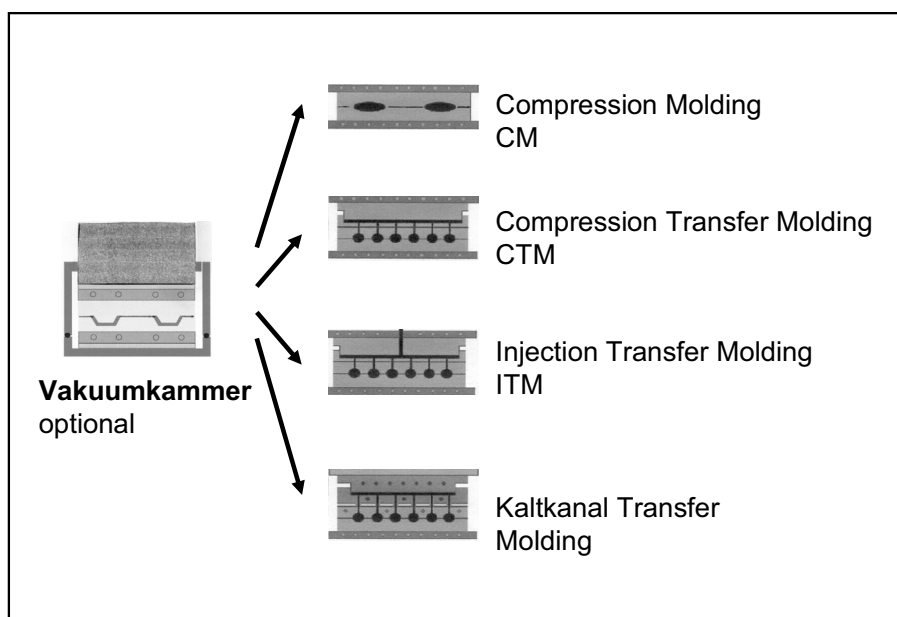


Bild 5.24: Einsatz der Vakuumtechnologie in mehreren Verarbeitungsprozessen [120]

#### 5.4.2 Pressversuche unter Vakuumtechnik

Für diese Versuche wurden vernadelte Mischvliese aus Hanf- und Kenaffaser mit einem Matrixanteil von ca. 22 %, einer Restfeuchte von ca. 19 %, und einem Flächengewicht von  $1300 \text{ g/m}^2$  eingesetzt. Die Halbzeuge hatten eine Fläche von  $400 \times 400 \text{ mm}^2$ . Das Material wurde auf einer mit einer Vakuumkammer ausgerüsteten hydraulischen Presse verpresst. Die Anlage verfügte über eine maximale Presskraft von 3300 kN. Die Parallelführung des Pressenstößels erfolgt über Säulenführungen (Bild 5.25).

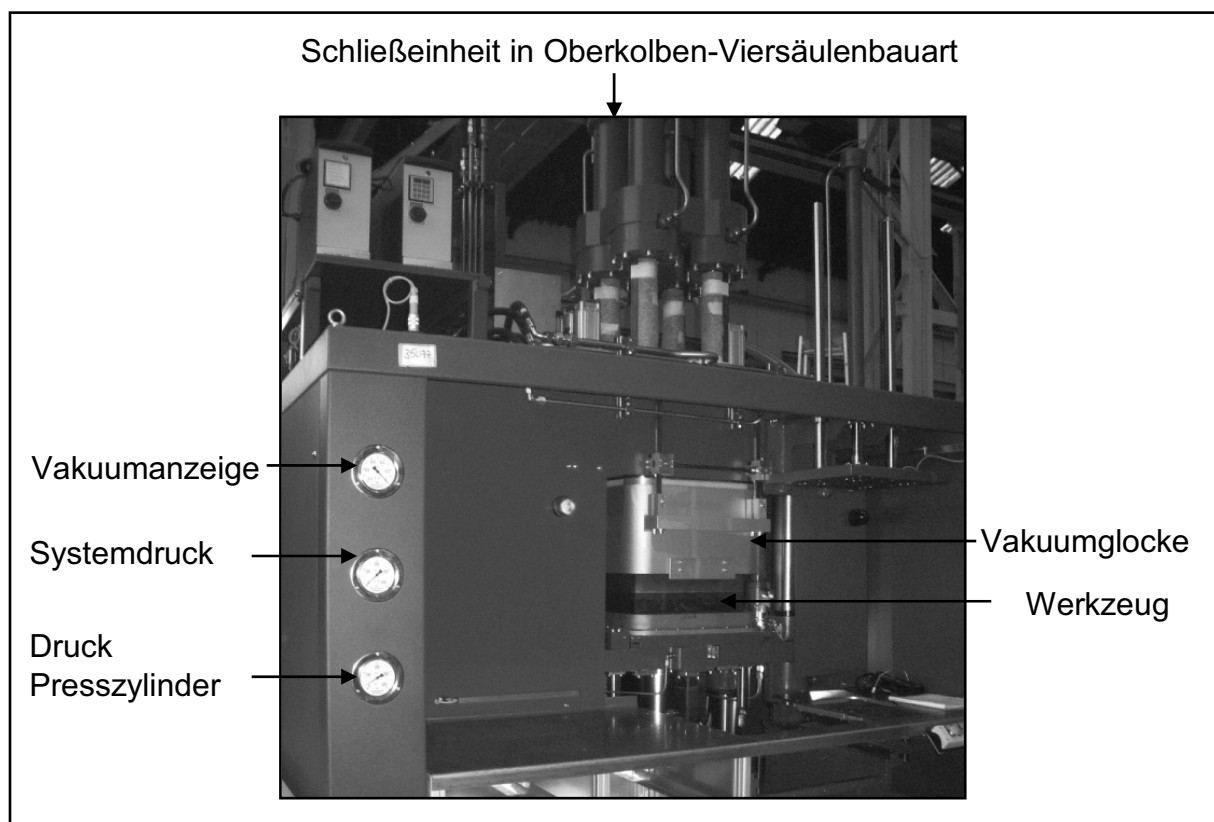


Bild 5.25: Presse mit Vakuumtechnologie

Der erste Schritt bestand darin, die Pressparameter ohne Einsatz der Vakuumkammer zu bestimmen. Dafür wurde die Presse geschlossen, während die Vakuumkammer offen blieb (Bild 5.26 links). Der Prozessablauf verlief analog zu dem Pressverfahren auf der Laborpresse am IVW (s. Kap. 4.3, Bild 4.9).

Nach mehreren Pressversuchen wurde eine Gesamtpresszeit von 100 Sekunden festgelegt, da eine Reduzierung der Presszeit aufgrund der hohen Restfeuchte zu Blasenbildung an der Oberfläche der Platten führte. Nach Festlegung der Presszeit

wurden die Halbzeuge in dem auf 200 °C vorgeheizten Werkzeug bei einem Flächendruck von 20 bar verpresst. Die anschließenden Pressversuche wurden unter Verwendung der Vakuumkammer durchgeführt (Bild 5.26 rechts). Der Prozessablauf unter evakuierten Bedingungen ist in Bild 5.28 schematisch dargestellt.

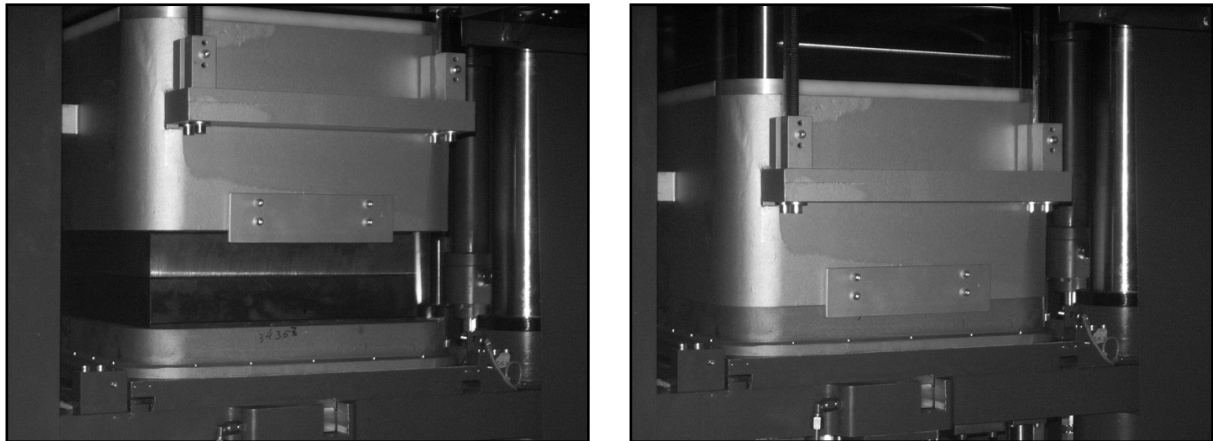


Bild 5.26: Geschlossenes Werkzeug ohne Einsatz der Vakuumkammer (links) und Pressverfahren unter Vakuum (rechts)

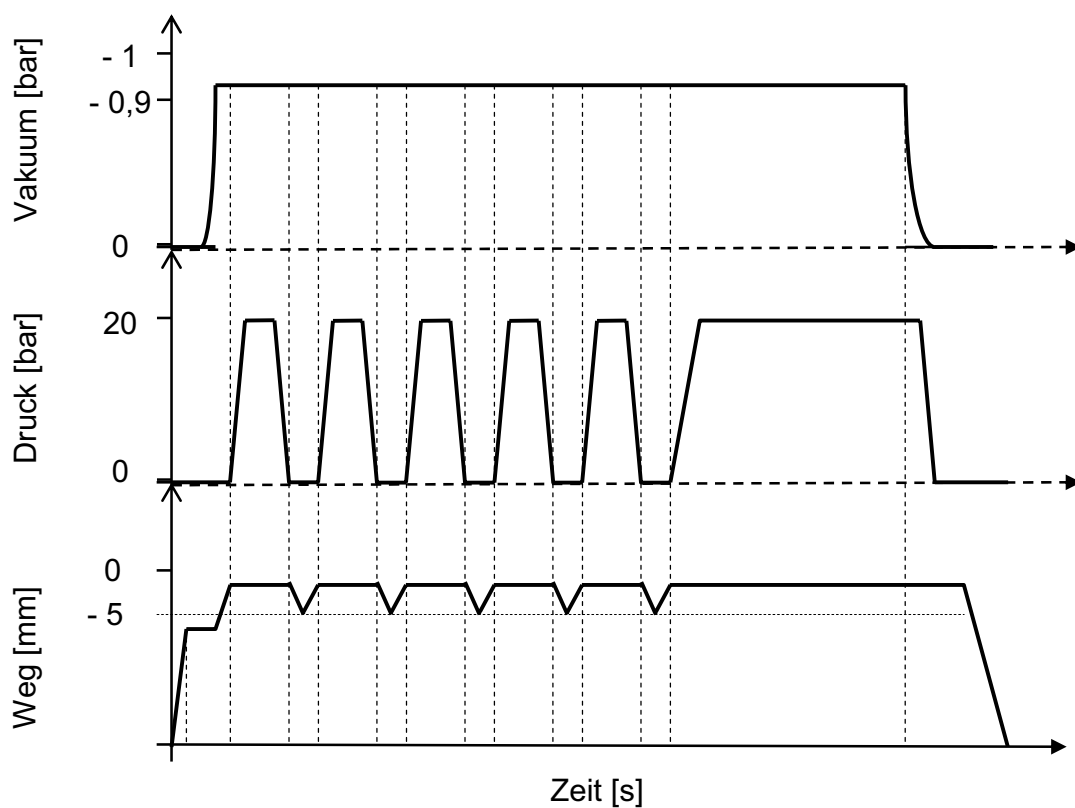


Bild 5.27: Schematische Darstellung des Pressvorgangs mit zusätzlichem Einsatz der Vakuumtechnologie

Die Halbzeuge wurden in das Werkzeug eingelegt und die Presse bis zum Vakuumschlitz zugefahren, ohne dass ein Kontakt mit dem Halbzeug hergestellt wurde. Erst nachdem das Werkzeug geschlossen war, wurde die Vakuummkammer ebenfalls geschlossen und der gesamte Innenraum evakuiert. Nach wenigen Sekunden wurde innerhalb der Vakuummkammer ein Druck von ca. -0,95 bar erreicht. Das Vakuum wird üblicherweise bis 10 Sekunden vor Ende des Pressvorgangs gehalten. Nach dem Beenden der programmierten Presszeit öffnete sich die Vakuummkammer und anschließend fuhr die Presse auf. Die verpressten Halbzeuge konnten aus dem Werkzeug entnommen werden. In Bild 5.28 ist eine schematische Darstellung des Pressvorgangs unter Einsatz der Vakuummkammer dargestellt.



Bild 5.28: Schema des Pressvorgangs mit Einsatz einer Vakuummkammer

Die Oberfläche der unter Vakuum verpressten Bauteile zeigte im Gegensatz zu den unter atmosphärischen Bedingungen verpressten eine homogene Farbe. Die Arbeitsumfeldbedingungen wurden ebenfalls deutlich verbessert, da die Geruchsbelastung und der Lärmpegel durch die direkte Evakuierung des Dampfes und der Härtingsreaktionsprodukte in der Vakuumkammer deutlich reduziert wurden.

Für die Pressversuche unter Vakuum wurde zunächst eine Druckhaltezeit von 100 Sekunden gewählt. Da bei einer Verkürzung der Prozesszeit unter Vakuumbedingungen keine Blasen an der Oberfläche der Platten festgestellt wurden, konnte die Presszeit systematisch von 100 s bis auf 50 s reduziert werden. Die Anzahl der Lüftungshübe konnten dabei von 5 auf 3 und die Haltezeit von 10 auf 5 Sekunden reduziert werden. In Tabelle 5.1 sind die Prozessparameter dargestellt, wobei die Werkzeugtemperatur und der Pressdruck wie in den vorherigen Versuchen auf jeweils 200 °C und 20 bar festgelegt wurden.

Tabelle 5.1: Pressbedingungen

Lüftungstakte	Haltezeit [s]	Gesamte Presszeit [s]	Vakuum
5	10	100	nein
5	10	100	ja
3	10	80	ja
3	5	65	ja
3	5	50	ja

### 5.4.3 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Um die mechanischen Eigenschaften der Testplatten zu bestimmen, wurden Zug-, Dreipunkt-Biege-, und Schlagzähigkeitsversuche durchgeführt. Die Ergebnisse der Prüftests, sowohl in Produktionsrichtung (PR) als auch quer zu Produktionsrichtung (QPR), sind in Anhang 8.6 zusammengefasst.

Bild 5.29 zeigt exemplarisch die Ergebnisse des Biege-E-Moduls in Abhängigkeit der Presszeit. Es konnte kein Einfluss der Presszeiten auf die Biege- und Zugeigenschaften detektiert werden. Auch bei den Ergebnissen der Schlagzähigkeitstests (Bild 5.30) lässt sich keine Abhängigkeit von der Presszeit feststellen.

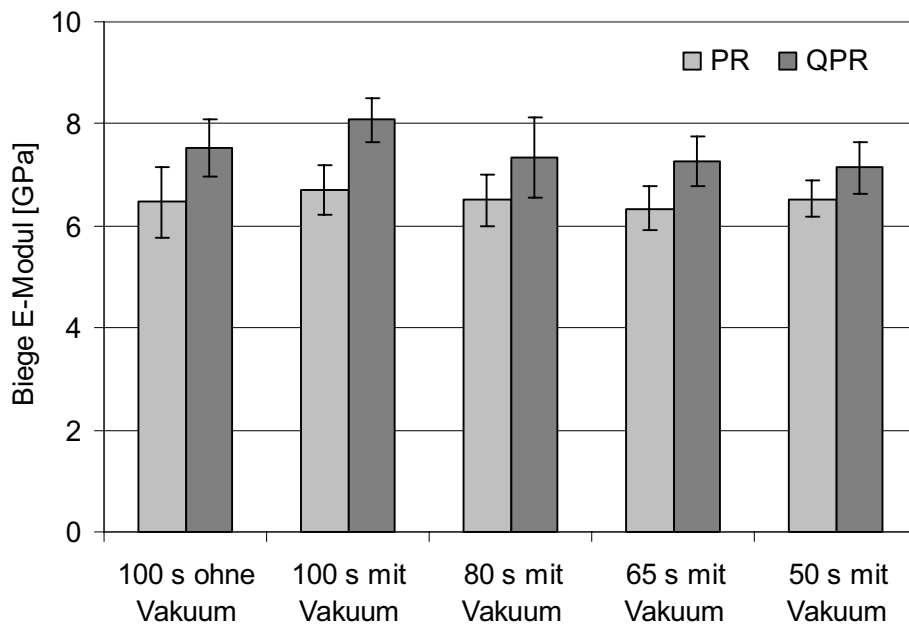


Bild 5.29. Testergebnisse der Dreipunktbiege-Versuche der mit und ohne Vakuum verpressten Halbzeuge (Mischvlies aus Hanf- und Kenaffasern mit einem Matrixanteil von ca. 22 %) in Abhängigkeit der Zeit und des Pressverfahrens ( $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $P = 20 \text{ bar}$ )

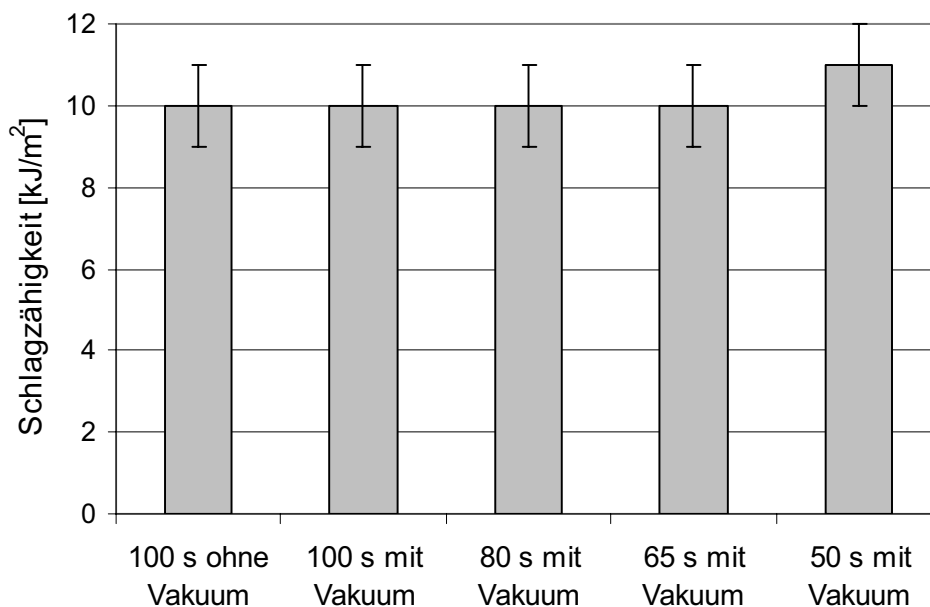


Bild 5.30: Testergebnisse der Schlagzähigkeit-Versuche der mit und ohne Vakuum verpressten Halbzeuge (Mischvlies aus Hanf- und Kenaffasern mit einem Matrixanteil von ca. 22 %) in Abhängigkeit der Zeit und des Pressverfahrens ( $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $P = 20 \text{ bar}$ )



Durch den Einsatz der Vakuumtechnologie beim Pressverfahren konnte die gesamte Presszeit um die Hälfte reduziert werden, ohne Einbußen bei den mechanischen Eigenschaften.

#### 5.4.4 Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom Vakuumeinsatz

An dieser Stelle soll der Einfluss des Einsatzes der Vakuumtechnik auf die Wasseraufnahme der Verbunde untersucht werden. Um die Wasseraufnahme zu bestimmen, wurden fünf Probekörper aus mindestens zwei Pressplatten entnommen und für 24 Stunden in destilliertes Wasser bei Raumtemperatur gelegt. Anschließend wurden die Proben aus dem Wasser geholt, abgetropft und die Wasseraufnahme gravimetrisch bestimmt. Bild 5.31 zeigt quantitativ die Abhängigkeit der Wasseraufnahme-Werte von den Pressbedingungen.

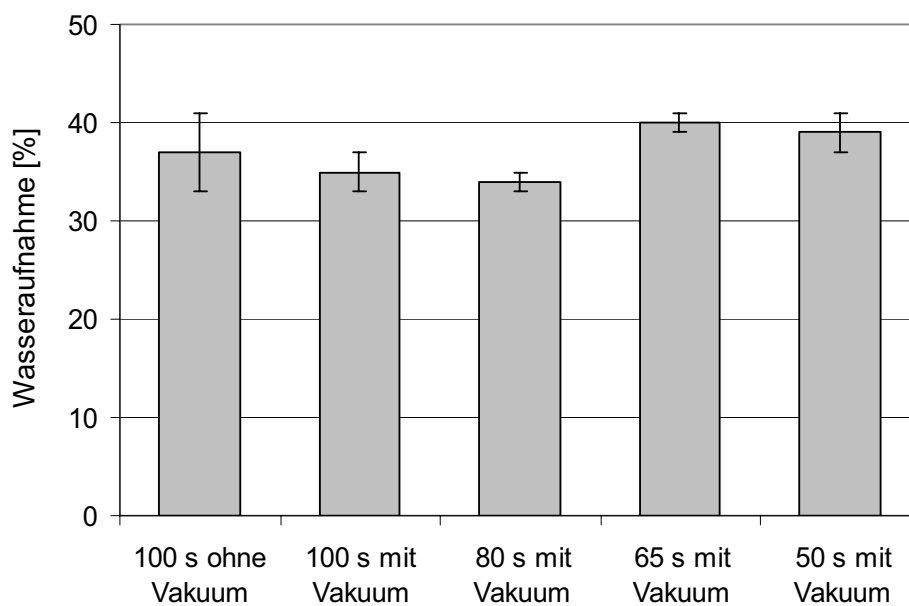


Bild 5.31: Ergebnisse des Wasseraufnahmetests der mit und ohne Vakuum verpressten Halbzeuge (Mischvlies aus Hanf- und Kenaffasern mit einem Matrixanteil von ca. 22 %) in Abhängigkeit der Zeit und des Pressverfahrens (T = 200 °C und P = 20 bar)

Wie die mechanischen Eigenschaften zeigen die Prüfergebnisse keine deutliche Abhängigkeit des Wasseraufnahmegrades von den Presszeiten und der Einsatz vom Vakuum. Alle getesteten Prüfplatten erfüllen die Anforderungen für den Einsatz in der Automobilindustrie, da alle Messwerte unter der maximal zulässigen Wasseraufnahme von 50 % liegen.

## 5.4.5 Emissions- und Geruchswerte

### 5.4.5.1 Anforderungen und Prüfverfahren

Emissionen von Kunststoffen im Innenraum von Fahrzeugen sind in der Regel unerwünscht, da diese auf die Gesundheit und die Umwelt einen schlechten Einfluss haben können. Heutzutage wird der Neuwagengeruch im Auto mit Chemie und toxischen Produkten in Zusammenhang gebracht und wird von den Kunden teilweise nicht mehr toleriert [121, 122]. Deshalb ist die Reduzierung von Emissionssubstanzen im Innenraum ein wichtiger Entwicklungspunkt für die Automobilindustrie. Automobilhersteller arbeiten seit Jahren, um die Emissionswerte im Automobilinnenraum auf ein niedriges Niveau zu reduzieren bzw. zu halten. Die Volkswagen AG hat z.B. die Gesamtkohlenstoffemissionen in der Golf-Klasse seit 1995 um mehr als die Hälfte reduziert [123]. Bereits während der Entwicklungsphase eines Fahrzeuges werden die Emissionen einzelnen Komponenten überprüft und für einen möglichen Einsatz bewertet. Weiterhin wird vor dem Serienstart eine Gesamtfahrzeugmessung durchgeführt, um die Wirkung der Einzelmaterialien auf das Gesamtfahrzeug zu bewerten.

Naturstoffe bestehen aus einer Vielzahl organischer Verbindungen, die sich durch z.B. die Verarbeitung in eine Vielzahl geruchsintensiver Stoffe umwandeln können. Der Geruch von Naturfasern wird meistens als „heuartig“ beschrieben und wird durch die hohen Temperaturen bei der Bauteileherstellung im Pressverfahren intensiviert, da durch die thermische Behandlung geruchsbestimmende Komponenten freigesetzt werden. Bledzki et. al. fanden in [122] eine Geruchskonzentration von Bastfasern nach dem Aufheizen, die ca. 10-mal höher lag als die von unbehandelten Fasern. Merten [124] konnte z.B. im „Geruch“ von Hanf Essigsäure, 3-Methylbutanal, Hexanal, 3-Methylbutansäure, Octanal, Nonanal, und (E)-2-Nonenal identifizieren. Der Geruch im Bauteil entsteht durch Desorption von Geruchsstoffen von der Oberfläche. Um die Emissionswerte zu quantifizieren werden üblicherweise VOC-, Fogging-Werte und Formaldehydabgabe bestimmt. Eine Geruchsprüfung wird ebenfalls durchgeführt. Als VOC sind Emissionen flüchtiger organischer Verbindung (Volatile Organic Compounds) zu verstehen, die einen Siedepunkt zwischen 50 und 250 °C aufweisen und zur Belastung mit Luftfremdstoffen im Innenraum beitragen können. Das Fogging wird durch Ausgasungen schwer flüchtiger Kunststoffbestandteile verursacht. Typische Fogging verursachende Substanzen sind Phthalate, Paraffinen,

langkettige Fettsäure, Phosphoresters, organische Halogenverbindungen und O-, N-, S- Verbindungen [122]. Formaldehyd ist ein farbloses, stechend riechendes Gas mit besonders reaktiven Verbindungen, die zum Teil extrem gut wasserlöslich sind und von der Nasenschleimhaut rezipiert werden können [125]. Die ermittelten Einzelsubstanzen können mit den Substanzen in der Liste der deklarationspflichtigen Stoffe (VDA 232-101) bzw. Stoffnegativlisten für die Werkstoffauswahl (z.B. DBL 8585) abgeglichen werden [125]. Dadurch kann eine Vorauswahl von geruchsarmen Naturprodukten getroffen werden [126].

Es existieren verschiedene analytische Methoden, um die flüchtigen Substanzen zu quantifizieren, bzw. mehrere gesetzliche Regulative, die entsprechende Grenzwerte vorschreiben. Nach VDA 276 [127] wird die Summenkonzentration der flüchtigen Kohlenwasserstoffe in einer Prüfkammerluft mittels Flammenionisationsdetektor (FID) quantifiziert. [131]. Die Bestimmung des Fogging-Verhaltens erfolgt nach DIN 75 201 [128]. Die VDA 277 [129] erlaubt das Bestimmen der leicht flüchtigen Kohlenwasserstoffe (VOC) in geringen Probenmengen im Labormaßstab. Eine definierte Menge des Gasraumes aus dem gasdichten Gefäß wird anschließend mittels der Kombination Gaschromatograph (GC) und Flammenionisationsdetektor (FID) auf die darin enthaltenen Kohlenwasserstoffe untersucht. Die Messung der Formaldehydabgabe erfolgt nach VDA 275 [130]. Formaldehyd wird photometrisch nach einer Farbreaktion mit dem Reagens Acetylaceton bestimmt.

Von den Automobilherstellern wurden eigene Methoden entwickelt, um die entsprechenden Kenngrößen messbar zu machen. Einige dieser Methoden, die ursprünglich von einzelnen Unternehmen wie BMW, VW/Audi oder DaimlerChrysler entwickelt wurden, sind bereits als VDA-Richtlinien erlassen worden [131]. Die von der Firma DaimlerChrysler AG ursprünglich entwickelte Thermodesorptionsmethode (Prüfanweisung PB VWL 709) liegt seit September 2002 als VDA 278-Empfehlung vor [132]. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit, mittels einer einzigen Methode das Fogging- und das Emissionsverhalten der leicht flüchtigen Bestandteile (VOC) nach derselben Methode zu charakterisieren. Die Proben werden in Thermodesorptionsröhrchen eingebracht und in zwei getrennten Durchgängen desorbiert. Die entstehenden Gase werden kondensiert und mittels GC / MS quantifiziert. Durch diese Methode ist eine genaue Identifizierung der freigesetzten Stoffe möglich.

Trotz neuer analytischer Methoden ist die seit Jahren etablierte Geruchsprüfung nicht zu unterschätzen und wird weiterhin eingesetzt, da über die menschliche Empfindlichkeit auf bestimmte Substanzen die instrumentelle Analytik nicht entscheiden kann. Die menschliche Geruchswahrnehmung weist sehr unterschiedliche Sensitivitäten auf und kann einerseits chemisch nachweisbare Gerüche erst in hoher Konzentration wahrnehmen, andererseits werden andere Substanzen bereits in Konzentrationen detektiert, die weit unterhalb der chemischen Nachweisgrenze liegen. Deshalb werden Werkstoffe auch hinsichtlich ihres Geruchsverhalten nach VDA 270 [133] charakterisiert. Die Proben werden konditioniert und durch drei Prüfer nach folgender Sechs-Punkte-Skala bewertet:

- Note 1: nicht wahrnehmbar
- Note 2: wahrnehmbar, nicht störend
- Note 3: deutlich wahrnehmbar, aber noch nicht störend
- Note 4: störend
- Note 5: stark störend
- Note 6: unerträglich

Ein Nachteil dieser Methode ist, dass keine Zuordnung zu den ermittelten Substanzen, die für die Geruchsentwicklung verantwortlich sind, erfolgen kann [125]. Das Faserinstitut Bremen e.V. hat eine neue Methode vorgeschlagen, die gezielt für die Beurteilung von Naturfasern entwickelt wurde [134]. Diese sogenannte FIBRE-Methode liefert durch exakt definierte Probenvorbereitung, die Schulung der Prüferpersonen und die exakte Trennung der Bewertungskriterien reproduzierbare Ergebnisse als die Messung nach VDA 270. Die Methode sollte dem DAR (Deutschen Akkreditierungs Rat) vorgelegt werden, ist aber noch keine zugelassene Prüfmethode.

#### **5.4.5.2 Ergebnisse der Messungen**

Zur Bestimmung des Einflusses der Vakuumpresstechnologie auf die Emissionswerte des Verbunds wurden Proben des ohne und unter Vakuum verpressten Materials mittels Emissionsmessungen durch Thermodesorptionsuntersuchungen gemäß VDA 278 auf VOC und FOG –Werte untersucht. Bild 5.32 stellt die Messwerte der Untersuchungen dar. Aus den Ergebnissen sind keine signifikanten Unterschiede beim Fogging-Verhalten zu erkennen. Im VOC-Emissionsverhalten konnte eine Emissions-

reduktion bei der Anwendung des Vakuumpressverfahrens von ca. 46 % festgestellt werden. Die maximalen Grenzwerte in der Automobilindustrie schwanken in diesem Fall je nach Autohersteller oder Anwendungsgebiet zwischen 50 und 500 ppm.

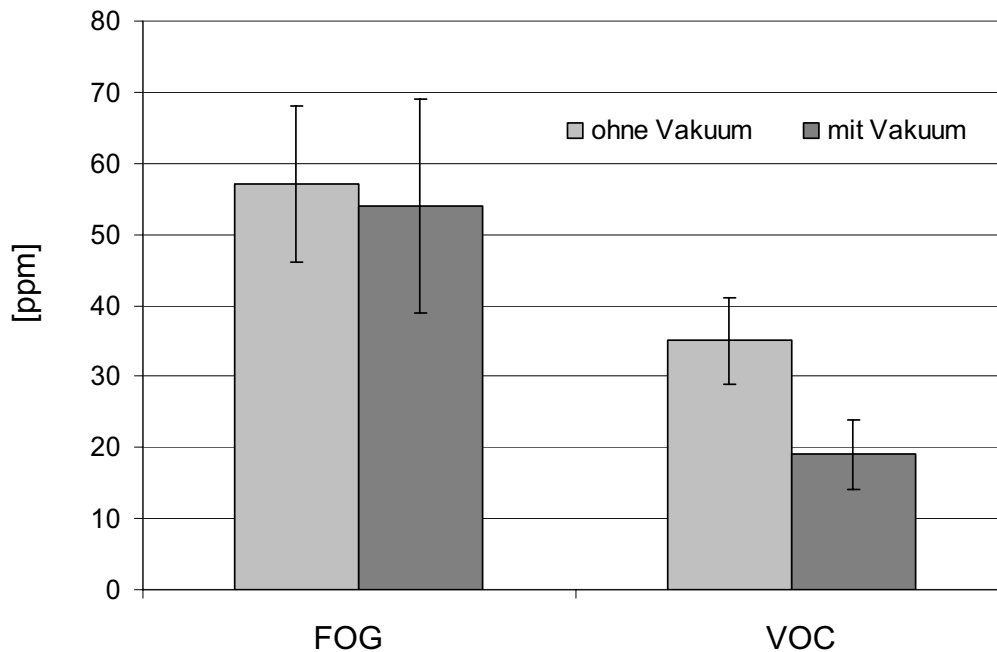


Bild 5.32: Ergebnisse der Thermodesorptionsuntersuchungen

Die Geruchsprüfung des Materials wurde nach VDA 270 Norm (s. Kap. 5.4.5.1) durchgeführt. Dafür wurden die Proben zuerst konditioniert und durch fünf geschulte Prüfer beurteilt. Sowohl die Proben, die unter atmosphärischen Bedingungen, als auch die unter Vakuum hergestellt wurden, haben den Geruchstest mit einer Note von 3 abgeschlossen. Daraus lässt sich feststellen, dass der Einsatz vom Vakuum keinen Einfluss auf die Geruchswerte hat. Mit einer Note 3 bei der Geruchsprüfung liegt das Material an der Wertgrenze der DaimlerChrysler oder VW Vorschriften und dürfte im Automobilinnenraum eingesetzt werden.

#### 5.4.6 Einfluss des Vakuums auf die Oberflächenqualität des Verbunds

Optische Bewertungen der Prüfplatten nach dem Pressverfahren ergaben glattere und homogenere Oberflächen bei den unter Vakuum verpressten Platten. Die mittels des Rasterelektronen-Mikroskops (REM) aufgenommenen Bilder der Verbundplatten (Bild 5.33) bestätigen diesen subjektiven Eindruck. Die unter Vakuum verpressten

Platten zeigten eine geschlossenerere Oberfläche als die Platten, die unter normal atmosphärischen Pressbedingungen hergestellt wurden.

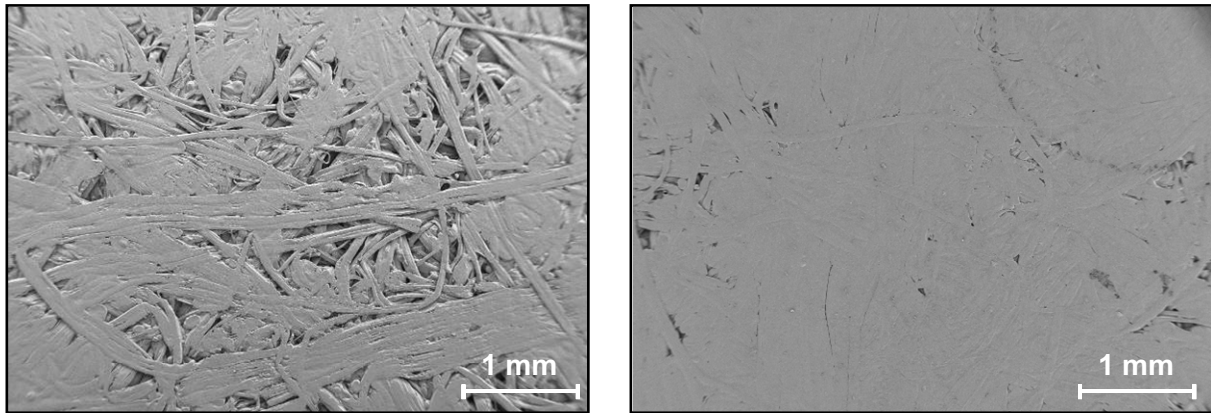


Bild 5.33: REM-Aufnahmen der Verbundoberflächen, links ohne Vakuum und rechts unter Vakuum verpresstes Material (Mischvlies aus Hanf- und Kenaffasern mit einem Matrixanteil von ca. 22 %, T = 200 °C, P = 20 bar, t = 100 s)

Zur quantitativen Charakterisierung der Bauteiloberfläche gibt es eine Reihe von Messverfahren, wie die Bestimmung der Rauheit oder der Welligkeit, die jeweils verschiedene Eigenheiten der Oberfläche berücksichtigen. Um die Oberflächenqualität der Platten quantitativ zu untersuchen, wurde innerhalb dieser Arbeit die Rauheit bestimmt. Die Rauheit wird als Unebenheit der Oberflächenhöhe definiert.

Die Messungen wurden mit einem Weißlicht-Profilometer (MicroProf<sup>®</sup>, Fries Research & Technology) durchgeführt. Die Proben werden bei der Messung berührungsfrei und zerstörungsfrei mit fokussiertem Weißlicht bestrahlt. Aus dem reflektierten Licht wird das Profil der Oberfläche aufgenommen und verschiedene Rauheitskennwerte (der arithmetischer Mittenrauhwert  $R_a$ , die gemittelte Rauhtiefe  $R_z$  oder die maximale Rauhtiefe  $R_{max}$ ) ermittelt. Vorzugsweise wird der mittlere Rauheitswert  $R_a$  angegeben [135]. Der arithmetische Mittenrauhwert  $R_a$  wird in DIN ISO 4768 als der arithmetische Mittelwert der absoluten Werte der Profilabweichungen  $y$  innerhalb der Bezugstrecken definiert.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (5.3)$$

$R_a$  gibt den mittleren Abstand eines Messpunktes zur Bezugslinie an (Bild 5.34). Die Bezugs- oder Mittellinie schneidet das wirkliche Profil (R) so, dass die Summe der Quadrate der Profilabweichung von dieser Linie ein Minimum wird [136].

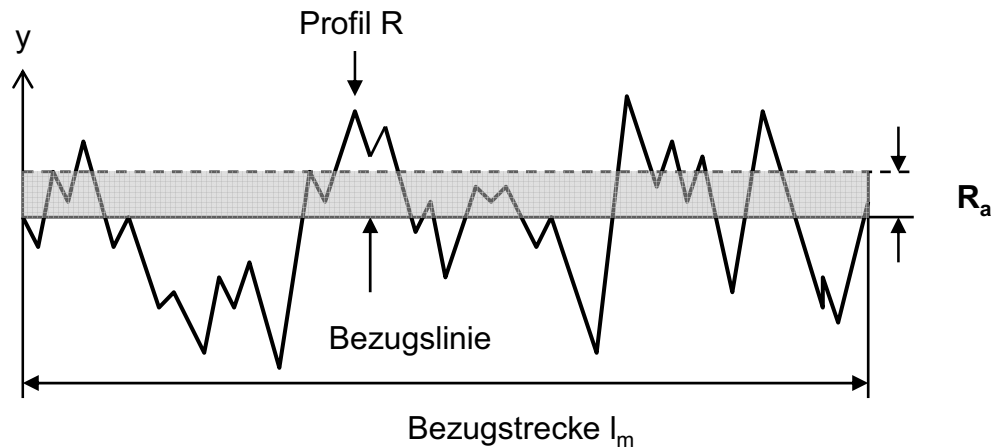


Bild 5.34: Schema der Ermittlung der mittleren Rauheit

Die Rauheitsmessungen wurden mindestens 5 Mal an verschiedenen Stellen wiederholt, da das Material eine sehr inhomogene Oberfläche besitzt. In Bild 5.35 sind die Ergebnisse der Rauheitsbestimmung dargestellt. Dabei handelt es sich um die gleiche Proben, die mittels REM aufgenommen wurden.

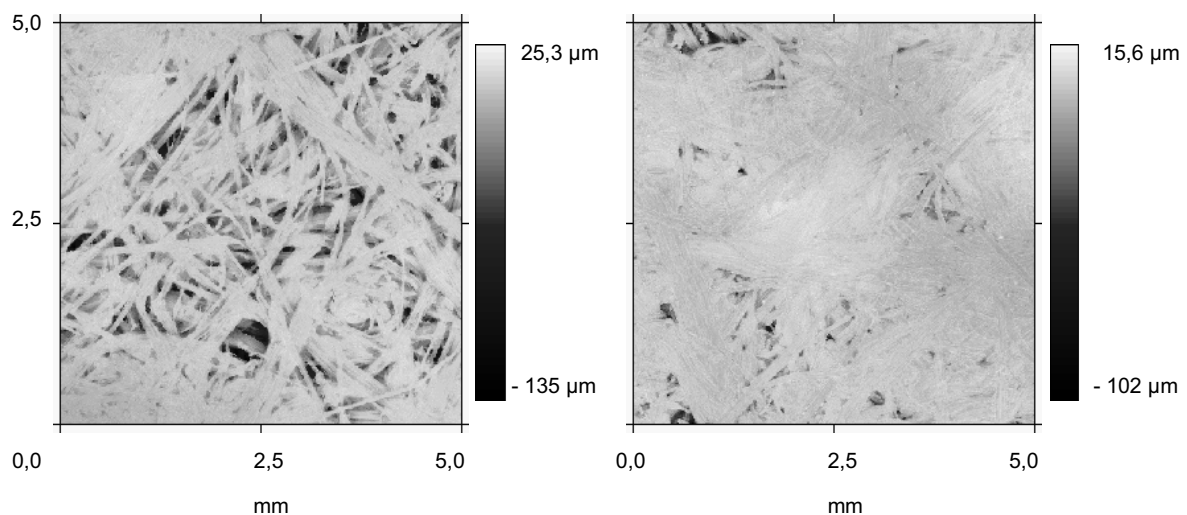


Bild 5.35: Profilometrische Aufnahmen der Oberfläche eines Verbunds, links ohne Vakuum und rechts unter Vakuum verpresstes Material (Mischvlies aus Hanf- und Kenaffasern mit einem Matrixanteil von ca. 22 %,  $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 20 \text{ bar}$ ,  $t = 100 \text{ s}$ )

Wie auf den profilometrischen Aufnahmen der Plattenoberfläche (Bild 5.35) ersichtlich, weisen die Platten, die unter atmosphärischen Pressbedingungen hergestellt wurden, eine viel offenporigere Oberfläche mit Höhendifferenzen von bis zu 160  $\mu\text{m}$  auf als die im Vakuum verpressten Platten. Die unter Einsatz der Vakuumtechnologie hergestellten Proben zeigen eine ebenmäßigere Topographie mit maximalen Schwankungen der Rauheit von ca. 118  $\mu\text{m}$ .

Um zu überprüfen, ob auch der Pressdruck einen Einfluss auf die Oberflächenqualität des Verbundes hat, wurden die mit 20 und 60 bar Flächendruck hergestellten Prüfplatten untersucht. Die ermittelten Messwerte sind im Bild 5.36 dargestellt.

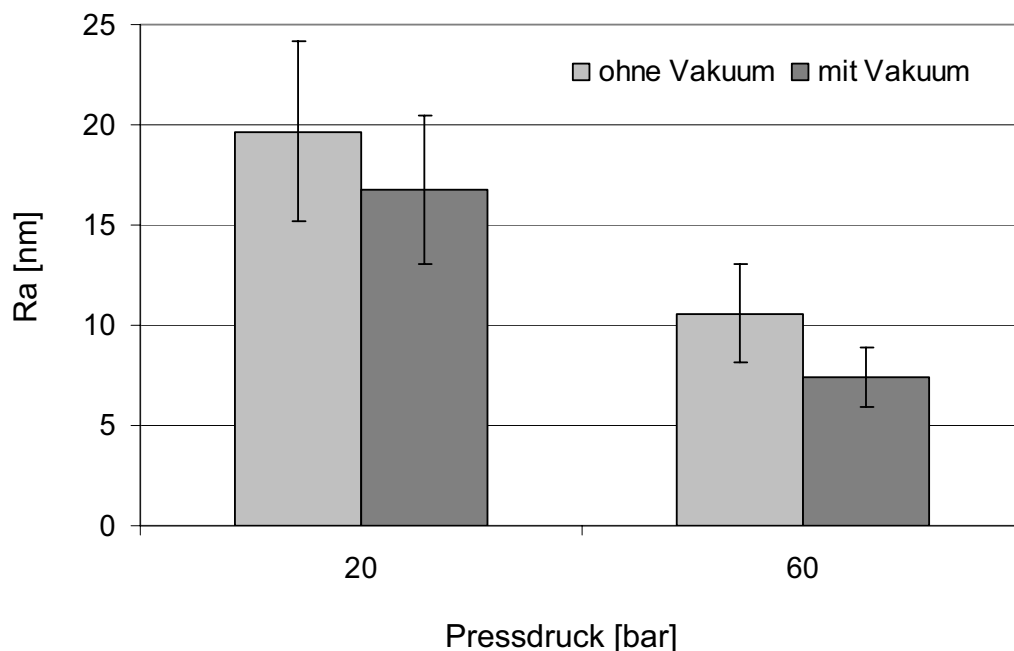


Bild 5.36: Mittenrauhwerte der Platten mit und ohne Vakuum in Abhängigkeit vom Flächenpressdruck (Mischvlies aus Hanf- und Kenaffasern mit einem Matrixanteil von ca. 22 %,  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 100\text{ s}$ )

Aus der Grafik ist erkennbar, dass neben dem Pressdruck auch die Verarbeitung unter Vakuum einen großen Einfluss auf die Oberflächerauheit des Verbunds hat. Bei 60 bar Pressdruck halbiert sich die Rauheit von 15 auf ca. 7  $\mu\text{m}$  bei den ohne Vakuum verpressten Platten und von 22 auf 9,5  $\mu\text{m}$  bei den unter Einsatz der Vakuumtechnologie hergestellten Prüfplatten.



## 5.5 Zusammenfassung

Thermogravimetrische Analyse an den Naturfasern ergänzt mit Pressversuchen bei höheren Temperaturen haben gezeigt, dass Temperaturen zwischen 150 °C und 200 °C unbedenklich für die Verarbeitung von Naturfasern sind, während eine Werkzeugtemperatur von 230 °C, auch bei sehr kurzen Presszeiten von ca. 45 Sekunden, zu starken Färbungen der Bauteile führt. Dies deutet auf die ersten Ansätze der thermischen Degradation der Fasern hin. Eine Temperatur von 200 °C sollte bei der Verarbeitung von Hanf- und Kenaffasern nicht überschritten werden.

Die Abhängigkeit der Eigenschaften naturfaserverstärkter Kunststoffe vom Pressdruck wurde untersucht. Die Eigenschaften der Verbunde zeigten eine deutliche Abhängigkeit von den Pressparametern. Bei einem Pressdruck zwischen 15 und 60 bar wurde eine stetige Verbesserung der Verbundeigenschaften festgestellt, wobei bei 60 bar die maximalen Werte erreicht wurden. Bei einem höheren Pressdruck (80 bis 200 bar) fand eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften statt. Durch die Charakterisierung der Mikrostruktur der Fasern im Verbund mittels REM-Analyse konnte ein qualitativer Zusammenhang zwischen der Struktur der Fasern und den Eigenschaften des Verbundes festgestellt werden. Die Verschlechterung der Eigenschaften lässt sich durch eine Schädigung der Faserstrukturen erklären. Schon bei 60 bar konnten die ersten geschädigten Hanffasern gefunden werden, die aufgrund ihrer dünneren Zellwand zuerst zerstört wurden. Ab 80 bar war auch die stärkere Struktur der Kenaffasern teilweise geschädigt. Pressdrücke von 60 bar sollten daher nicht überschritten werden.

Für die Verarbeitung von naturfaserverstärkten Kunststoffen wurde eine neue Technologie erprobt, die es erlaubte, die Presse unter Vakuum zu betreiben. Durch den Einsatz der Vakuumtechnologie konnte das Pressverfahren durch exakte Reproduzierbarkeit und bessere Rahmenbedingungen deutlich verbessert werden. Weiterhin wurde eine wirtschaftlichere Fertigung von Bauteilen möglich, da aufgrund eines verbesserten Wärmeübergangs zwischen Werkzeug und Formteil, höheren Werkzeugtemperaturen und Einsparungen von zeit- und energieintensiven Lüftungen die Zykluszeiten pro Bauteil um bis zu 50 % reduziert wurden.

Die Qualität von naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffen mit geringem Polymeranteil wurde soweit optimiert, dass sie die hohen Anforderungen der Automobilindustrie für ihren Einsatz im Automobilinnenbau erfüllen.

## 6 Verarbeitung zu dreidimensionalen Bauteilen

### 6.1 Verarbeitung zu Automobilbauteilen

Neben den mechanischen Eigenschaften, der Wasseraufnahme oder den Emissionswerten sind die Verarbeitungseigenschaften, insbesondere die Drapierfähigkeit des Materials, von entscheidender Bedeutung. Bei der Herstellung von Bauteilen mit hohem Umformgrad - üblich für Automobilbauteile - können an den Kanten, Ecken und Winkeln Ausdünnungen durch Faserverzug auftreten. Um die Drapierfähigkeit des Halbzeugs zu analysieren, wurden neben der Herstellung von Prüfplatten auch Halbzeuge, in Zusammenarbeit mit Systemlieferanten auf Serienwerkzeugen unter Serienbedingungen zu diversen Bauteilen weiterverarbeitet (Bild 6.1). Dabei soll die Verformungsfähigkeit nach Verformungsgrad, Dehnung, Steckungsverhalten etc. geprüft werden.

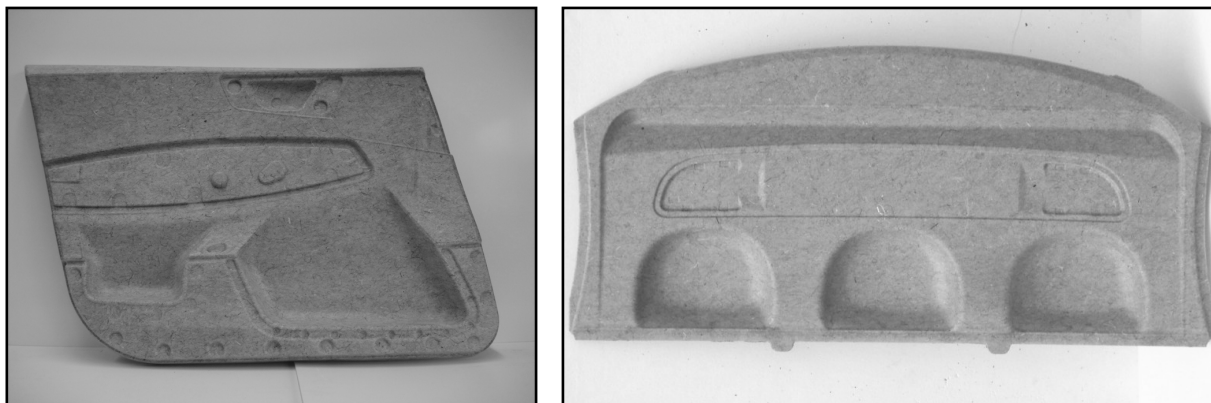


Bild 6.1: Auf Serienanlagen unter Serienbedingungen hergestellte Bauteile, Türverkleidung BMW (Polytec GmbH) und Hutablage (Borges GmbH & Co. KG)

Die Bauteile wurden aus der Presse entnommen und zeigten nach dem Abkühlen keinen offensichtlichen Verzug oder Verformungen. Die technischen Prüfungen erfüllten die Anforderungen der technischen Lastenhefte. Der Einsatz des Materials ermöglicht eine Gewichtsreduktion der Bauteile um ca. 15% im Vergleich zu dem bisher eingesetzten Material. Besonders positiv wurde dabei die im Vergleich zu phenolharzgebundenen Bastfasermatten verringerte Geruchsbelästigung empfunden. Positiv zu bemerken ist auch die bei der Vliesherstellung verfolgte Reduktion der eingesetzten Materialarten. Konventionell wird zur Stabilisierung der Matten entwe-

der ein Anteil von 10 – 20 Gew.-% synthetischer Fasern in die Vliese eingemischt oder einseitig oder gar beidseitig ein Polyester-Spinnvlies aufgenadelt. Bei den hier untersuchten Halbzeugen wurden neben der Matrix ausschließlich Hanf- und Kenafasern eingesetzt. Ein weiterer Vorteil bei der Verarbeitung der neuartigen Halbzeuge ist die deutlich geringere Zykluszeit. Bei den untersuchten Pressparametern konnten Zykluszeiten von 45 – 60 s pro Bauteil realisiert werden.

## **6.2 Verarbeitung zu nicht Automobilbauteilen**

Die Einsatzbereiche naturfaserverstärkter Kunststoffe sollten sich aber nicht nur auf Automobilanwendungen begrenzen. Immer mehr Anwendungsmöglichkeiten für NF-Verbunde neben der Automobilindustrie werden geprüft und untersucht (s. Kap. 2.4). Auch an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH wurden neben den Prüfplatten diverse Demobauteile wie Aktenkofferhalbschalen und Serviertabletts hergestellt.

Zur Herstellung der Kofferhalbschalen wurde auf einer hydraulischen Presse mit einer maximalen Presskraft von 800 kN ein beheiztes Aluminiumwerkzeug mit einer Innenfläche von 450 x 300 mm<sup>2</sup> und einer Kavität von 1,5 mm im Formpressverfahren eingesetzt (Bild 6.2 links). Die Halbzeugzuschnitte wurden zwischen die zwei auf 200 °C geheizten Werkzeugplatten bei einem Flächendruck von 20 bar 60 Sekunden lang gepresst.

Zusätzlich zu den Kofferhalbschalen wurden Versuche zur Herstellung von Serviertabletts durchgeführt. Auf einer servohydraulischen, parallelgeregelten Presse, mit einer maximalen Presskraft von 8000 kN, wurde dazu ein elektrisch beheizbares Stahlwerkzeug eingesetzt (Bild 6.2 rechts). Das Parallelhaltesystem ermöglicht die Herstellung großflächiger Teile mit sehr geringen Dickenabweichungen von weniger als 0,02 mm. Da Serviertabletts über eine große Stabilität und hohe Bauteilsteifigkeit verfügen sollen, wurden bei ihrer Herstellung zwei übereinander liegende Halbzeuge bei einem Flächendruck von 60 bar und einer Presshaltezeit von 60 s zusammen verpresst.

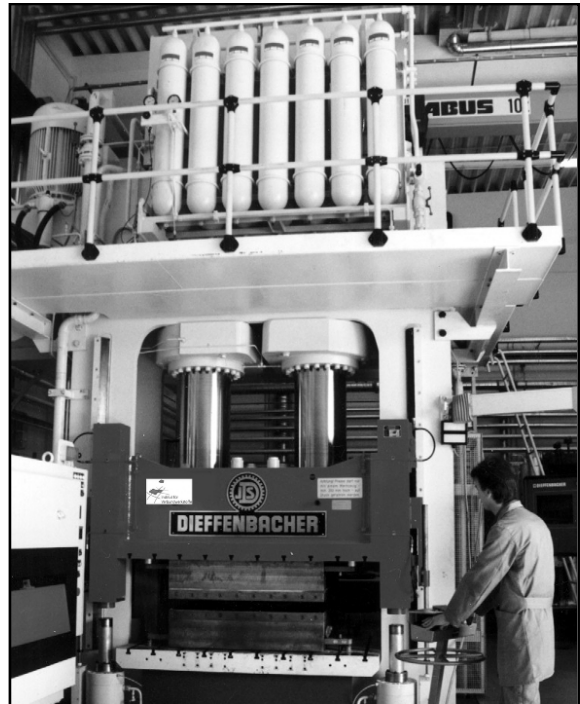


Bild 6.2:       Hydraulische Umformpresse (links) und Parallelgeregelt Bauteil-  
                  presse (rechts)

Sowohl die Serviertabletts als auch die Kofferhalbschalen konnten einwandfrei hergestellt werden. Aus den Kofferhalbschalen (Bild 6.3 links) konnte Aktenkoffer angefertigt werden (Bild 6.3 rechts).

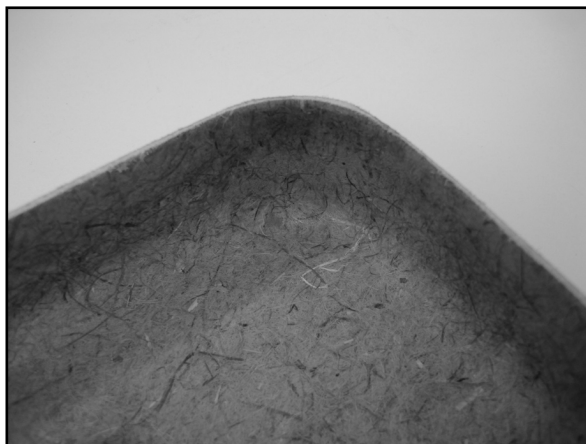


Bild 6.3:       Detail einer Ecke einer Kofferhalbschale (links) und fertiger Aktenkof-  
                  fer (rechts)



## 7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffes mit einem niedrigen Matrixanteil. Neben der Zusammensetzung des Halbzeuges wurden die Pressparameter an die Naturfasern angepasst und optimiert.

Hanf- und Kenaffasern wurden mechanisch und morphologisch charakterisiert. Die mechanischen Eigenschaften beider Fasern erreichen die Kennwerte von Flachs und werden durch die gleichen Bruchmechanismen beschrieben. Beide Fasersorten bieten deshalb eine reale, sinnvolle Alternative zu Flachsfasern in Verbundwerkstoffen, da sie durch ihren gezielten Anbau die geforderte Qualitätskonstanz in der Automobilbranche sicherstellt. Zusätzlich bieten sie stabile Marktpreise, da die technischen Kurzfasern unabhängig vom Export und vom Wettbewerb mit der Textilindustrie sind.

Ausgewählte Matrixsysteme mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen wurden mittels eines Foulards, die am meisten verbreiterte Imprägniertechnik in der Textilveredelung, auf ein vernadeltes Naturfaservlies appliziert. Die Reproduzierbarkeit des Imprägnierverfahrens wurde untersucht. Die Applizierung des Polymers auf die Vliese und die Verarbeitung zum Bauteil im Formpressverfahren konnten erfolgreich für alle untersuchten Systeme umgesetzt werden. Beim Imprägnierungsverfahren verteilte sich die Matrix in kleinen Partikeln zwischen den Fasern, so dass beim Pressverfahren eine sehr gleichmäßige Verteilung der Matrix und somit eine gute Konsolidierung des Bauteils trotz des geringen Matrixanteils erreicht wurde.

Der Einfluss der Pressparameter auf die Verarbeitung von naturfaserverstärkten Kunststoffen wurde untersucht. Thermogravimetrische Analysen der Fasern, ergänzt durch Pressversuche, zeigten, dass die maximale Verarbeitungstemperatur von 200 °C nicht überschritten werden sollte, da schon bei sehr geringen Presszeiten von 45 Sekunden erste Hinweise auf eine thermische Degradation der Naturfasern zu erkennen sind. Die Eigenschaften der Verbunde zeigen eine deutliche Abhängigkeit vom Pressdruck. Bei einem Pressdruck zwischen 15 und 60 bar wurde eine stetige Verbesserung der mechanischen Eigenschaften festgestellt, wobei bei 60 bar die maximalen Werte erreicht wurden. Bei höherem Pressdruck von bis zu 200 bar konnte eine Minderung der mechanischen Kennwerte festgestellt werden. Diese Verringe-

Die Veränderung der Eigenschaften lässt sich durch die Schädigung der Faserstrukturen erklären. Die Pressparameter müssen deshalb in Abhängigkeit vom Anwendungszweck optimiert werden, ohne einen maximalen Flächendruck von 60 bar zu überschreiten.

Eine neue Technologie wurde getestet, die das Pressen unter Vakuum gestattet. Diese Technologie wird normalerweise in der Gummiindustrie eingesetzt. Innerhalb dieser Arbeit wurde die Vakuumkammer beim Pressen von naturfaserverstärkten Kunststoffen eingesetzt und deren Einfluss analysiert. Durch den Einsatz der Vakuumtechnologie im Pressverfahren verbessern sich zum Einen die Arbeitsbedingungen durch die Eliminierung des Dampfstoßes, zum Anderen kann die Presszeit ohne Einbußen in den mechanischen Eigenschaften des Verbundes um die Hälfte reduziert werden. Somit erlaubt die Anwendung dieser neuen Technologie eine signifikante Verbesserung sowohl der Produktionsbedingungen als auch der Produktionskosten. Außerdem konnte eine bessere Oberflächenqualität des Verbundes erreicht werden.

Die ermittelten mechanischen Eigenschaften des Verbundes befanden sich auf dem Niveau von etablierten gebundenen Naturfasern, obwohl das hier eingesetzte Halbzeug nur einen geringen Anteil von ca. 20 Gew.-% an Bindemitteln aufweist. Die vergleichbar guten mechanischen Eigenschaften des Verbundes sind auf die gute Verteilung der Matrix im Halbzeug und auf die gute Faser-Matrix-Haftung zurückzuführen. Die Eigenschaften der Bauteile erfüllten trotz des geringen Matrixanteils die Anforderungen aus den Lastenheften für naturfaserverstärkte Kunststoffe für die Verwendung im Fahrzeuginnenraum. Ein weiterer Vorteil bei der Verarbeitung der neuen Halbzeuge sind die kurzen Zykluszeiten, da im Gegensatz zu thermoplastisch gebundenen Halbzeugen Duroplaste keine zusätzlichen Vorheizprozesse benötigen. Im Rahmen dieser Arbeit sind Prozesszeiten beim Pressen dreidimensionaler Bauteile mit hohem Umformgrad von weniger als eine Minute erreicht worden.

Der vorgestellte, vielfältig einsetzbare Verbundwerkstoff sollte nicht nur auf Automobilanwendungen begrenzt sein, sondern kann auch für Produkte anderer Industriezweige eingesetzt werden, wie an den Beispielen Aktenkoffer und Serviertablett gezeigt wurde.



## 8 Literatur

- [1] Karus, M.: Rohstoffwende - Die Suche der Industrie nach Erdölunabhängigen Rohstoffen, 9. Internationale AVK-Tagung für verstärkte Kunststoffe und technische Duroplaste, Essen, 2006, S. P2-1 – P2-16
- [2] Schilling, Th.: Innovative Werkstoffe am Beispiel des Volkswagen-Fox. Einsatz von Naturfasern bei Volkswagen do Brasil, VDI – Tagungshandbuch Kunststoffe im Automobilbau, Mannheim, 2006, S. 55-63
- [3] Riedel, U.: NF Werkstoffe - Aktuelle Anwendungen und Perspektiven, DGM-Tagung, Bremen, 2007
- [4] Willmeroth, G.: Technologies for the Use of Natural Fibre Reinforced Polyurethane for Serial Productions in the Automotive Industry, 4<sup>th</sup> International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 2002
- [5] Specht, K.; Bledzki, A.-K.; Fink, H.-P.; Kleinholz, R.: Structural Optimized Natural Fiber/PP Composites for Automotive Interiors, 4<sup>th</sup> International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 2002
- [6] Ruch, J., Fritz, H.-G.: Polypropylen Flachsfaser-Composites für den Automobilsektor: Generierung, Verarbeitung und Eigenschaftsprofile, 4<sup>th</sup> International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 2002
- [7] Gliesche, K.; Mäder, E.: Langfaserverstärkte Kunststoffe auf der Basis von Naturfasern, Techtexil-Symposium, 1995
- [8] Martins, M.-A.; Kiyonhara, P.-K.; Joekes, I.: Scanning Electron Microscopy Study of Raw and Chemically Modified Sisal Fibers, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 94, 2004, S. 2333-2340
- [9] Bastian, M.; Radovanic, I.; Kurda, K.: Einfluss der Haftvermittler, Kunststoffe 8, 2005, S. 49-53
- [10] Bledzki, A.-K.; Gassan, J.: Einfluss von Haftvermittlern auf das Feuchteverhalten naturfaserverstärkte Kunststoffe, Die Angewandte Makromolekulare Chemie 236, 1996, S. 129-138

- [11] Mieck, K.; Nechwatal, A.; Knobelsdorf, C.: Faser-Matrix-Haftung in Kunststoffverbunden aus thermoplastischer Matrix und Flachs, Die Angewandte Makromolekulare Chemie 224, 1995, S. 73-88
- [12] Gassan, J.; Dietz, T.; Bledzki, A.-K.: Kennwerte verbessern, Plastverarbeiter 49, JNr. 4, 1998, S. 98-100
- [13] Gassan, J.; Bledzki, K.: Möglichkeiten zur Kontrolle der Festigkeit und Impactzähigkeit in naturfaserverstärkten Kunststoffen, 2<sup>nd</sup> International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 1999
- [14] Nechwatal, A.; Lütkenhof, R.; Reußmann, T.: Entwicklung neuer Technologien zur Verbesserung des Leistungsvermögens von Naturfaser-Verbundwerkstoffen, 6. Internationale AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen, Baden-Baden, 2003
- [15] Münker, M.; Holtmann, R.; Michaeli, W.: Verbesserung der Faser/Matrix-Haftung von naturfaserverstärkten Polyesterlaminaten, 28. Internationale AVK-Tagung, Baden-Baden, 1997
- [16] Köhler, E.; Odenwald, S.; Bergner, A.: Naturfasergerechte Konstruktion. Bauweisen und Materialauswahl, 3. Internationales Symposium Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, Erfurt, 2001
- [17] Neitzel, M.; Mitschang, P.: Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, München: Carl Hanser Verlag, 2004
- [18] AVK-TV Handbuch 2004, Band II, Werkstoffe und ihre Herstellung, Frankfurt: Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe-Technische Vereinigung e.V., 2004
- [19] Beckmann, A; Kleinholz, R.: Anforderungen an Naturfasern aus der Sicht eines Kfz-Zulieferers für Innenraumteile. 2<sup>nd</sup> International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Institut für Werkstofftechnik Kunststoff und Recyclingtechnik Universität Gesamthochschule Kassel (Ed.), Kassel, 1999, S 30-1 – 30-10

- [20] Müssig, J.; Herrmann, A.: Träger im KFZ-Innenraum – Qualität und Konstruktion aus der Sicht der Entwicklung und des Engineering, Workshop zur Agri-technica Nachwachsende Rohstoffe in hochwertigen Anwendungen, Hannover, 2001
- [21] Eversmann, B.; Nickel, J.; Riedel, U.: Naturfaserverbundwerkstoffe für Automobilinnenverkleidungen, 5. Internationale AVK-TV Tagung, Baden-Baden, 2002, S. D7-1 – D-8
- [22] Karus, M.; Kaup, M.: Naturfasereinsatz in der europäischen Automobilindustrie, Technische Textilien, Jhrg. 44, 11, 2001, S.258-262
- [23] Karus, M.; Ortmann, S.; Gahle, C.; Pendarovski, C.: Einsatz von Naturfasern in Verbundwerkstoffen für die Automobilproduktion in Deutschland von 1999 bis 2005, Hrsg. Nova Institut, 2006
- [24] Greiner, R.: Naturfaser - Exterieur Anwendungen im Automobilbau, VDI – Tagungshandbuch Kunststoffe im Automobilbau, Mannheim, 2006, S. 145-156
- [25] Nova Institut GmbH, Abteilung Nachwachsende Rohstoffe / Marktforschung und Ökonomie, 2007
- [26] Ortmann, S.; Karus, M.: Die Preisentwicklung bei technischen Naturfasern, Energiepflanzen, 2, 2006, S. 43-44
- [27] Bültjer, U.: Produktion von GFK und technischen Duroplasten 2005-2006 in Europa, 9. Internationale AVK-Tagung, Essen, 2006, S. P3-1 – P3-10
- [28] Karus, M.; Ortmann, S.; Vogt, D.: Naturfasereinsatz in Verbundwerkstoffen in der deutschen Automobilproduktion 1996 bis 2003, Hrsg. Nova Institut, 2004
- [29] Karus, M. (v.i.S.d.P.): Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK). Wir stellen Ihnen eine neue Werkstoff-Klasse vor, 2006 (unter <http://www.nova-institut.de/pdf/Road-Show-Broschuere.pdf>, Juli 2007)
- [30] Deutsche Norm DIN 60001-1 Textile Faserstoffe, Teil 1: Naturfasern und Kurzzeichen, Mai 2001

- [31] Bobeth, W. (Hrsg.): Textile Faserstoffe, Beschaffenheit und Eigenschaften, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1993
- [32] Schnegelsberg, G.: Handbuch der Fasern: Theorie und Systematik der Fasern, Frankfurt am Main: Deutscher Verlag, 1999
- [33] Müssig, J.: Untersuchung der Eignung heimischer Pflanzenfasern für die Herstellung von naturfaserverstärkten Duroplasten – vom Anbau zum Verbundwerkstoff, Fortschritts-Berichte VDI Reihe 5, Nr. 630, Düsseldorf, Universität Bremen, 2001
- [34] Sperber, V.: Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Holz- und Naturfaser Verbundwerkstoffe, 4<sup>th</sup> International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 2002
- [35] Schnijder, M.: Facts and Myths on agrofibre composites- a techno-economic outlook on the granulates' production process, 5<sup>th</sup> Global Wood and Natural Fibre Composite Symposium, Kassel, 2004
- [36] Lampke, T.: Beitrag zur Charakterisierung naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe mit hochpolymer Matrix, Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2001
- [37] Widdecke, H.; Marek, A.: Herstellung von Polypropylen-Naturfasercomposites, 3. Internationales Symposium Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen, Erfurt, 2001
- [38] Ohnishi, K.; Umeoka, K.; Okudaira, Y.; Zhang, Mi.; Kawai, S.: Development of Kenaf Boards and Their Properties, Proceedings of the International Kenaf Symposium, Beijing, China, 2003, S.175-188
- [39] Franck, R.: Bast and other plant fibers, Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2005
- [40] Schnijder, M.: Facts and Myths on agrofibre composites- a techno-economic outlook on the granulates' production process, 5<sup>th</sup> Global Wood and Natural Fibre Composite Symposium, Kassel, 2004

- [41] Baumgartl, H.; Schlarb, A.: Naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe, 2. Symposium Nachwachsende Rohstoffe – Perspektiven für die Chemie, Frankfurt am Main, 1993
- [42] Sederoff, R.-R.; MacKay, J.-J.; Ralph, J.; Hatfield R.-D.: Unexpected variation in lignin, *Current Opinion in Plant Biology*, 1999, 2, S. 145–152
- [43] Haudek, H.-W.; Viti, E.: Textilfasern, Melliand Textilberichte KG, Heidelberg, 1980
- [44] Schönefeld, H.: Bastfasern, Leipzig: Fachbuchverlag, 1955
- [45] Herzog, R.-O.: Technologie der Textilfasern, V Band, 2. Teil, Hanf und Hartfasern, Berlin: Julius Springer Verlag, 1927
- [46] Konermann, M.; Vetter, R.; Mediavilla, V.: Prüfung des Anbaus von Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) in Baden-Württemberg und der Schweiz, Tagungsband zum VDI-MEG Kolloquium Erzeugung, Aufbereitung und Verarbeitung von Naturfasern für nichttextile Zwecke beim 3. Bonner Flachstag, 1997
- [47] N.N.: Kenaf die wärmeliebende Faserpflanze, Merkblätter für die Umweltgerechte Landwirtschaft, Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim, Nr. 9, November 1995
- [48] Bledzki, A.-K.; Gassan, J.: Einfluss von Haftvermittlern auf das Feuchteverhalten naturfaserverstärkte Kunststoffe, *Die Angewandte Makromolekulare Chemie* 236, 1996, S. 129-138
- [49] Mieck, K.; Nechwatal, A.; Knobelsdorf, C.: Faser-Matrix-Haftung in Kunststoffverbunden aus thermoplastischer Matrix und Flachs, *Die Angewandte Makromolekulare Chemie* 224, 1995, S. 73-88
- [50] Gassan, J.; Bledzki, K.: Möglichkeiten zur Kontrolle der Festigkeit und Impactzähigkeit in naturfaserverstärkten Kunststoffen, 2<sup>nd</sup> International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 1999

- [51] Nechwatal, A.; Lütkeford, R.; Reußmann, T.: Entwicklung neuer Technologien zur Verbesserung des Leistungsvermögens von Naturfaser-Verbundwerkstoffen, 6. Internationale AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen, 2003, Baden-Baden, S. B5-1 – B5-14
- [52] Vogel, J.; Fiedler, L.; Ilisch, S.; Marinow, S.-I.: Wasseraufnahme und mechanische Eigenschaften von Poly(oyethylen), Polymerwerkstoffe 98, 1998
- [53] Madsen, B.: Properties of Plant Fibre Yarn Polymer Composites, Department of Civil Engineering, Ed. Technical University of Denmark, 2004
- [54] Beckmann, A; Kleinholz, R.: Anforderungen an Naturfasern aus der Sicht eines Kfz-Zulieferers für Innenraumteile. Proceedings 2<sup>nd</sup> International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 1999, S. 30-1 – 30-10.
- [55] Stamboulis A.; Baillie, C.-A.; Peijs, T.: Effects of Environmental Conditions on Mechanical and Physical Properties of Flax Fibers, Composites Part A, 32, 2001, S. 1105-1115
- [56] Karmaker, A.C.: Effect of Water Absorption on Dimensional Stability and Impact Energy of Jute Reinforced Polypropylene, Journal of Material Science Letters, 16, 1997, S. 462-464
- [57] Chow, C.; Li, R.: A Study of the Mechanical Properties of Sisal Fiber Reinforced Polypropylene Composites after Moisture Absorption, EcoComp, London, 2003
- [58] Bernal, C.; Cabral, H.; Vazquez, A.: Mechanical properties of jute-PP composites, 10<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials (ECCM-10), Brugge (Belgium), 2002,
- [59] Bledzki, A.; Gassan, J.; Theis, S.: Wood-filled Thermoplastic Composites, Mechanics of Composite Materials, Vol. 34, No. 6, 1998, S. 795-802
- [60] Bledzki, A.; Gassan, J.: Composites Reinforced with Cellulose Base Fibres, Progress in Polymer Science, 24, 1994, S. 221-274

- [61] Peijs, T.; van Melick, H.-G.-H.; Garkhail, S.-K.; Pott, G.-T.; Baillie, C.-A.: Natural-fibre-mat-reinforced thermoplastics based on upgraded flax fibres for improved moisture resistance, ECCM-8; Naples (Italy), 1998
- [62] Joseph, P.-V.; Rabello; M.-S.; Maattoso, L.-H.-C.; Joseph, K.; Thomas, S.: Environmental Effects on the Degradation Behaviour of Sisal Fiber Reinforced Polypropylene Composites, Composites Science and Technology, 62, 2002; S. 1357-1372
- [63] Fölster, T.: Nachwachsende Rohstoffe in technischen Anwendungen am Beispiel Fasern / Vliese, Textilveredlung, Band 30, Heft ½, 1995, S. 2-8
- [64] Herren, S.; Höck, P.; Grefenstein, A.; Kocker, K.; v. Marwick, J., Michaeli, W.: Kontinuierliche Aufbereitung neuer Werkstoffsysteme (Teil III Aufbereiten). Kunststoffberater, Band 39, Heft 5, 1994, S. 31-33
- [65] Aichholzer, W.: Flachs als Verstärkungsfasern in bioabbaubaren Polymerwerkstoffen, Konferezenzelbericht 14, Stuttgarter Kunststoff Kolloquium, Stuttgart, 1995
- [66] Müssig, J.; Mehlich, J.: Faseraufschluss und Verarbeitung von Hanf. Möglichkeiten der Beeinflussung von Fasereigenschaften für den Einsatz in Dämmprodukten, Seminar Bau- und Dämmstoffe aus Hanf: Technik, Bremen, 1998
- [67] Karus, M.; Kaup, M.: Naturfasereinsatz in der europäischen Automobilindustrie. Technische Textilien, Jhrg. 44, 11, 2001, S.258-262
- [68] Karus, M.; Kaup, M.; Knöbl, S.; Müssig, J.; Ortmann, S.: Naturfasereinsatz in Verbundwerkstoffen in der deutschen und österreichischen Automobilindustrie, 6. Internationale AVK-TV Tagung, Baden-Baden, 2003, S. B2-1 – B2-10
- [69] Prömper, E.; Bogdanov, N.; Kreitlow, R.: Neue Automobil-Interior-Bauteile aus nachwachsenden Rohstoffen, 7. International AVK-TV Tagung, Baden-Baden, 2004, S. B 12-1 bis B 128

- [70] Breitel, J.; Wöginger, A.; Lahr, R.; Schledjewski R.; Mitschang P.: Stempelumformen naturfaserverstärkter Thermoplasthalbzeuge, 10. Internationale Chemnitzer Tagung Stoffliche Verwertung nachwachsender Rohstoffe, Chemnitz, 2002, S. 175-177
- [71] Merten, T.: Akustisch wirksame Vliesstoffe für die Automobil-Innenverkleidung. Technische Textilien. 43, 3, 2000, S. 36-40
- [72] Bültjer, U.: Produktion von GFK und duroplastischen Formmassen in Europa, 5. Internationale AVK-TV Tagung, Baden-Baden, 2002
- [73] N.N.: Nachwachsende Rohstoffe im Automobilbau, Information der BMW Group, 2002
- [74] Breitling, T.: Die Retter der Kokosnuss, ACE Lenkrad 9, 2004, S. 30-32
- [75] Claar, K.-P.; Hoehl, K.; Weber, H.; Schmidt, G.; Schultz, R.; Mudnic, S.: Fahrzeugkonzept, Die neue C-Klasse von Mercedes-Benz, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, April 2007
- [76] N.N: Umwelt-Zertifikat Mercedes-Benz C-Klasse, Herausgeber: DaimlerChrysler AG, Mercedes Car Group, Stuttgart, 2007
- [77] N.N: Umwelt-Zertifikat Mercedes-Benz S-Klasse, DaimlerChrysler AG, Mercedes Car Group, Stuttgart, 2006
- [78] Flake, M. (Hrsg.): Ökologische Bewertung des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe für Verkleidungskomponenten im Automobilbau - Lebensweganalyse verschiedener Faserverbundwerkstoffe, Landschaftsökologie und Umweltforschung, Heft 34, Selbstverlag Institut für Geoökologie der Technischen Universität Braunschweig, 2000
- [79] Schmehl, M.; von Buttlar, H.-B.; Dippon, K.; Müssig, J.; Schönfeld, U.: Ökobilanz eines Karosseriebauteils auf der Basis nachwachsender Rohstoffe, 9. International AVK-Tagung, Essen, 2006, S. A4 - 1 – A4 – 12



- [80] Flake, M.; Fleissner, T.; Hansen, A.: Ökologische Bewertung des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe für Verkleidungskomponenten im Automobilbau, Lebensweganalyse verschiedener Faserverbundwerkstoffe, Heft 34, Selbstverlag Institut für Geographie und Geoökologie der Technischen Universität Braunschweig, 2000
- [81] Riedel, U.; von Löwis of Menar, T.; Wurl, T.: Bioconcept-Car, 9. Internationale AVK-Tagung, Essen, 2006, S. A3-1 – A37
- [82] Riedel, U.; Nickel, J.: Konstruktionswerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (BioVerbunde), 3. Internationale AVK-TV Tagung, Baden-Baden, 2000,
- [83] Köhler, E.; Odenwald, S.; Bergner, A.: Naturfasergerechte Konstruktion. Bauweisen und Materialauswahl, 3. Internationales Symposium Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, Erfurt, 2001,
- [84] Wonneberger, M.; Möker, R.: Messebauelemente aus naturfaserverstärkten Werkstoffen, 6. RIKO-Veranstaltung Neue faserverstärkte Produkte – vielseitig und funktionssicher, Göttingen, 2004
- [85] Reimer, L.; Wonneberger, M.: Nachwachsende Rohstoffe im Modellflugzeugbau, 8. RIKO-Veranstaltung Mit nachwachsenden Rohstoffen zu Hochleistungen, Göttingen, 2006
- [86] Müller, M.; Sedlacik, G.; Bergner, A.: Rotorblätter für Windkraftanlagen in naturfasergerechter Bauweise. 10. Internationale Tagung Stoffliche Verwertung nachwachsender Rohstoffe, Chemnitz, 2002
- [87] Wurl, T.; Lettmann, K.: Kanadier – Nachwachsende Rohstoffe im Bootsbau, 6. RIKO-Veranstaltung Neue faserverstärkte Produkte – vielseitig und funktionssicher, Göttingen, 2004
- [88] Nickel, J.; Meinel, F.; Pranghofer, S.: Synergien zwischen BioVerbund - Forschung und Produktdesign, 7. Internationale AVK-TV Tagung, Baden-Baden, 2004, S. B9-1 – B9-12
- [89] Riedel, U.; Nickel, J.; Wonneberger, M.: Bio-Verbunde im Schienenfahrzeugbau, 6. Internationale AVK-TV Tagung, Baden-Baden, 2003

- [90] Riedel, U.: Aus für naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe nicht nur im Automobilbau? Altautorichtlinie – Konsequenzen für den Automobilbau der Zukunft, Fachkonferenz für die Automobilindustrie, Köln, 2001
- [91] Wichmann, H.; Wurl, T.; Wonneberger, M.: Perspektiven von KWST a.n.R. in den Bereichen Bootsbau sowie Boden- und Wandsysteme, Konstruktionswerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Nachhaltige Mobilität – Naturfaserverwerkstoffe für die Verkehrstechnik, Hannover, 2003
- [92] Norm ASTM D 3379-75: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials, 1989
- [93] Biagiotti, J.; Fiori, S.; Torre, L.; Lopez-Manchado, M.-A.; Kenny, J.-M.: Mechanical Properties of Polypropylene Matrix Composites Reinforced with Natural Fibers: a Statistical Approach, Polymer Composites, Vol. 25, No. 1, February 2204, S. 26-36
- [94] Cheney, T.; Thomanson, J.; Willians, J.: Injection Mouldable Long Natural Fibre Reinforced Polypropylene for Automotive Applications, 5. Internationale AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen, Baden-Baden, 2002
- [95] Morimoto, T.; Yamamoto, K.; Ogihara, S.: Strength Improvement on an Imaginary SiC Fiber of Ideal Diameter and Reduced Internal Defects Estimated from the Weibull Scaling of Tyranno ZMI Fiber, JSME International Journal, Series A; Vol. 49, No. 1, 2006
- [96] Boss, H.; van den Oeven, M.; Molenveld, K.: Flax Reinforced Plastics, The Influence of Fibre Structure on Composite Properties, 5<sup>th</sup> Global Wood and Natural Fibre Composite Symposium, Kassel, 2004
- [97] Stoner, E.G.; Edie, D.-D.; Durham, S.-D.: An end-effect model for the single-filament tensile test, Journal of Materials Science 29, 1994, S. 6561-6574
- [98] Paiva, M.-C.; Bernardo, C.-A.; Edie, D.-D.: A comparative analysis of alternative models to predict the tensile strength of untreated and surface oxidised carbon fibers, Carbon 39, 2001, S. 1091-1101

- [99] Peterlik, H.: The validity of the Weibull estimators, *Journal of Materials Science* 30, 1995, S. 1972-1976
- [100] Romhány, G.; Karger-Kocsis, J.; Czigány, T.: Tensile Fracture and Failure Behavior of Technical Flax Fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 90, 2003, S. 3638-3645
- [101] Acha, B.; Marcovich, N.; Reboredo, M.: Physical and Mechanical Characterization of Jute Fabric Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 98, 2005, S. 639-650
- [102] Wuttke, B.: *Flachsfaserverstärkten Polypropylen – Mikromechanik und Wasseraufnahmeverhalten*, Berlin: Technischen Universität Berlin, 1996
- [103] Paiva, M.C.; Ammar, I.; Campos, A.R.; Cheikh, R.B., Cunha, A.M.: Alfa fibres: Mechanical, morphological and interfacial characterization, *Composites Science and Technology*, 67, 2007, S. 1132-1138
- [104] Domininghaus, H.: *Die Kunststoff und ihre Eigenschaften*, 5. Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 1998
- [105] Lünenschloß, J. (Hrsg.); Albrecht, W. (Hrsg.): *Vliesstoffe*, Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag, 1982
- [106] Brandau, E.: *Duroplastwerkstoffe. Technologie, Prüfung, Anwendung*, Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1993
- [107] Echte, A.: *Handbuch der Technischen Polymerchemie*, Weinheim: VCH, 1993
- [108] Börzel, H.: *Acrodur<sup>®</sup>, die ökologische Alternative zu duroplastischen Standard-Bindemitteln*, Hofer Vliesstofftage, 2005
- [109] Schönberger, H.; Schäfer, T.: *Beste verfügbare Techniken in Anlagen der Textilindustrie*, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungsbericht 200 94 329, UBA-FB 000325, Umweltbundesamt, 2003

- [110] Medina L., Schledjewski R., Lahm M., Jungmann H.: Innovative Naturfaserhalbzeuge für Automobilanwendungen, 5<sup>th</sup> Global Wood and Natural Fiber Composites Symposium, Kassel, 2004, S. B7-1 B7-8
- [111] Cescutti, G.; Schachtschneider, H.; Müller, D.-H.; Müssig, J.: Akustische und mechanische Eigenschaften von naturfaserverstärkten Werkstoffverbunden, 5. Internationale AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen, Baden-Baden, 2002
- [112] Wuzella, G.: Ein neuartiger Verbundwerkstoff aus Naturfasern und einem Duroplasten- Technologie, Anwendungen und Eigenschaften, 9. Internationale AVK-Tagung für verstärkte Kunststoffe und technische Duroplaste, Essen, 2006
- [113] Eversmann, B.; Nickel, J.; Riedel, U.: Natural fibre reinforced plastics for a car interior paneling, 5. Internationale AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen, Baden-Baden, 2002, S. D7-1 – D7-8
- [114] DIN 53 495 „Bestimmung der Wasseraufnahme“, April 1984
- [115] Wickert Maschinenbau GmbH, 2006
- [116] N.N.: Für mehr Effizienz bei Vakuumkammerpressen: Pumpe-Speicher-Kombination, Wickert Press, Ausgabe 2, 2000, S.4
- [117] Schwarz, O.; Ebeling, F.-W.; Furth, B.: Kunststoffverarbeitung, Vogel Buchverlag, 7. Auflage, Würzburg, 1997
- [118] N. N.: Groß, Größer, am Größten: Vakuumkammerpresse für Groß-Dichtungen, Wickert Press, Ausgabe 1, 2001, S. 1
- [119] N. N: Reinraum-Vakuum-Kammer-Pressen zur O-Ringproduktion, Wickert Press, Ausgabe 2, 2002, S.4
- [120] Wickert Maschinenbau GmbH, <http://www.wickert-presstech.de/prospekte/Prospekt%20WKP%20Gummi-D.pdf> (Juli 2007)
- [121] Bullert, J.; Elfrath, T.: Emissionen aus Polypropylen, Fachtagung Fortschritte mit Polypropylen in Kfz-Bereich, Würzburg, 1998, S. B1-B17

- [122] Bledzki, A.-K.; Sperber, V.-E.; Wolff, S.: Measurement and Reduction of Odours of Natural Fiber Filled Materials Employed in the Automotive Industry, 7<sup>th</sup> International Conference on Woodfiber-Plastic Composites (and other natural fibers), Madison, Wisconsin (USA), 2003
- [123] Schwarzer, P.; Goeldenitz, J.: Emissionen aus Materialien in Kfz-Innenräumen. Ursachen, Maßnahmen und aktuelle Entwicklungen zur Gesetzgebung in Japan und China, VDI-Tagungshandbuch Kunststoffe im Automobilbau, Mannheim, 2006, S. 71-87
- [124] Merten, T.: Geruchsproblematik bei naturfaserbasierten Automobilinnenverkleidungen, 4<sup>th</sup> International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 2002, S.7-1 – 7-18
- [125] Pagani, A.; Weidinger, B.; Kranner, L.: Emissionen-Messvorschriften und analytische Erfahrungen, 5. Workshop Geruch und Emissionen bei Kunststoffen, Kassel, 2003
- [126] Pagani, A.; Weidinger, B.; Kranner, L.; Englisch, M.: Naturfaserverstärkte Kunststoffe im Automobilbau Emissionsproblematik von Innenbauteilen, 4. Internationales Symposium Nachwachsende Rohstoffe, Erfurt, 2003
- [127] VDA 276: Bestimmung organischer Emissionen aus Bauteilen für den Kfz-Innenraum mit einer 1 m<sup>3</sup>-Prüfkammer, März 2000
- [128] DIN 75 201: Bestimmung des Foggingverhaltens von Werkstoffen der Kfz-Innenausstattung, September 1992
- [129] VDA 277: Nichtmetallische Werkstoffe der KFZ-Innenausstattung-, Bestimmung der Emissions organische Verbindungen, Januar 1995
- [130] VDA 275: Formteile für den Fahrzeuginnenraum-Bestimmung der Formaldehydabgabe, Juli 1994
- [131] Preusser, W.; Gierl C.; Kranner, L.: Dunstglocke, Emissionen organischer Substanzen aus nichtmetallischen Werkstoffen im Kfz-Innenraum messen, Mo, Jahrg. 57, 5, 2003

- [132] VDA 278: Thermodesorptionsanalyse organischer Emissionen zur Charakterisierung von nichtmetallischen Kfz-Werkstoffen, September 2002
- [133] VDA 270: Bestimmung des Geruchsverhalten von Werkstoffen der Kfz-Innenausstattung, Oktober 1992
- [134] Fischer, H.; Bluhm, C.; Geppert, N.; Müssig, J.: Beurteilung des Geruchspotenzials von Naturfasern für den Einsatz im Automobilbereich, 7. Internationale AVK-TV Tagung, Baden-Baden, 2004, S. B11-1 bis B11-7
- [135] Decker, K.-H.: Maschinenelemente, Gestaltung und Berechnung, 14. erweiterte Auflage, München Wien: Carl Hanser Verlag, 1998, S.32-35
- [136] Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 19. Auflage, Herausgeber Beitz, W. und Grote, K.-H., Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1997, S. F29

## 9 Anhang

### 9.1 Ergebnisse der Außendurchmesserbestimmung der technischen Kenaf- und Hanffasern an allen drei Positionen (links, mittig und rechts) für alle geprüften Testfasersorten und Einspannlängen, sowie deren arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen (Stabw)

#### Kenaf, Einspannlänge 20 mm

Lfd. Nr.	Außendurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]				
	Links	Mitte	Rechts	Mittelwert	Stabw
KE 01	60	64	87	70	15
KE 02	49	96	81	75	24
KE 03	57	76	71	68	10
KE 04	83	40	75	66	23
KE 05	127	77	44	83	41
KE 06	57	63	52	57	6
KE 07	37	85	82	68	27
KE 08	90	80	89	86	5
KE 09	50	59	48	52	6
KE 10	62	51	62	58	6
KE 11	53	62	64	60	5
KE 12	72	79	88	80	8
KE 13	53	59	110	74	31
KE 14	63	75	86	75	11
KE 15	99	41	62	68	29
KE 16	66	66	56	62	6
KE 17	71	126	85	94	29
KE 18	54	43	56	51	7
KE 19	48	56	89	64	22
KE 20	64	71	104	80	22
KE 21	62	57	66	62	4
KE 22	50	49	52	50	1
KE 23	59	61	55	58	3
KE 24	54	47	54	52	4
KE 25	98	95	82	92	9
KE 26	47	43	50	47	4
KE 27	48	52	53	51	2

KE 28	68	71	72	70	2
KE 29	70	56	50	59	10
KE 30	54	87	74	72	17
KE 31	68	67	65	67	1
KE 33	68	47	62	59	11
KE 34	59	63	53	59	5
KE 35	91	71	74	79	11
KE 36	53	59	49	54	5
KE 37	79	45	35	53	23
KE 38	59	44	57	53	8
KE 39	71	67	95	78	15
KE 40	60	63	45	56	10
KE 41	61	88	44	65	22
KE 42	90	87	91	89	2
KE 43	64	47	54	55	9
KE 44	74	46	64	61	14
KE 45	60	84	103	83	21
KE 46	63	61	55	60	4
KE 47	66	68	55	63	7
KE 48	60	57	70	62	6
KE 49	39	82	84	69	26

### Kenaf, Einspannlänge 40 mm

Lfd. Nr.	Außendurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]				Stabw
	Links	Mitte	Rechts	Mittelwert	
KE 01	52	51	76	60	15
KE 02	64	80	59	68	11
KE 03	29	34	38	34	4
KE 04	39	59	34	44	13
KE 05	55	51	56	54	3
KE 06	51	58	50	53	4
KE 07	68	44	83	65	20
KE 08	56	55	54	55	1
KE 09	60	56	52	56	4
KE 10	71	52	60	61	10
KE 11	52	73	55	60	12
KE 12	62	50	51	54	7
KE 13	33	59	70	54	19
KE 14	59	53	70	54	19
KE 15	55	57	53	55	2



KE 16	52	65	48	55	9
KE 17	73	40	75	63	20
KE 18	25	65	85	58	30
KE 19	87	75	69	77	9
KE 20	57	63	71	64	7
KE 21	100	105	79	95	14
KE 22	45	68	45	53	13
KE 23	81	82	58	73	13
KE 24	70	74	82	75	6
KE 25	54	57	63	58	5
KE 26	54	69	86	70	16
KE 27	76	52	38	55	19
KE 28	67	109	88	88	21
KE 29	56	48	49	51	4
KE 30	65	62	38	55	15
KE 31	56	33	51	47	12
KE 32	49	41	55	48	7
KE 33	43	56	46	48	7
KE 34	67	65	74	68	5
KE 35	63	49	58	57	7
KE 36	53	48	62	54	7
KE 37	77	50	54	61	15
KE 38	59	52	41	51	9
KE 39	60	73	66	67	6
KE 40	64	152	85	100	46
KE 41	69	80	77	75	6
KE 42	26	58	65	49	21
KE 43	107	51	85	81	29
KE 44	97	91	58	82	21
KE 45	43	38	59	46	11
KE 46	67	54	60	60	11
KE 47	43	38	44	41	3
KE 48	42	46	30	39	8
KE 49	53	56	56	55	2
KE 50	67	75	71	71	4

**Kenaf, Einspannlänge 60 mm**

Lfd. Nr.	Außendurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]				
	Links	Mitte	Rechts	Mittelwert	Stabw
KE 01	38	37	32	36	3
KE 03	46	53	40	46	7
KE 04	43	38	36	39	3
KE 05	70	52	55	59	9
KE 06	57	60	49	55	6
KE 08	50	52	47	50	3
KE 09	67	43	57	56	12
KE 10	46	51	50	49	3
KE 11	34	54	40	43	10
KE 12	52	48	53	51	3
KE 13	58	51	65	58	7
KE 14	61	68	69	66	4
KE 15	109	42	42	64	39
KE 16	42	29	69	47	21
KE 17	50	48	57	52	5
KE 18	127	50	37	71	48
KE 19	59	75	53	62	11
KE 20	43	29	89	54	32
KE 22	48	38	40	42	5
KE 23	89	82	81	84	4
KE 24	79	46	64	63	17
KE 25	74	82	73	76	5
KE 26	45	70	69	61	14
KE 27	65	86	85	79	12
KE 28	73	52	64	63	10
KE 29	63	53	59	58	5
KE 30	45	51	45	47	3
KE 31	50	64	63	59	8
KE 32	45	59	38	47	11
KE 33	53	65	55	58	6
KE 34	76	78	58	71	11
KE 35	52	66	46	55	10
KE 36	43	49	32	41	9
KE 37	39	45	82	56	24
KE 38	61	46	38	48	12
KE 39	63	55	53	57	5

KE 40	43	51	40	45	5
KE 41	40	47	42	43	4
KE 42	52	45	36	44	8
KE 43	55	54	78	62	14
KE 44	64	48	79	63	16
KE 45	50	55	42	49	6
KE 46	52	38	47	46	7
KE 47	54	54	34	48	11
KE 48	68	61	51	60	9
KE 49	68	52	68	63	9
KE 50	76	79	70	75	4

### Hanf, Einspannlänge 20 mm

Lfd. Nr.	Außendurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]				Stabw
	Links	Mitte	Rechts	Mittelwert	
HA 01	73	83	104	87	16
HA 02	34	43	95	57	33
HA 03	94	115	108	106	10
HA 04	127	128	118	124	6
HA 05	99	90	99	96	6
HA 06	164	123	154	147	21
HA 07	151	139	115	135	18
HA 08	50	53	51	51	2
HA 09	67	60	152	93	51
HA 10	58	145	90	98	44
HA 11	65	65	91	74	15
HA 12	100	79	54	78	23
HA 13	86	104	124	105	19
HA 14	163	111	204	159	46
HA 15	97	94	49	80	27
HA 16	140	134	151	142	9
HA 17	69	98	104	90	19
HA 18	41	85	35	54	27
HA 19	90	98	89	92	5
HA 20	90	71	74	78	10
HA 21	208	252	55	172	104
HA 22	76	128	113	106	27
HA 23	146	152	136	145	8
HA 24	83	92	72	82	10
HA 25	147	120	76	114	36

HA 26	97	116	109	107	10
HA 27	65	128	91	95	31
HA 28	69	94	82	82	12
HA 29	90	95	89	91	4
HA 30	100	63	41	68	30
HA 31	117	228	152	166	57
HA 32	107	115	91	105	12
HA 33	149	108	132	130	21
HA 34	110	58	112	93	31
HA 35	103	170	105	126	38
HA 36	58	84	75	72	13
HA 37	103	74	130	102	28
HA 38	117	70	53	80	33
HA 39	188	161	145	165	22
HA 40	72	66	60	66	6
HA 41	84	86	90	87	3

### Hanf, Einspannlänge 40 mm

Lfd. Nr.	Außendurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]				
	Links	Mitte	Rechts	Mittelwert	Stabw
HA 01	124	140	63	109	41
HA 02	82	83	84	83	1
HA 03	82	71	66	73	8
HA 04	47	51	44	47	4
HA 05	197	180	65	147	72
HA 06	190	164	202	186	19
HA 07	69	66	54	63	8
HA 08	107	30	46	61	40
HA 09	105	107	116	109	6
HA 10	83	69	82	78	8
HA 11	93	136	100	110	23
HA 12	100	122	123	115	13
HA 13	128	120	104	117	12
HA 14	64	89	84	79	13
HA 15	159	178	156	164	12
HA 16	154	136	40	110	61
HA 17	73	95	94	87	12
HA 18	60	71	64	65	6
HA 19	60	85	120	88	30
HA 20	105	78	96	93	14

HA 21	59	57	139	85	47
HA 24	55	57	46	53	6
HA 25	129	61	141	110	43
HA 26	140	129	167	145	20
HA 27	59	73	91	74	16
HA 28	154	205	69	143	68
HA 29	130	115	125	123	8
HA 30	55	77	79	70	14
HA 31	66	194	185	148	71
HA 32	67	58	50	58	9
HA 33	76	68	85	76	9
HA 34	99	104	53	85	28
HA 35	74	78	64	72	7
HA 36	106	59	121	96	33
HA 37	211	179	105	165	54
HA 38	81	50	91	74	21
HA 39	69	34	32	45	21
HA 40	51	60	55	55	5
HA 41	84	135	133	117	29
HA 42	96	64	124	95	30
HA 43	55	43	199	99	87
HA 44	98	91	80	90	9
HA 45	76	48	36	53	21
HA 46	117	127	111	118	8
HA 47	118	130	84	111	24
HA 48	69	60	55	61	7
HA 49	55	120	147	107	47
HA 50	98	116	144	119	23
HA 51	48	50	100	66	29

### Hanf, Einspannlänge 60 mm

Lfd. Nr.	Außendurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]				Stabw
	Links	Mitte	Rechts	Mittelwert	
HA 01	169	158	165	164	6
HA 02	96	54	84	78	22
HA 03	123	153	92	123	30
HA 04	160	119	129	136	21
HA 05	53	60	83	65	16
HA 06	182	119	77	126	53
HA 07	98	68	108	92	21

HA 08	75	37	69	60	21
HA 09	96	78	99	91	11
HA 10	80	66	66	71	8
HA 11	91	60	133	95	36
HA 12	32	35	92	53	34
HA 13	135	124	92	117	22
HA 14	56	65	50	57	8
HA 15	82	69	50	67	16
HA 16	116	103	126	115	12
HA 17	114	90	71	92	21
HA 18	113	87	57	85	28
HA 19	90	73	63	75	14
HA 20	87	88	90	88	2
HA 21	76	143	169	130	48
HA 22	33	68	68	56	20
HA 23	68	53	53	58	8
HA 24	70	66	96	77	16
HA 25	92	112	117	107	13
HA 26	117	201	134	151	44
HA 27	240	202	48	163	102

## 9.2 Kraft-Dehnungsdiagramme für Hanf- und Kenaffasern

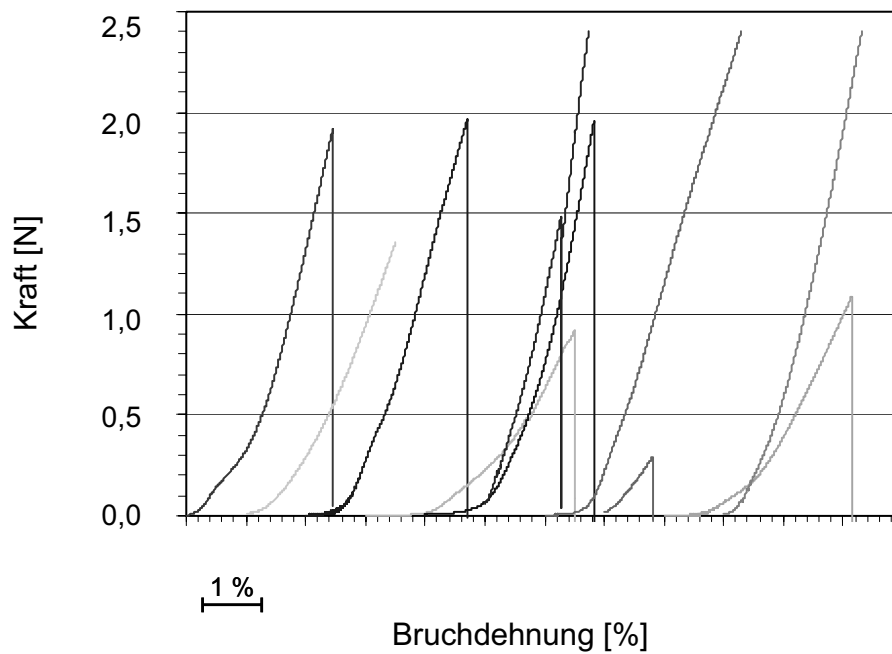


Bild 9.1: Kraft-Dehnungsdiagramm für Hanffasern (Einspannlänge 40 mm) in Zugversuch

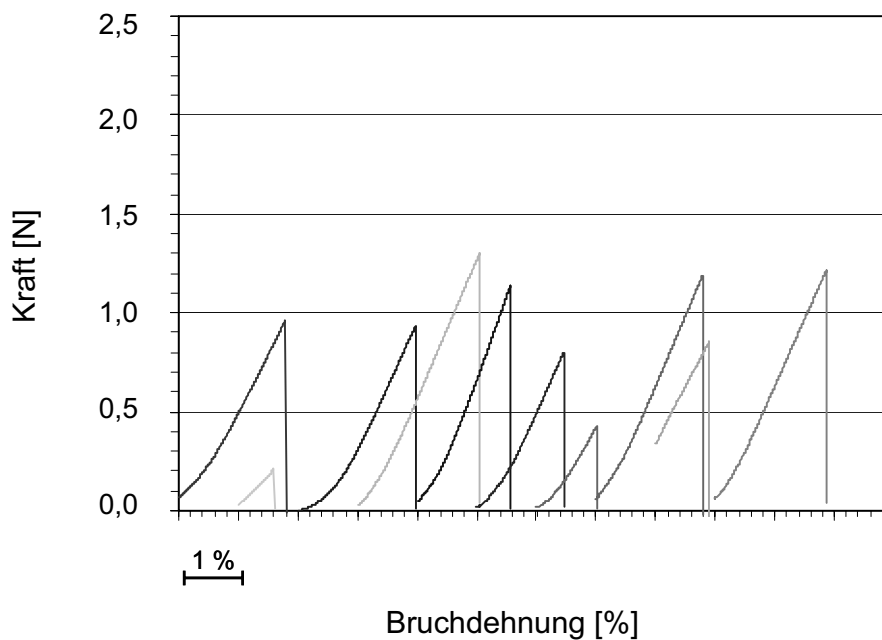


Bild 9.2: Kraft-Dehnungsdiagramm für Kenaffasern (Einspannlänge 40 mm) in Zugversuch

### 9.3 Bruchspannung aller getesteten Fasern in Abhängigkeit des Faserdurchmessers

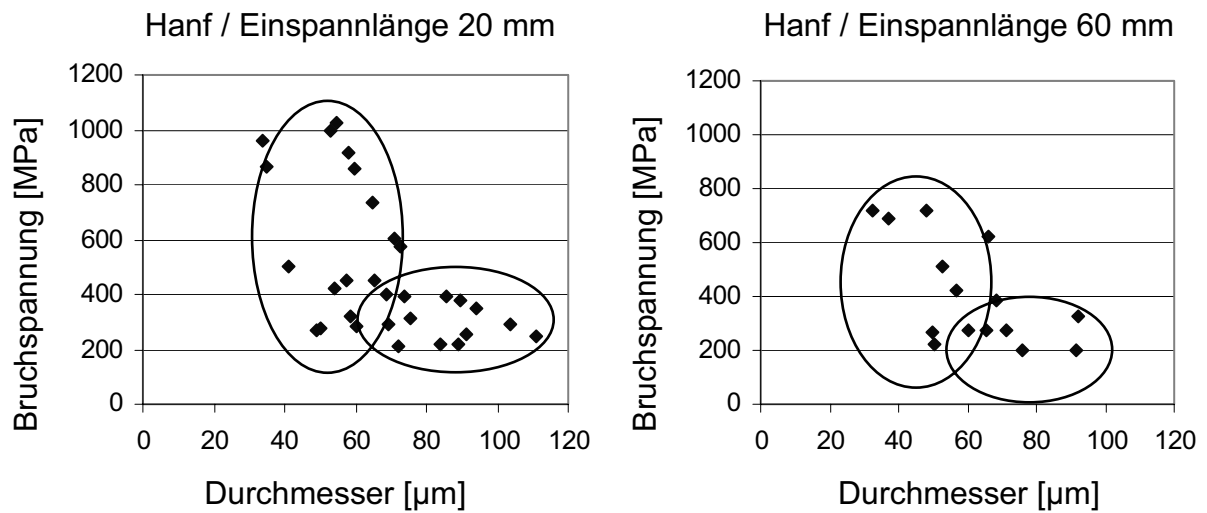


Bild 9.3: Bruchspannung aller getesteten Kenaffasern in Abhängigkeit des Faserdurchmessers (Einspannlänge 20 mm und 60 mm)

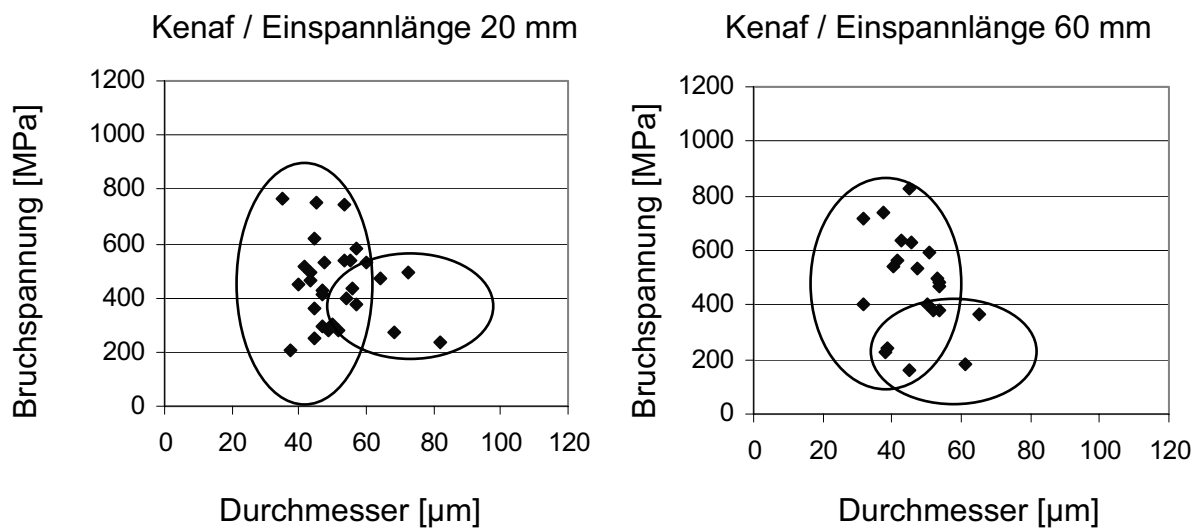


Bild 9.4: Bruchspannung aller getesteten Hanffasern in Abhängigkeit des Faserdurchmessers (Einspannlänge 20 mm und 60 mm)



## 9.4 Ergebnisse des Zugfestigkeitstests aller getesteten technischen Hanf- und Kenaffasern

### Kenaf, Einspannlänge 20 mm

Lfd. Nr.	Außendurchmesser [µm]	Bruchkraft [N]	Bruchfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
KE 01	60	1,5	528	2,4
KE 03	57	1,0	378	2,3
KE 04	40	0,6	447	2,2
KE 05	45	1,0	617	1,4
KE 06	52	0,6	281	1,7
KE 07	37	0,2	203	0,8
KE 09	48	0,9	527	2,3
KE 11	53	1,2	538	2,1
KE 13	72	2,0	491	2,4
KE 15	41	0,7	519	1,7
KE 16	56	1,1	438	2,9
KE 18	43	0,7	461	1,6
KE 20	64	1,5	471	2,6
KE 21	57	1,5	585	2,6
KE 23	55	1,3	540	2,6
KE 24	47	0,5	293	0,9
KE 25	82	1,3	239	1,5
KE 26	43	0,7	495	3,6
KE 27	48	0,5	283	0,8
KE 28	68	1,0	273	2,8
KE 29	50	0,6	300	0,9
KE 30	54	0,9	399	1,7
KE 33	47	0,7	411	1,4
KE 34	53	1,7	745	1,5
KE 37	35	0,7	767	2,0
KE 38	44	0,6	363	0,8
KE 40	45	1,2	748	1,9
KE 41	45	0,4	249	0,9
KE 43	47	1,4	424	2,7

**Kenaf, Einspannlänge 40 mm**

Lfd. Nr.	Außendurchmesser [µm]	Bruchkraft [N]	Bruchfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
KE 01	51	1,0	489	2,5
KE 02	59	1,0	351	1,8
KE 03	30	0,2	298	0,6
KE 05	51	1,3	645	2,1
KE 06	44	0,9	628	2,0
KE 07	44	1,1	763	1,6
KE 09	52	0,8	384	1,5
KE 11	52	0,4	204	1,0
KE 12	50	1,2	605	1,8
KE 15	53	0,9	405	1,8
KE 16	48	1,2	682	1,9
KE 21	79	1,1	227	1,8
KE 23	58	0,6	229	1,3
KE 26	54	0,7	296	1,2
KE 27	38	0,8	701	1,3
KE 28	67	1,1	319	1,8
KE 29	48	0,8	457	1,5
KE 31	33	0,6	637	2,1
KE 32	41	0,6	431	1,2
KE 37	50	0,9	463	1,3
KE 38	41	1,0	753	1,9
KE 40	64	1,2	373	1,8
KE 41	69	1,6	444	1,8
KE 42	30	0,4	542	1,1
KE 43	50	0,8	428	1,2
KE 45	38	0,6	521	1,3
KE 46	54	1,1	468	2,0
KE 47	38	0,5	434	1,8
KE 49	53	0,6	278	1,6

**Kenaf, Einspannlänge 60 mm**

Lfd. Nr.	Außendurchmesser [µm]	Bruchkraft [N]	Bruchfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
KE 01	32	0,6	718	1,1
KE 09	43	0,9	638	0,9
KE 10	46	1,0	631	2,0
KE 12	48	1,0	535	1,6
KE 13	51	1,2	592	1,9
KE 14	61	0,5	185	1,0
KE 15	42	0,8	564	1,3
KE 18	37	0,8	738	1,3
KE 19	53	1,1	481	1,5
KE 26	45	1,3	828	1,5
KE 27	65	1,2	364	1,7
KE 28	52	0,8	383	1,3
KE 29	53	1,1	496	1,0
KE 30	45	0,3	158	0,7
KE 31	50	0,8	403	1,2
KE 32	38	0,3	225	1,1
KE 33	54	0,9	382	1,3
KE 36	32	0,3	404	0,7
KE 37	39	0,3	241	0,7
KE 39	53	1,0	467	1,6
KE 40	40	0,7	540	1,4

**Hanf, Einspannlänge 20 mm**

Lfd. Nr.	Außendurchmesser [µm]	Bruchkraft [N]	Bruchfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
HA 01	73	2,4	577	3,4
HA 02	34	0,9	961	2,2
HA 03	94	2,4	346	2,0
HA 05	90	2,4	381	3,3
HA 08	50	0,5	276	1,4
HA 09	60	2,4	860	3,5
HA 10	58	1,2	452	1,9
HA 11	65	2,4	733	4,5
HA 12	54	1,0	425	1,9
HA 13	86	2,3	392	2,3
HA 14	111	2,4	249	3,6
HA 15	49	0,5	266	1,0

HA 17	69	1,5	403	4,5
HA 18	35	0,8	865	3,0
HA 19	89	1,4	222	4,0
HA 20	71	2,4	606	3,1
HA 21	55	2,4	1024	2,8
HA 22	76	1,4	312	3,0
HA 24	72	0,9	210	3,4
HA 27	65	1,5	448	2,2
HA 28	69	1,1	291	2,7
HA 30	41	0,7	501	3,0
HA 32	91	1,6	251	2,9
HA 34	58	2,4	919	3,4
HA 35	104	2,4	289	2,2
HA 36	58	0,9	322	1,6
HA 37	74	1,7	390	3,2
HA 38	53	2,2	996	2,8
HA 40	60	0,8	286	3,9
HA 41	84	1,2	221	1,8

### Hanf, Einspannlänge 40 mm

Lfd. Nr.	Außendurchmesser [µm]	Bruchkraft [N]	Bruchfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
HA 01	63	1,9	625	2,5
HA 02	82	1,4	275	2,6
HA 03	66	1,5	437	2,5
HA 04	44	0,9	602	3,5
HA 05	65	2,0	599	2,8
HA 06	130	1,5	112	1,3
HA 07	55	0,3	147	2,8
HA 08	30	0,3	403	0,8
HA 09	105	1,0	121	3,8
HA 10	69	1,0	277	3,8
HA 11	93	2,4	357	2,3
HA 13	104	2,4	283	3,3
HA 14	64	1,1	338	3,1
HA 17	74	2,0	463	2,7
HA 18	60	2,0	689	2,4
HA 20	78	1,0	215	1,7
HA 24	46	1,0	574	2,8
HA 27	59	1,3	484	2,3

HA 28	69	1,0	277	1,8
HA 29	115	2,4	234	2,7
HA 30	55	0,8	329	1,5
HA 31	66	2,4	705	2,1
HA 32	50	0,5	267	1,4
HA 35	64	0,9	287	2,2
HA 38	50	0,7	338	1,9
HA 39	32	0,7	921	2,0
HA 40	51	0,4	222	2,1
HA 41	84	2,1	379	1,4
HA 42	64	2,4	744	2,6
HA 46	111	2,4	249	4,0
HA 47	84	1,7	306	2,9
HA 48	55	0,9	401	2,5
HA 50	98	1,8	235	2,2
HA 51	48	1,3	704	1,7

### Hanf, Einspannlänge 60 mm

Lfd. Nr.	Außendurchmesser [µm]	Bruchkraft [N]	Bruchfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]
HA 03	92	1,3	198	2,1
HA 07	68	1,4	382	2,3
HA 08	37	0,7	687	1,5
HA 10	66	0,9	275	1,9
HA 11	60	0,8	277	1,2
HA 14	50	0,4	225	2,4
HA 15	50	0,5	268	1,6
HA 17	71	1,1	272	1,3
HA 18	57	1,1	420	1,3
HA 21	76	0,9	197	1,2
HA 22	33	0,6	719	1,5
HA 23	53	1,1	512	2,5
HA 24	66	2,1	623	3,3
HA 25	92	2,2	325	1,5
HA 27	48	1,3	719	2,2

**9.5 Mechanische Eigenschaften der Verbunde (Mischvlies aus Hanf- und Kenaffasern mit einem Matrixanteil von ca. 22 Gew.-%) in Bezug auf den Pressdruck (T = 200 °C und t = 60 s) in Produktionsrichtung (PR) und quer zur Produktionsrichtung (QPR)**

Pressdruck		Biege E-Modul	Biegefestigkeit	Bruchdehnung	Schlagzähigkeit
[bar]		[MPa]	[MPa]	[%]	[kJ/m <sup>2</sup> ]
15	PR	2924 ± 273	46 ± 4	2,7 ± 0,3	8,8 ± 0,8
	QPR	3500 ± 330	48 ± 4	2,3 ± 0,1	9,7 ± 1,1
20	PR	3055 ± 357	51 ± 5	2,9 ± 0,5	9,2 ± 1,7
	QPR	3302 ± 363	51 ± 6	2,7 ± 0,3	10,7 ± 1,2
30	PR	3416 ± 368	57 ± 5	2,6 ± 0,3	9,9 ± 1,0
	QPR	4141 ± 498	63 ± 6	2,4 ± 0,2	11,8 ± 1,1
60	PR	4805 ± 405	79 ± 8	2,5 ± 0,2	11,0 ± 1,6
	QPR	5301 ± 491	85 ± 7	2,5 ± 0,1	12,4 ± 1,4
80	PR	3340 ± 332	73 ± 6	3,8 ± 0,3	12,5 ± 1,0
	QPR	3681 ± 517	66 ± 8	3,2 ± 0,2	12,7 ± 1,6
100	PR	2787 ± 311	64 ± 6	3,8 ± 0,5	13,2 ± 1,9
	QPR	3435 ± 575	70 ± 8	3,2 ± 0,4	12,6 ± 1,1
150	PR	2271 ± 388	44 ± 2	3,2 ± 0,1	12,8 ± 0,8
	QPR	2138 ± 165	57 ± 7	5,4 ± 0,9	12,4 ± 0,8
200	PR	1977 ± 275	52 ± 7	4,2 ± 0,4	13,1 ± 1,6
	QPR	1870 ± 492	46 ± 9	4,5 ± 0,5	13,6 ± 2,4

**9.6 Mechanische Eigenschaften der mit und ohne Vakuum verpressten Testplatten in Abhängigkeit der Zeit und des Pressverfahrens (T = 200 °C und P = 20 bar) in Produktionsrichtung (PR) und quer zur Produktionsrichtung (QPR)**

Plattebeschreibung		Biege E-Modul [MPa]	Biegefestigkeit [MPa]	Zug E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]
100 s ohne Vakuum	PR	6469 ± 699	92 ± 7	7636 ± 287	54 ± 4
	QPR	7524 ± 558	98 ± 9	9652 ± 531	69 ± 5
100 s mit Vakuum	PR	6704 ± 482	101 ± 6	7815 ± 430	58 ± 3
	QPR	8076 ± 425	114 ± 5	9836 ± 590	72 ± 3
80 s mit Vakuum	PR	6512 ± 517	97 ± 4	7800 ± 495	64 ± 3
	QPR	7343 ± 794	104 ± 9	9776 ± 549	79 ± 3
650 s mit Vakuum	PR	6345 ± 431	100 ± 4	8027 ± 275	64 ± 2
	QPR	7269 ± 474	116 ± 11	9253 ± 585	75 ± 3
50 s mit Vakuum	PR	6522 ± 356	103 ± 5	7819 ± 502	63 ± 2
	QPR	7136 ± 507	108 ± 8	9662 ± 409	70 ± 5





## **Liste betreuter Studien- und Diplomarbeiten**

Rosana Pérez, 2004

Utilización de fibras naturales como refuerzo de materiales compuestos empleados en la industria del automóvil. Análisis de propiedades y selección del proceso de manufactura

Carlos Gamito, 2005

Optimization of the manufacturing process of natural fiber reinforced composites via a physical and mechanical study of the properties of the new materials

Benjamin Hoffmann, 2006

Studie der Verwertungsmöglichkeiten von Produktionsabfällen in Form von Randstreifen und Schleifstaub aus GF/EP

Alexey Spasov, 2006

Optimization of the manufacturing process of natural fiber reinforced composites

Jaime Chacon, 2006

Technical Study of Modal Analysis by Natural Fiber Reinforced Polymers