

Eigenschaften und Umformverhalten naturfaserverstärkter Thermoplaste

Von der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Stephan Odenwald

geboren am 23.02.1972 in Karlsruhe

eingereicht am 15.04.2002

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Köhler

Prof. Dr. habil. Ing. Andrzej K. Bledzki

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Wielage

Chemnitz, den 28.06.2002

Erschienen in der *Schriftenreihe Strukturleichtbau, Band 5*

ISBN 3-936766-04-5

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Konstruktion im Allgemeinen Maschinenbau der TU Chemnitz in der Zeit von April 1997 bis Dezember 2001.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Eberhard Köhler, meinem Doktorvater, für die Möglichkeit diese Arbeit durchführen zu können und für die Übernahme der Betreuung. Seine Anregungen und Hinweise waren mir stets Hilfe und Antrieb. Herrn Prof. Bledzki und Herrn Prof. Wielage danke ich für die abschließenden Hinweise und die Übernahme der Korreferate.

Bei den Kollegen und Mitarbeitern des Institutes für Maschinenbau und Kunststofftechnik bedanke ich mich für die gute Arbeitsatmosphäre und die fachgebietsübergreifenden Anregungen und Hilfestellungen. Für die konstruktive und freundschaftliche Zusammenarbeit bedanke ich mich bei meinen Kollegen im Rahmen des Forschungsprojektes „Naturfaserverbunde auf Kunststoffbasis“, Herrn Dr. Aurich und Herrn Dr. Lampe.

Mein Dank gilt weiterhin Herrn Prof. Fuchs und seinen Mitarbeitern, insbesondere Frau Dipl.-Ing. Schmalz vom Sächsischen Textilforschungsinstitut (STFI) für die hervorragende Zusammenarbeit bei der Herstellung der Naturfaservliesstoffe. Herrn Dipl.-Ing. Lau und Herrn Dr. Förster des IWU danke ich für die wertvolle Unterstützung zur optischen Dehnungsmessung mittels Photogrammetrie, ebenso Herrn Dr. Dost und Frau Dr. Kieselstein von der Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH für die Zusammenarbeit im Rahmen der Grauwertkorrelationsanalyse.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie, insbesondere meiner Frau, für die Nachsicht und Geduld in arbeitsreichen Zeiten und Ermutigung in schwierigen und wenig produktiven Phasen.

Bibliographische Beschreibung

Odenwald, Stephan

Eigenschaften und Umformverhalten naturfaserverstärkter Thermoplaste

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik, Chemnitz, 2002.

151 Seiten

72 Abbildungen

18 Tabellen

79 Literaturstellen

Referat

Die Zielstellung dieser Dissertation besteht darin, auf dem Gebiet der naturfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffe den Einfluss der Herstellung von Flachsfaser-Polypropylen Vliesstoffen auf das Verarbeitungsverhalten sowie die mechanischen Eigenschaften des Halbzeuges und der daraus hergestellten Bauteile zu charakterisieren. In Abhängigkeit von Flachsfasergehalt, Verfestigungstechnologie, Verfestigungsparametern, Flächenmasse, Flachsfaserart und Haftvermittlergehalt wurde die mechanischen Eigenschaften bestimmt und mit mathematisch-statistischen Methoden beschrieben. Zur Messung des Verformungsverhaltens wurden optische Dehnungsmessmethoden entwickelt. Die Korrelation dieser Messungen mit den auftretenden Umformkräften bildet die Grundlage zur Einrichtung und Optimierung der Herstellung von Naturfaserverbundwerkstoffen.

Schlagworte

Flachs, Polypropylen, Hybridvliesstoffe, Presstechnologie, Optische Verformungsmessung, Umformverhalten, mechanische Eigenschaften, Herstellungsparameter, Reibung, Vliesstoffherstellung.

Inhaltsverzeichnis:

VORWORT	3
BIBLIOGRAPHISCHE BESCHREIBUNG	5
ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN	11
1 EINLEITUNG	15
2 STAND DER TECHNIK	17
2.1 NATURFASERN	17
2.2 MATRICES	19
2.3 HAFTVERMITTLER	20
2.4 BAUTEILHERSTELLUNG AUS FLACHSFASERVERSTÄRKTEN THERMOPLASTEN	20
2.4.1 ALLGEMEINES	20
2.4.2 TIEFZIEHEN VON ORGANOBLECHEN IM PRESSVERFAHREN	21
2.4.3 FILM-STACKING-VERFAHREN	22
2.4.4 SCHMELZE-EXTRUSIONS-VERFAHREN	22
2.4.5 HYBRIDHALBZEUGE	23
2.5 VLIESTOFFE – HERSTELLUNG, VERFESTIGUNG, EINFLUSSFAKTOREN	24
2.5.1 ALLGEMEINES	24
2.5.2 NADELTECHNOLOGIE	25
2.5.3 MALIVLIES TECHNOLOGIE	26
2.5.4 MALIWATT TECHNOLOGIE	27
2.5.5 KUNIT TECHNOLOGIE	27
2.6 MODELLE ZUR BESCHREIBUNG DER EIGENSCHAFTEN VON VLIESTOFFEN	28
2.6.1 MATHEMATISCH- THEORETISCHE MODELLE	28
2.6.1.1 Numerisches Modell – Finite Element Methode	28
2.6.1.2 Mikromechanisches Modell, Laminattheorie	29
2.6.1.3 Stochastisch-theoretisches Modell	30
2.6.2 EMPIRISCHE MODELLE	31
2.6.2.1 Vernadelungsintensität	31
2.6.2.2 Flachsfaseranteil	32
2.6.2.3 Flächenmasse und Art der Flachsfaser	32

2.6.3	BEWERTUNG DER MODELLANSÄTZE	33
3	ZIELSETZUNG DER ARBEIT	35
4	CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSMATERIALIEN	37
4.1	EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN FLACHSFASERN	37
4.1.1	VORBETRACHTUNGEN	37
4.1.2	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN	37
4.1.3	THERMISCHE EIGENSCHAFTEN	39
4.2	EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN PP-FASERN	41
4.2.1	VORBETRACHTUNGEN	41
4.2.2	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN	41
4.2.3	VISKOSITÄT	42
4.2.3.1	Mould Volume Index	42
4.2.3.2	Kapillarrheometer	43
4.2.4	THERMISCHE EIGENSCHAFTEN	44
4.2.4.1	Thermogravimetrie (TG)	44
4.2.4.2	Differential Scanning Calorimetry (DSC)	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.3	ABLEITUNG DER PROZESSGRENZEN	46
5	EINFLÜSSE AUF DIE MECHANISCHEN VLIESTOFFEIGENSCHAFTEN	49
5.1	UNTERSUCHTE EINFLUSSGRÖßEN	49
5.2	VERFESTIGUNGSTECHNOLOGIE	50
5.3	FLACHSFASERGEHALT UND FLÄCHENMASSE	52
5.4	STICHDICHTE UND EINSTICHTIEFE	56
5.5	FASERSORTEN	58
5.6	ERGEBNIS	60
6	EINFLÜSSE AUF DIE MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN DES EBENEN BAUTEILS	63
6.1	VORBEMERKUNGEN	63
6.2	PROZESSPARAMETER	63
6.2.1	ALLGEMEINES	63
6.2.2	VERSUCHSPLAN UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	65
6.2.3	VERFAHREN 1 - ISOTHERMES PRESSEN	66

6.2.3.1	Einfluss von Druck und Temperatur	66
6.2.3.2	Einfluss der Haltezeit	68
6.2.4	VERFAHREN 2 - NICHT ISOTHERMES PRESSEN	68
6.2.4.1	Druck und Temperatur	68
6.2.4.2	Einfluss der Haltezeit	70
6.2.5	ERGEBNIS - VERFAHRENSVERGLEICH	72
6.3	EINFLUSS DER HALBZEUGHERSTELLUNG	73
6.3.1	ALLGEMEINES	73
6.3.2	FLACHSFASERGEHALT UND FLÄCHENMASSE	73
6.3.3	VERNADELUNGSPARAMETER	76
6.3.4	FASERSORTEN	79
6.3.5	VERFESTIGUNGSTECHNOLOGIE	81
6.3.6	ERGEBNIS	83
7	REIBUNG VLIES – WERKZEUG	85
7.1	VORBETRACHTUNG	85
7.2	FLACHSFASERGEHALT UND KONTAKTFLÄCHENTEMPERATUR	87
7.3	FLÄCHENPRESSUNG	89
7.4	RELATIVGESCHWINDIGKEIT	90
7.5	ERGEBNIS	91
8	CHARAKTERISIERUNG DES UMFORMVERHALTENS	93
8.1	ALLGEMEINES	93
8.2	VERFORMUNGSGRÖßEN	94
8.3	GRAUWERTKORRELATIONSANALYSE	96
8.3.1	VERFAHRENSPRINZIP	96
8.3.2	STREIFENZUGVERSUCH	97
8.3.2.1	Flachsfasergehalt	98
8.3.2.2	Temperatur	99
8.3.2.3	Verfestigungsparameter	100
8.3.2.4	Verfestigungstechnologie	101
8.3.2.5	Ergebnis	102
8.4	PHOTOGRAMMETRIE	104
8.4.1	VERFAHRENSPRINZIP	104
8.4.2	APPLIKATION DES MESSRASTERS	105

8.4.3	VERSUCHSAUFBAU	107
8.4.4	AUSWERTUNG	107
8.4.5	BESTIMMUNG DES UMFORMVERHALTENS	108
8.4.5.1	Fasergehalt	108
8.4.5.2	Einstichtiefe	110
8.4.5.3	Stichdichte	111
8.4.5.4	Niederhalterdruck	112
8.4.5.5	Ziehgeschwindigkeit	114
8.4.5.6	Verfestigungstechnologie	115
8.4.5.7	Ergebnis	116
9	SCHLUSSFOLGERUNGEN	119
10	ZUSAMMENFASSUNG	125
11	LITERATUR	129
12	ANHANG	137
12.1	LITERATURANGABEN ZU FASERKENNWERTEN	137
12.2	ÜBERSICHT VERSUCHSVLIESTOFFE	138
12.3	VERSUCHSPLAN PROZESSPARAMETER	140
12.3.1	NICHTISOTHERME KONSOLIDIERUNG	140
12.3.2	ISOTHERME KONSOLIDIERUNG	141
12.4	THEORETISCHER ANSATZ ZUR VLISSIMULATION VON PAN	142
12.5	ERGEBNISDIAGRAMME	146
12.5.1	VLIESTOFF - EINFLUSS VON FLACHSFASERGEHALT UND FLÄCHENMASSE	146
12.5.2	VLIESTOFF - EINFLUSS VON STICHDICHTE UND EINSTICHTIEFE	147
12.5.3	VLIESTOFF - EINFLUSS VON FASERART UND HAFTVERMITTLERZUSATZ	148
12.5.4	VLIESTOFF - EINFLUSS DER VERFESTIGUNGSTECHNOLOGIE	149
	LEBENS LAUF	151

Abkürzungen und Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A	-	Regressionskoeffizient
A	mm ²	Fläche
A	-	Gleichungsparameter
B	-	Gleichungsparameter
D	mm	Durchmesser
E	MPa	Elastizitätsmodul
E	mm	Einstichtiefe
F	N	Kraft
f_a	N·mm ⁻²	spezifische Adhäsionskraft
G	MPa	Schubmodul
G	m·s ⁻²	Erdbeschleunigung
H		Härte
H	J·g ⁻¹	Enthalpie
K		
K	MPa	Kompressionsmodul
L	mm	Länge
M	g/m ²	Flächenmasse
M	kg	Masse
N	-	Faseranzahl
P	N/mm ²	Druck
P	MPa	Druck
Q	l/dm ² ·min	Luftdurchlässigkeit
R	mm	Radius
R	MPa	Spannung
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
S	-	Aspect Ratio
S	E/mm ²	Stichdichte

<i>T</i>	°C	Temperatur
<i>T</i>	s	Zeit
<i>V</i>	mm ³	Volumen
<i>X</i>	-	Koordinatenrichtung
<i>X</i>	mm	Länge
<i>Y</i>		Messgröße
<i>n</i>	-	Querkontraktionszahl
<i>j</i>	%	Faservolumengehalt
<i>f</i>	Grad	Winkel
<i>s</i>	MPa	Spannung
<i>j</i>	-	Umformgrad
<i>e</i>	-	technische Dehnung
<i>t</i>	MPa	Scherspannung
<i>h</i>	Pa·s	Viskosität
<i>g</i>	-	Scherwinkel
<i>ḡ</i>	s ⁻¹	Schergeschwindigkeit
<i>m</i>	-	Reibungskoeffizient
<i>q</i>	°	Winkel
<i>W</i>	-	Faserorientierungsdichtefunktion

Indicees	Bezeichnung
<i>adh</i>	adhäsiv
<i>B</i>	Bruch (z.B. ϵ_B = Bruchdehnung)
<i>b</i>	Biegung
<i>def</i>	deformativ
<i>F</i>	Faser
<i>g</i>	Glasübergang
<i>H</i>	Hooke
<i>H</i>	Höchstzugkraft (z.B. ϵ_H = Höchstzugkraftdehnung)
<i>I</i>	Zählvariable

<i>M</i>	Matrix
<i>M</i>	Maximal (z.B. σ_M = Maximalspannung bzw. Zugfestigkeit)
<i>N</i>	Naturfaser
<i>N</i>	Newton
<i>N</i>	Normalenrichtung
<i>P</i>	Presse
<i>R</i>	Reibung
<i>V</i>	Vliesstoff
<i>x</i>	Zählvariable
<i>z</i>	Zug
<i>RH</i>	bei Maximalspannung (z.B. e_{RH} = Reißdehnung)

Abkürzungen

BMC	Bulk moulded Compound
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DSC	Differential Scanning Calorimetrie
EP	Epoxid
FEM	Finite Element Methode
FVW	Faserverbundwerkstoffe
GMT	Glasfasermattenverstärkter Thermoplast
MAH	Maleinsäureanhydrid
MVI	Volumenfließindex
NMT	Naturfasermattenverstärkter Thermoplast
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PU	Polyurethan
SMC	Sheet Moulded Compound
TA	Thermische Analyse
TG	Thermogravimetrie
UP	Ungesättigtes Polyester

1 Einleitung

Die ständig steigenden Anforderungen an die Qualität und Leistungsfähigkeit von Maschinen und Produkten erfordern die Entwicklung immer leistungsfähigere Werkstoffe mit speziellen, anwendungsgerechten Eigenschaften. Bei Faserverbundwerkstoffen (FVW) werden die hervorragenden Werkstoffeigenschaften, wie z.B. hohe Festigkeit und Steifigkeit bei sehr geringem Gewicht, durch die gezielte Auswahl von Faser- und Matrixmaterialien sowie deren Kombinationen erreicht.

Die primäre Aufgabe der Fasern innerhalb der FVW besteht darin, die in Faserrichtung angreifenden Kräfte aufzunehmen, während die Matrix die Schubkräfte zwischen den Fasern überträgt, die Fasern in ihrer Lage fixiert und diese vor Schädigung schützt.

Ein Hauptziel heutiger Werkstoffentwicklungen ist die Reduktion der spezifischen Dichte unter Beibehaltung oder Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Faserverstärkte Kunststoffe sind in der Lage, diese komplexen Forderungen weitgehend zu erfüllen, da die Materialeigenschaften gezielt an die Belastungen angepasst werden können. Einsatzgebiete von FVW sind hauptsächlich Strukturen in der Verkehrstechnik und schnellbewegte Maschinenbauteile.

Eine weitere Forderung rückt zur Zeit immer weiter in den Vordergrund: Umweltverträglichkeit bei der Herstellung, im Gebrauch und insbesondere bei der Entsorgung. Auf diesem Gebiet sind die Eigenschaften moderner Hochleistungsverstärkungsfasern wie Glas-, Aramid- oder Kohlenstofffaser umstritten.

Auf Grund ihrer geringen Dichte, der guten mechanischen Eigenschaften, der unbegrenzten Verfügbarkeit und ihrer problemlosen CO₂-neutralen Entsorgung bieten Naturfasern eine echte Alternative zu heutigen technischen Verstärkungsfasern. Die spezifischen mechanischen Eigenschaften wie Steifigkeit und Festigkeit können mit denen der Glasfaser konkurrieren. Dazu kommen Vorteile bei der Verarbeitung durch geringe Abrassivität und fehlende Lungengängigkeit der Fasern.

Naturfaserverbundwerkstoffe werden derzeit in großer Menge vorwiegend für Verkleidungsteile im Fahrzeugbau und Transportwesen eingesetzt, welche nur geringen bis mittleren Belastungen ausgesetzt sind. Durch Weiterentwicklung der Werkstoffe und Verfahren ist es in zunehmendem Maße möglich, auch höher belastete Strukturbauteile herzustellen, z.B. für Transportbehältnisse und Schutzhelme.

Die Forschungen auf dem Gebiet der naturfaserverstärkten Kunststoffe konzentriert sich derzeit auf die Werkstoffentwicklung, vor allem auf die Problematik der Faser-Matrix-Haftung und der Oberflächenmodifikation bei der Einbettung in thermoplastische Matrices. Systematische wissenschaftliche Untersuchungen zu den Formgebungseigenschaften von Naturfaserhalbzeugen sowie den aus den Herstellungsparametern resultierenden Bauteileigenschaften wurden bisher nicht durchgeführt. Für eine Ausdehnung der Einsatzgebiete ist es notwendig, naturfasergerechte Verfahren und Halbzeuge zu etablieren, welche vom Anwender gezielt auf die Problemstellung hin ausgewählt und angepasst werden können. Im Rahmen dieser Arbeit werden für flachsfaservliesverstärktes Polypropylen grundlegende Prinzipien und Zusammenhänge zur Auslegung und Verarbeitung ermittelt und in Form mathematisch-statistischer Modelle der rechnergestützten Konstruktion zugänglich gemacht.

2 Stand der Technik

2.1 Naturfasern

Abb. 1 zeigt eine Einteilung der Naturfasern. Als Verstärkungsfasern eignen sich im Besonderen Bastfasern, welche aus dem Pflanzenstengel gewonnen werden und Hartfasern aus den Blättern der Pflanze. Pflanzenhaare und tierische Fasern sind auf Grund ihrer geringen Steifigkeit nicht zur Kunststoffverstärkung geeignet. Mineralische Fasern stehen im Verdacht krebserregend zu sein und werden aus diesem Grunde ebenfalls nicht zur Kunststoffverstärkung eingesetzt.

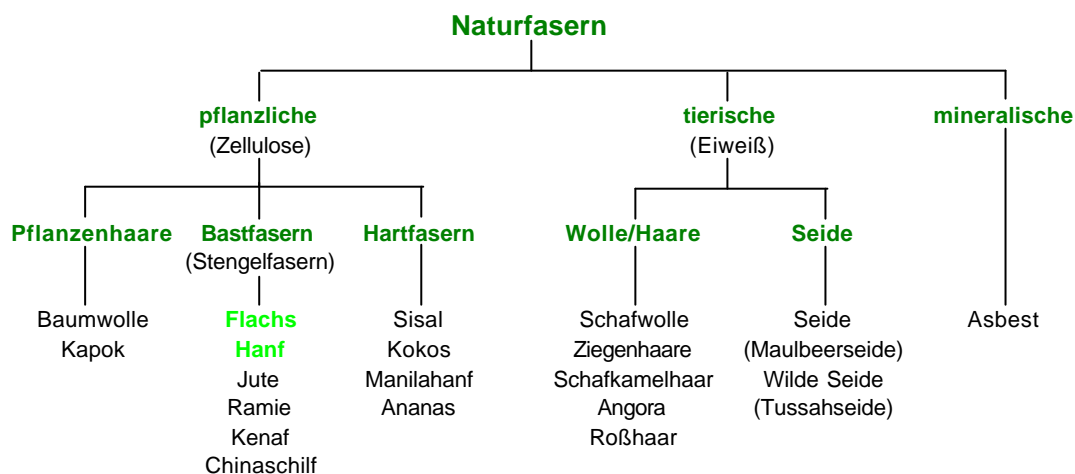


Abb. 1: Einteilung der Naturfasern (nach [17])

Auf ihre Eignung zur Verstärkung von Kunststoffen wurden Fasern wie Jute, Ramie, Sisal und Bambus [7, 32, 34, 37, 38, 52, 75] sowie die in Europa heimischen Flachs- und Hanffasern untersucht. Zur Gewinnung von Fasern für technische Einsatzzwecke wurden verschiedene Ernte- [5, 30, 39, 42] und Aufschlussverfahren entwickelt [2, 17, 45, 49, 50].

Die klimatischen Bedingungen in West- und Mitteleuropa eignen sich hervorragend für den Anbau von Flachs und Hanf [17, 40]. Durch kontrollierte Verarbeitungslinien vom

Pflanzenanbau über die Fasergewinnung bis zur Halbzeugherstellung kann vor allem Flachs bereits in unterschiedlichen, reproduzierbaren Qualitäten von europäischen Herstellern bezogen werden.

Die folgenden Untersuchungen beschränken sich auf die Betrachtung von Flachsfasern. Vorversuche und bisherige Erfahrungen zeigen, dass die Anforderungen bei der Verarbeitung der Flachsfaser denen anderer Naturfasern sehr ähnlich sind. Somit ist zu erwarten, dass die Ergebnisse zumindest in ihren qualitativen Aussagen auf Hanf- und andere Bastfasern übertragen werden können.

Abb. 2 zeigt den Ablauf der Flachsfasergewinnung. Die traditionelle Fasergewinnung über Röstverfahren umfasst eine Vielzahl von Prozessschritten und insbesondere die Tauröste auf dem Feld birgt ein beträchtliches Witterungsrisiko.

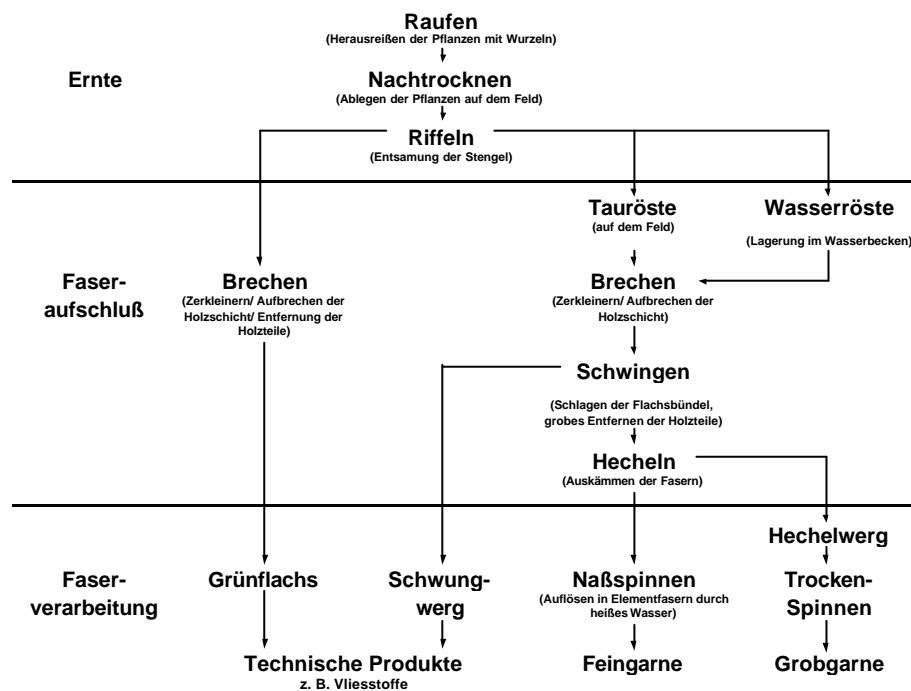


Abb. 2, Flachsfasergewinnung (nach [17])

Die im Röstverfahren gewonnen Fasern eignen sich auf Grund ihrer Länge und Feinheit besonders zur Textilherstellung. Für technische Anwendungen werden die beim Aufschluss der textilen Fasern anfallenden Kurzfasern eingesetzt. Mittlerweile existieren Verarbeitungslinien, welche auf eine Röste verzichten und so die damit verbundenen Risiken vermeiden. Die Fasern werden nach dem Trocknen auf dem Feld rein mechanisch aufgeschlossen [5]. Die so gewonnenen Fasern sind wesentlich kürzer und grö-

ber, aber sind dennoch gut zum Einsatz als Verstärkungsfasern von Kunststoffen geeignet. Durch die geringe Anzahl der Prozessschritte ist der Faserpreis geringer im Vergleich zu den traditionell erzeugten Röstflachsfasern.

2.2 Matrices

Zu einem großen Teil werden derzeit in technischen Anwendungen Naturfaserverbundwerkstoffe mit duroplastischer Kunststoffmatrix eingesetzt. Diese Tendenz wird verstärkt durch die Entwicklung leistungsfähiger duroplastischer Matrixsysteme auf Basis nachwachsender Rohstoffe [72]. Größter Vorteil von duroplastischen Matrixsystemen ist die gute chemische Kompatibilität der Einzelkomponenten. Sowohl Matrix als auch Fasern sind gekennzeichnet durch einen polaren Molekülaufbau. Dadurch bilden sich unterschiedliche chemische Bindungen zwischen Faser und Matrix aus, es kommt zu einer sehr guten Haftung zwischen den beiden Komponenten.

Herkömmliche Duroplaste wie Epoxydharze (EP-Harze) oder ungesättigte Polyesterharze (UP-Harze) besitzen den Nachteil, dass in flüssigem Zustand verarbeitet werden müssen. Zum Einen beschränkt dies die Lagerfähigkeit der Materialien, zum Anderen müssen umfangreiche Vorkehrungen zum Arbeitsschutz getroffen werden.

Die Verwendung von thermoplastischen Matrixmaterialien kann demgegenüber ohne besondere Vorkehrungen zum Arbeitsschutz erfolgen. Der wesentlichste Vorteil thermoplastischer Kunststoffe ist das sehr große Recyclingpotential. Insbesondere in Kombination mit Naturfasern, welche eine geringe Fasereinkürzung bei wiederholter Verarbeitung aufweisen, ist eine Wiederverwendung mit nur geringem Rückgang der Eigenschaften möglich [1, 79].

Technologisch besonders interessant ist die Kombination von Naturfasern und Polyolefinen, insbesondere Polypropylen (PP). PP besitzt gute mechanische Eigenschaften und eine mit der thermischen Stabilität der Naturfasern verträgliche Schmelztemperatur. Die weite Verbreitung von PP als Werkstoff in vielen technischen Anwendungen ist ein weiterer Vorteil in Hinblick auf die Recyclingfähigkeit [27].

Die Nachteile der thermoplastischen Naturfaserverbunde liegen in der schlechten Haftung zwischen Fasern und Matrix. Der Molekülgrundkörper der Polyolefine ist unpolar. Um eine ausreichende Haftung zwischen polarer Faser und unpolarer Matrix zu erreichen ist die Anwendung von Haftvermittlern unumgänglich

2.3 Haftvermittler

Ein intensiv untersuchtes Problem bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen allgemein und speziell bei thermoplastischen Naturfaserverbunden ist die Faser-Matrix-Haftung. Chemische Haftvermittler auf Basis von Silanen [3, 33, 41] oder maleinsäureanhydrid (MAH)-modifiziertem Polypropylen [16, 60, 61, 79] und physikalische Methoden wie die Plasmabehandlung [8] zeigen teilweise sehr gute Ergebnisse.

Die Anwendung von MAH zur Verbesserung der Faser-Matrix-Haftung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Beim direkten Aufbringen des gelösten MAH-PP-Copolymers auf die Naturfasern bzw. das Verstärkungshalbzeuges durch Tränken oder Aufsprühen ergibt sich eine hohe Schadstoffbelastung durch das verwendete Lösungsmittel Xylol, einem aromatischen Kohlenwasserstoff.

Günstiger ist die Verwendung von PP, welches bereits einen Anteil MAH in der Molekülstruktur enthält. Es sind bei der Verarbeitung keine zusätzlichen Arbeitsschritte zur Haftvermittlerapplikation erforderlich und durch den Halbzeugherstellungsprozess ist eine homogene Verteilung der PP-Fasern und des enthaltenen Haftvermittlers gesichert. Zudem kann der Haftvermittler optimal auf das Matrixmaterial abgestimmt werden. Einziger Nachteil gegenüber dem Einsatz einer separaten Haftvermittlerkomponente ist die festgelegte Haftvermittlerkonzentration, welche in der Entwicklungsphase neuer Werkstoffe zu Einschränkungen führt.

2.4 Bauteilherstellung aus flachfaserverstärkten Thermoplasten

2.4.1 Allgemeines

Die Herstellungstechnologien für flachfaserverstärkte Kunststoffe sind an bekannte Verfahren angelehnt. Es werden im Folgenden ausschließlich Verfahren vorgestellt, die

den Erhalt großer Faserlängen sicherstellen. Verfahren zur Kurzfaserverstärkung von Kunststoffen sind in der Literatur ausführlich beschrieben, z.B. in [1, 41, 79].

Die Verarbeitung von duroplastischen Matrixwerkstoffen, EP oder PU- Harze [7, 50, 59], erfolgt im SMC- oder BMC-Verfahren [10, 27]. Der erreichbare Verstärkungfasergehalt liegt mit diesen Verfahren bei max. 50 Gew.-%.

Für die Naturfaserverstärkung von Thermoplasten wird das NMT-Verfahren (in Anlehnung an das GMT-Verfahren) sowie das Film-stacking-Verfahren [57] eingesetzt. Speziell für die Naturfaserverarbeitung entwickelte Verfahren sind das Pressen von Hybridvliesstoffen [38, 57, 62] und das EXPRESS-Verfahren [26, 27]. In der Entwicklung befinden sich zunehmend Verfahren zum Verpressen von Langfaser-Extrusionsmassen [25].

2.4.2 Tiefziehen von Organoblechen im Pressverfahren

Als Organoblech wird ein plattenförmiges Halbzeug aus faserverstärktem, thermoplastischen Kunststoff bezeichnet. Diese Art von Halbzeug ist besonders bei der GMT-Verarbeitung Stand der Technik. Die Verwendung dieses Halbzeug ermöglicht die Erwärmung vor der Umformung mittels Wärmestrahlung, da sich keine isolierende Luft mehr im Halbzeug befindet. Die Matrix kann als Pulver, Granulat oder Folie auf das Faserhalbzeug aufgebracht werden, wobei ein sehr gut konfektionierbares und handhabbares Halbzeug entsteht.

Für Naturfasern besteht das wesentliche Problem in der durch den Wärmeeintrag bei der Halbzeugherstellung hervorgerufenen thermischen Belastung der Fasern. Eine Erwärmung bereits vor der Bauteilherstellung limitiert die Verarbeitungszeit bzw. Verarbeitungstemperatur im Formgebungsprozess zusätzlich zu den ohnehin gegebenen Grenzen (vergleiche Kapitel 4.1.3).

Eine weitere Einschränkung ergibt sich bei der Verwendung von Organoblechen hinsichtlich der Umformbarkeit. GMT Materialien sind darauf ausgelegt, dass die komplette Formfüllung erst im vollständig geschlossenen Werkzeug durch Fließvorgänge erreicht wird. Bei vergleichbarem Gewichtsanteil ist der Volumengehalt von Naturfasern gegenüber Glasfasern jedoch deutlich höher, wodurch der wesentlichste Umformmechanismus

nicht das Fließen der fasergefüllten Schmelze, sondern das Tiefziehen des Vliesstoffes ist. Bei einer Vorkonsolidierung zum Organoblech wird das Tiefziehvermögen stark eingeschränkt.

2.4.3 Film-stacking-Verfahren

Das Film-stacking-Verfahren ist aus der Verarbeitung von synthetischen Verstärkungsfasern im thermoplastischer Matrix bekannt. In eine Pressform werden wechselweise Lagen des Matrixmaterials (meist als Folie) und des Verstärkungsfaserhalbzeugs (Gelege, Gewebe, Vliesstoff) eingelegt. Die Pressform wird über die Schmelztemperatur des Matrixmaterials erwärmt und während des Pressvorganges durchdringt der aufgeschmolzene Kunststoff das Faserhalbzeug.

Das Film-stacking-Verfahren zeichnet sich durch große Flexibilität in Bezug auf den herstellbaren Verbundwerkstoff aus. Der Flachsfasergehalt wird durch Einlegen von Thermoplastfolien und Faserhalbzeugen in unterschiedlichen Anteilen variiert. Verschiedene textile Flächengebilde und Matrixmaterialien lassen sich beliebig kombinieren. Durch den Schichtaufbau muss die thermoplastische Matrix das Faserhalbzeug durchdringen. Bei sehr dichten Halbzeugen sind hohe Pressdrücke erforderlich, die Gefahr von nicht durchtränkten Fehlstellen steigt.

2.4.4 Schmelze-Extrusions-Verfahren

Das Schmelze-Extrusions-Verfahren, in [26] und [27] EXPRESS-Verfahren genannt, basiert auf dem Ansatz, die thermische Belastung der Naturfasern bei der Verarbeitung zu reduzieren.

Die Verfahrensschritte Plastifizieren der Matrix und Bauteilherstellung durch Pressen sind räumlich und zeitlich voneinander getrennt. Das Matrixmaterial wird in einem verfahrenbaren Extruder erschmolzen, die Zuschnitte des Faserhalbzeuges sind in das temperierte Tauchkantenwerkzeug eingelegt. Die Schmelze aus dem Extruder wird auf die Faserhalbzeuge abgelegt und durch Schließen der Presse werden diese von der Schmelze durchtränkt.

Durch die externe Aufheizung des Matrixmaterials wird eine Erwärmung der Naturfasern

über längere Zeit vermieden. Diese Schonung der Naturfasern ist sehr bedeutsam für die resultierenden mechanischen Verbundeigenschaften.

Probleme bereitet die Durchtränkung der Faserhalbzeuge. Die Flächenmasse der eingesetzten Naturfaservliese kann bis zu 350 g/m² für Flachswerg bzw. 500 g/m² für andere Fasern betragen [27]. Dadurch lassen sich Bauteildicken bis 3 mm erreichen. Die hohe Viskosität der erkaltenden Schmelze beinhaltet die Gefahr von Fehlstellen ohne Matrixmaterial oder Einschlüssen von Luftblasen.

2.4.5 Hybridhalbzeuge

Hybridhalbzeugen ist gemeinsam, dass Verstärkungsfasern und Matrixmaterial in Faserform gemeinsam zu einem Halbzeug verarbeitet werden. Bekannt ist diese Technologie bei Glasfaserverbunden aus „Comingled“-Materialien [58]. Die Herstellung von Geweben und Gelegen aus diesen Materialien ist Stand der Technik.

Prinzipiell ist die Herstellung von Hybridfäden aus Flachs- und Thermoplastfasern und deren Weiterverarbeitung in bekannten textilen Flächenbildungstechnologien möglich. Die Vielzahl der notwendigen Prozessschritte sind jedoch mit hohen Kosten verbunden.

Der Einsatz von Vliesstoffen zur Verstärkung von Kunststoffen bietet gegenüber Geweben, Gewirken und Gestriicken folgende Vorteile [56]:

- günstige Herstellungskosten durch wenige Produktionsstufen,
- „downsizing“ der mechanischen Eigenschaften für Einsatzfälle, in denen Gewebe u. a. überdimensioniert sind,
- die Möglichkeit, bestimmte Eigenschaften der Einzelfaser besser zur Wirkung zu bringen als bei anderen textilen Flächengebilden,
- weitgehende Einstellbarkeit der Eigenschaften,
- Verarbeitbarkeit unterschiedlichster Fasersorten und Faserqualitäten, wie Abfallfasern oder grobe Fasern.

Als Nachteile lassen sich folgende Punkte nennen:

- Faserausrichtung entsteht zufällig bzw. ist nur statistisch über einzelne Flächeneinheiten beschreibbar,
- Kein gezielt anisotroper Werkstoffaufbau möglich.

Aus diesen Gründen werden in vielen technischen Anwendungen vor allem aus dem Bereich des Automobilbaus Mischvliesstoffe aus Naturfasern und thermoplastischen Kunststofffasern eingesetzt. Aus der Mischung von Verstärkungs- und Matrixfasern bereits bei der Halbzeugherstellung resultiert eine sehr homogene Verteilung der Verstärkungsfasern im Halbzeug und daraus folgend auch im Bauteil. Die von der Matrix zum vollständigen Benetzen der Fasern zurückzulegenden Fließwege sind minimal, d.h. es kann eine gleichmäßige Benetzung der Verstärkungsfasern erreicht werden, was sich positiv auf die Faser-Matrix-Haftung auswirkt.

2.5 Vliesstoffe – Herstellung, Verfestigung, Einflussfaktoren

2.5.1 Allgemeines

Für die Verarbeitung von Flachs- und Polypropylenfasern zu Vliesstoffen sind prinzipiell mechanische, aerodynamische und hydrodynamische Vliesherstellungsverfahren einsetzbar. Für technische Anwendungen kommen vorwiegend mechanische Vliesherstellungsverfahren zum Einsatz, da die mechanische Vlieserzeugung unempfindlich ist gegenüber Schwankungen in den Faserabmessungen und der Faserqualität sowie enthaltenen Verunreinigungen.

Maßgeblich für die Verarbeitungseigenschaften ist die Auswahl der Verfestigungstechnologie. Weit verbreitet ist die Nadeltechnologie, deren Vorteile hohe Produktivität und Prozesssicherheit sind. Interessant zur Herstellung von Vliesstoffen mit besonderen Eigenschaften, vorrangig in Bezug auf das Umformverhalten sind die Verfahren Malivlies, Maliwatt und Kunit, die unter dem Begriff (Näh-) Wirktechnologien zusammengefasst werden.

2.5.2 Nadeltechnologie

Beim Verfestigen von Vliesstoffen durch Vernadeln wird das Faservlies mit speziellen Widerhakennadeln senkrecht zur Oberfläche durchstoßen. Die Widerhaken der Nadeln zeigen in Einstichrichtung, erfassen deshalb beim Einstich eine Anzahl Fasern und stoßen diese in Schlaufenform durch das Vlies (Prinzip der Vliesvernadelung siehe auch Abb. 3). Somit ergibt sich eine „poröse Vliesstruktur mit vertikalen Faserpfropfen, die gleichmäßig verteilt sind“ [11]. Die Struktur eines Nadelvliesstoffes zeigt Abb. 4.

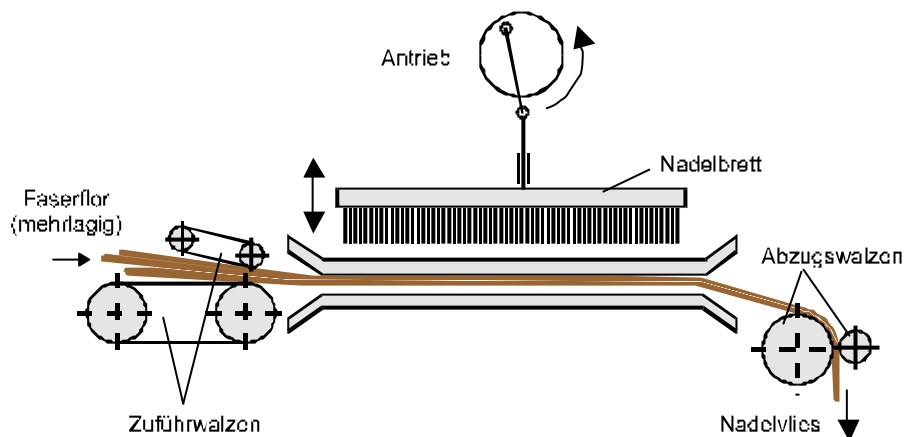


Abb. 3: Vliesverfestigung durch Vernadeln

Die in [11] beschriebenen Untersuchungen ergaben, dass „hinsichtlich erreichbarer Festigkeit, Energiebedarf, zeitlichem Aufwand und Maschinenparametern (Stichdichte, Einstichtiefe, Stichelänge, Maschinenfeinheit)“ das Vernadeln „optimal“ ist im Vergleich zu anderen mechanischen Verfestigungstechnologien.

Die Eigenschaften eines vernadelten Mischvliesstoffes aus Flachs- und Polypropylenfasern werden u.a. beeinflusst durch Fasersorte, Flächenmasse, Einstichtiefe, Stichdichte, Nadelart und bei Mischvliesstoffen dem Mischungsverhältnis der Fasern.

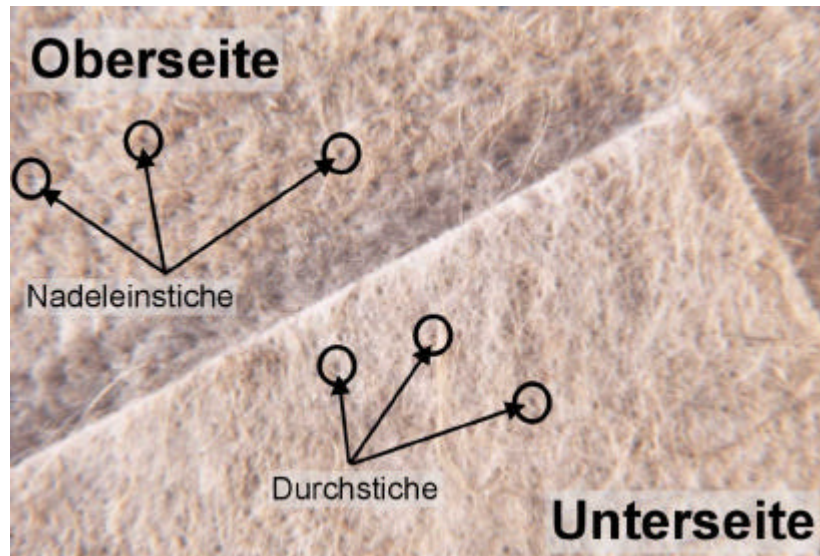


Abb. 4: Vliesstoff, verfestigt nach der Nadeltechnologie

2.5.3 Malivlies Technologie

Nach der Malivlies-Technologie erfolgt eine Verfestigung durch Maschenbildung bevorzugt mit den Fasern, die quer im Vlies angeordnet sind [29]. Dadurch entsteht eine „poröse Vliesstruktur mit einer teilweisen Fasermaschenseite und einer horizontalen Faseranordnung außerhalb des Fasermaschenteils“ [11].

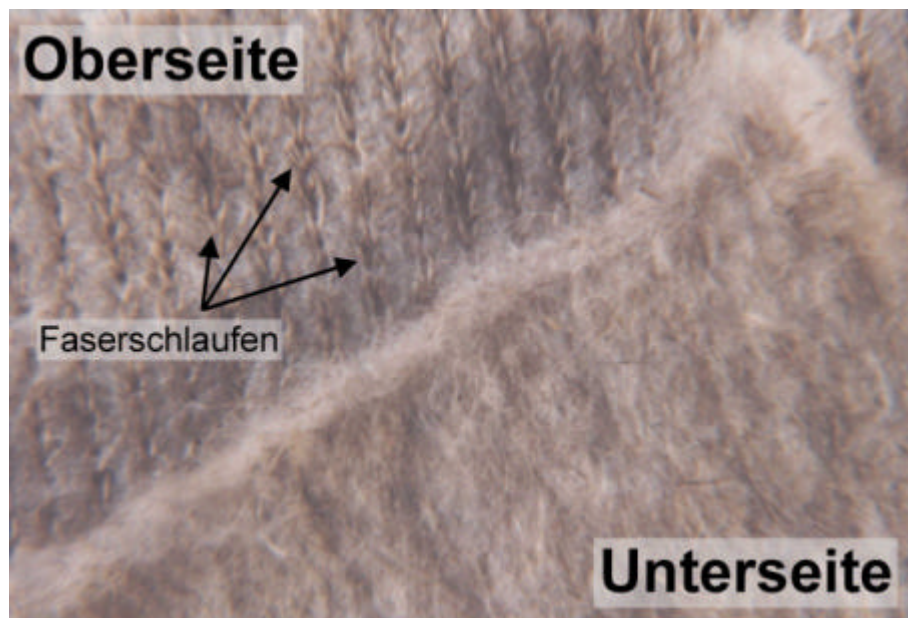


Abb. 5 : Vliesstoff, verfestigt mit der Malivlies-Technologie

Einfluss auf die Eigenschaften von Maliwatt Vliesstoffen haben die Art der eingesetzten Fasern, die Flächenmasse, das Mischungsverhältnis von Flachs- und Polypropylenfasern, die Maschinenfeinheit (Anzahl Nadeln pro 25,4 mm) und die Stichlänge.

2.5.4 Maliwatt Technologie

Maliwatt ist der erste Typ der Nähwirktechnologien Malimo. 1957 wurde die erste entsprechende Maschine vorgestellt [5]. Beim Maliwatt Verfahren sind die Fasern des Vlieses nicht an der Maschenbildung beteiligt. Es erfolgt ein Übernähen des Vlieses in Längsrichtung (Abb. 6).

Die Art der Bindefäden, die gewählte Bindungsart, sowie Stichlänge und Nahtabstand haben bedeutenden Einfluss auf die textilphysikalischen Eigenschaften der Vliesstoffe [29]. Weiterhin variiert werden können die Parameter Flächenmasse und Flachsfaseranteil.

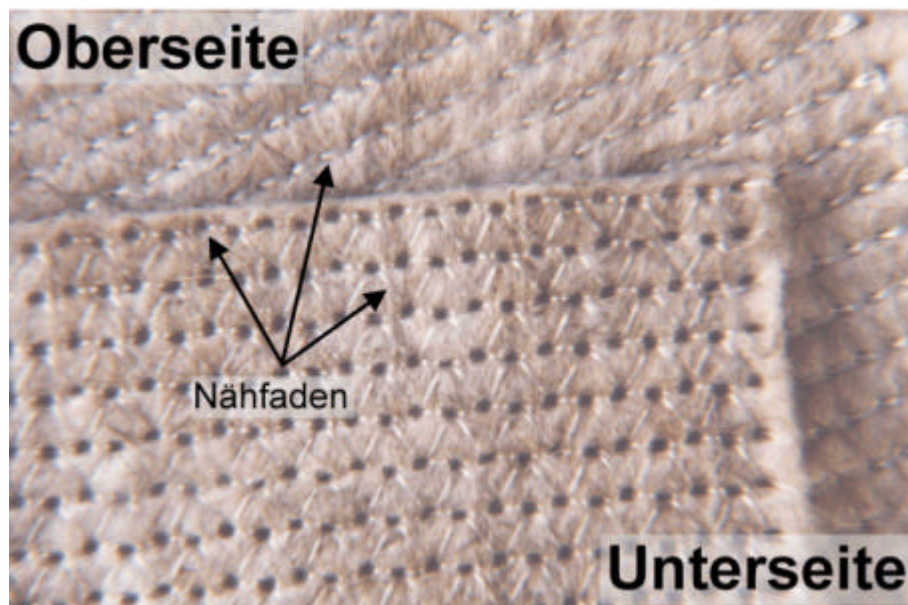


Abb. 6: Vliesstoff, verfestigt mit der Maliwatt Technologie

2.5.5 Kunit Technologie

In [11] werden Kunit Vliesstoffe als „poröse Vliesstruktur mit einer elastischen Faserma-schenseite und einer Faserbüschelseite mit ausschließlich vertikaler Faseranordnung“ beschrieben. Mit Hilfe einer Stopfeinrichtung werden leichte Faservliese in der Arbeits-stelle verdichtet und zu einem Vlies mit Polfalten umgeformt [29] (Abb. 7).

Dabei tritt eine gewisse Umorientierung der Fasern in Dickenrichtung ein. Besonders interessant ist diese Vliesstoffvariante zum Aufbau von Sandwichstrukturen, bei denen die Polfalten als abstandshaltender Kern dienen. Die Eigenschaften können außer

durch Faktoren wie dem Flachsfasergehalt, der Flachsfaserart, etc. insbesondere durch die Maschinenfeinheit, die Stichelänge sowie die Höhe der Polfalten beeinflusst werden.

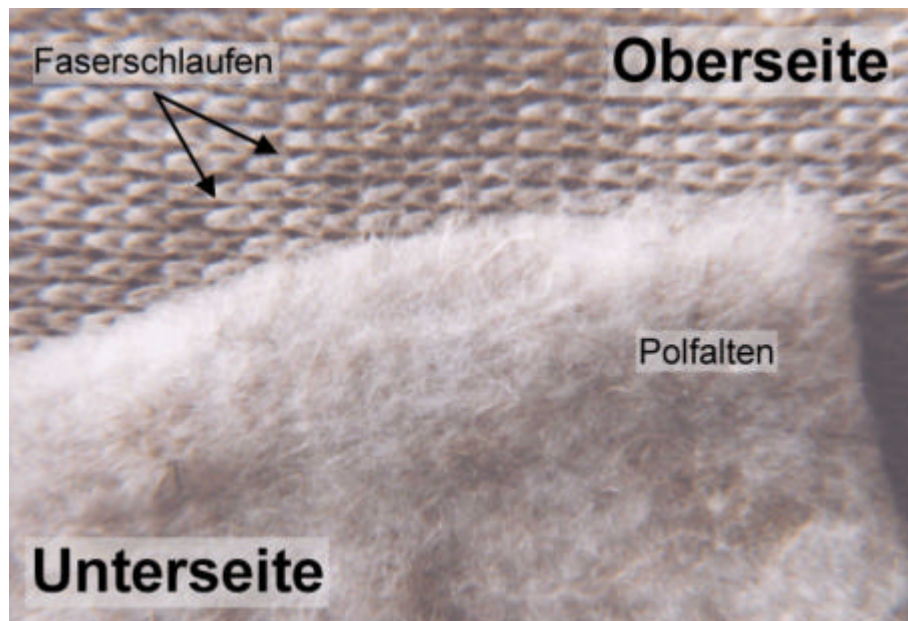


Abb. 7: Vliesstoff, verfestigt mit der Kunit Technologie

2.6 Modelle zur Beschreibung der Eigenschaften von Vliesstoffen

2.6.1 Mathematisch- theoretische Modelle

2.6.1.1 Numerisches Modell – Finite Element Methode

Die grundsätzlichen Anforderungen an eine Computersimulation des Verformungsverhaltens von Vliesstoffen wurden in [12, 13, 14] dargestellt. Grundlage ist die Erstellung eines zweidimensionalen Netzes mit, nach bestimmten Regeln, zufällig verteilten Bindungspunkten. Jedem Bindungspunkt und den Fasern werden mechanische Eigenschaften zugeordnet, welche in einer Datenbank abgelegt sind. Kern des Rechnerprogramms ist die Lösung der Gleichungen zur Herstellung des statischen Gleichgewichtes an jedem Bindungspunkt nach einem infinitesimalen Verformungsschritt. Die erzielten Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmungen für die im Streifenzugversuch gemessenen Verformungen und Kräfte.

Für die Simulation von thermo-punkt-gebundenen PE-Vliesstoffen wurde in [35] ein Materialmodell entwickelt, welches die Berechnung der Zugeigenschaften mittels der Fini-

te-Element-Methode (FEM) erlaubt. Berücksichtigt werden die Form der Bindungspunkte, die Dichte des Vliesstoffes, die Faserorientierung, die Kräuselung der Fasern, sowie die Zugeigenschaften der Fasern und der Bindungspunkte. Die Modellierung einzelner Bindungspunkte ist den Verhältnissen bei Nadelvliesstoffen ähnlich. In diesem Modell werden regelmäßig verteilte Bindungspunkte modelliert, welche eine definierte Bindungskraft besitzen. Die Übereinstimmung zwischen praktischem Zugversuch und Simulationsrechnung wird als zufriedenstellend beschrieben.

2.6.1.2 Mikromechanisches Modell, Laminattheorie

Nach [63] können für einen wirrfaserverstärkten Verbund folgende Gleichungen für die Bestimmung der drei Elastizitätskonstanten E , ν und G hergeleitet werden. Annahmen sind: Faser isotrop und kein Einfluss der Faserlänge, da $l/D > 100$.

$$E = \frac{\left[E_{11} + 4 \cdot (1 - \mathbf{n}_{21})^2 \cdot K_{23} \right] \cdot \left[E_{11} + (1 - 2 \cdot \nu_{21})^2 \cdot K_{23} + 6 \cdot (G_{12} + G_{23}) \right]}{3 \cdot \left[2 \cdot E_{11} + (8 \cdot \mathbf{n}_{21}^2 + 12 \cdot \mathbf{n}_{21} + 7) \cdot K_{23} + 2 \cdot (G_{12} + G_{23}) \right]} \quad (1)$$

$$\mathbf{n} = \frac{E_{11} + 2 \cdot (2 \cdot \mathbf{n}_{21}^2 + 8 \cdot \mathbf{n}_{21} + 3) \cdot K_{23} - 4 \cdot (G_{12} + G_{23})}{2 \cdot \left[2 \cdot E_{11} + (8 \cdot \mathbf{n}_{21}^2 + 12 \mathbf{n}_{21} + 7) \cdot K_{23} + 2 \cdot (G_{12} + G_{23}) \right]} \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mathbf{n})} \quad (3)$$

Die Näherungen für eine vorzugsweise Faserorientierung in der Ebene (2D-Fall) und im Raum (3D-Fall) ergeben folgende Vereinfachungen:

Wirrfaserverstärkte Verbunde (2D-Fall):

Unter der Annahme, dass Fasern und Matrix inkompressibel sind und $\mathbf{n}_f = \mathbf{n}_m = 0,5$ ergibt sich aus (1) und (3):

$$E = \frac{1}{3} \cdot \mathbf{j} \cdot E_f + \frac{1}{3} \cdot (1 - \mathbf{j}) \cdot E_m + \frac{19}{27} \cdot E_m \cdot \frac{(1 + \mathbf{j}) \cdot E_f + (1 - \mathbf{j}) \cdot E_m}{(1 - \mathbf{j}) \cdot E_f + (1 + \mathbf{j}) \cdot E_m} \quad (4)$$

$$G = \frac{1}{3} \cdot \mathbf{j} \cdot G_f + \frac{1}{3} \cdot (1-\mathbf{j}) \cdot G_m + \frac{19}{27} \cdot G_m \cdot \frac{(1+\mathbf{j}) \cdot G_f + (1-\mathbf{j}) \cdot G_m}{(1-\mathbf{j}) \cdot G_f + (1+\mathbf{j}) \cdot G_m} \quad (5)$$

Wirrfaserverstärkte Verbunde (3D-Fall):

Mit den Annahmen Fasern und Matrix sind inkompressibel, $\nu_f = \nu_m = 0,5$ folgt für dreidimensional wirrfaserverstärkte Verbunde aus (1) und (3):

$$E = \frac{E_f \cdot \mathbf{j}}{5} + \frac{E_m}{5} \cdot \frac{(5+2 \cdot \mathbf{j} + \mathbf{j}^2) \cdot E_f + (5+\mathbf{j}) \cdot (1-\mathbf{j}) \cdot e_m}{(1-\mathbf{j}) \cdot E_f + (1+\mathbf{j}) \cdot E_m} \quad (6)$$

$$G = \frac{G_f \cdot \mathbf{j}}{5} + \frac{G_m}{5} \cdot \frac{(5+2 \cdot \mathbf{j} + \mathbf{j}^2) \cdot G_f + (5+\mathbf{j}) \cdot (1-\mathbf{j}) \cdot e_m}{(1-\mathbf{j}) \cdot G_f + (1+\mathbf{j}) \cdot G_m} \quad (7)$$

2.6.1.3 Stochastisch-theoretisches Modell

In [51] wird ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Verhaltens von Vliesstoffen entwickelt.

Die Fasern werden beschrieben als Zylinder der Länge l_f mit einem Durchmesser von $D=2r_f$. Die Lage der Fasern in einem karthesischen Koordinatensystem wird beschrieben vom Winkel \mathbf{q} zwischen der Faser und der X_3 -Achse sowie dem Winkel \mathbf{f} zwischen der X_1 -Achse und der Projektion der Fasern in die X_1X_2 -Ebene.

Die in [51] aufgestellten Gleichungen treffen u.a. Vorhersagen zur Anzahl der Faser-Faser-Kontakte oder zur freien Faserlänge zwischen zwei Kontakten. In [67] konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse von [51] einen Fehler aufweisen, da die Wahrscheinlichkeit des Kontaktes einer Faser mit allen N-1 Fasern gleich hoch angenommen wird. Zur Beschreibung der Systemparameter benutzt [51]

V_f	Faservolumenfraktion, Anteil Fasern im Modellraum
$\Omega(\mathbf{q}, \mathbf{f})$	Faserorientierungsdichtefunktion zur Beschreibung der Faserausrichtung im Raum.

Die modifizierten Gleichungen liefern Kennwerte wie die Anzahl der Faser-Faser-Kontakte oder die freie Faserlänge zwischen zwei Kontakten im untersuchten Modellraum. Vereinfachte Formeln für eine regellose 3D- und 2D-Verteilung der Fasern werden im Anhang 12.3 beschrieben.

2.6.2 Empirische Modelle

2.6.2.1 Vernadelungsintensität

Als Vernadelungsintensität wird die Kombination von Einstichtiefe und Anzahl der Einstiche pro Fläche (Stichdichte) definiert. Diese beiden Prozessparameter sind von zentraler Bedeutung für die Eigenschaften von Nadelvliesstoffen und wurden daher auch bereits intensiv untersucht.

Eine zunehmende Stichtiefe führt zu einem Anstieg der Festigkeit des Vliesstoffes bis zu einem Maximum, danach ist eine Abnahme der Festigkeit zu beobachten [31, 62, 68, 74]. Gleichzeitig ist eine Umorientierung der Fasern aus der Quer- in die Längsrichtung [62, 74] zu beobachten. Weiterhin sinken Flächenmasse und Vliesstoffdicke [4, 31, 68, 74], Luftdurchlässigkeit [68] sowie die Reißdehnung [74] bei steigender Stichtiefe.

Eine Zunahme der Stichdichte führt zu einer erhöhten Zugfestigkeit des Vliesstoffes [3, 62]. Nach Überschreiten eines Maximums sinkt die Festigkeit jedoch wieder [4, 31, 68, 74]. Auch sinken Flächenmasse, Vliesstoffdicke [31, 68, 74] und Reißdehnung [74] mit steigender Stichdichte. Für die Luftdurchlässigkeit gibt [68] für PE- und PP-Vliese eine Abnahme mit größerer Stichdichte an, während [3] bei Flachs/Viskose-Mischvliesstoffen eine zunehmende Tendenz beschreibt.

[74] stellt für den Einfluss von Stichdichte und Einstichtiefe folgende Gleichung vor:

$$F_{\text{Rspez}} = -A \cdot (a_2 \cdot s^{c2e})^2 + B \cdot a_2 \cdot s^{c2e} - C \quad (8)$$

Die in [4] ermittelten linearen Zusammenhänge

$$I_t = 4491,9 + 719,95 \cdot W - 2396,5 \cdot T \quad (9)$$

mit	I_t	Zugfestigkeit [g/cm]
	W	Flächenmasse [mg/cm ²]
	T	Dicke bei 0,0005 bar (0,5 g/cm ²) [mm]

lassen sich ebenfalls auf die Form von Gleichung (8) zurückführen, da Flächenmasse und Dicke quadratisch von der Stichdichte abhängen.

2.6.2.2 Flachsfaseranteil

In [3] werden die Eigenschaften von Flachs-Viskose-Mischvliesstoffen untersucht. Demzufolge nimmt die Zugfestigkeit der Vliesstoffe mit zunehmendem Flachsfaseranteil ab, in Querrichtung stärker als in Längsrichtung. Es besteht eine Kopplung mit den Vernadelungsbedingungen. Die gefundenen Regressionsgleichungen lauten:

$$R_{H,längs} = a_0 + a_1 \cdot \mathbf{n}_f + a_2 \cdot \mathbf{n}_f^2 + a_3 \cdot s + a_4 \cdot e \quad (10)$$

$$R_{H,quer} = a_0 + a_1 \cdot \mathbf{n}_f + a_2 \cdot \mathbf{n}_f^2 \quad (11)$$

Die Reißdehnung nimmt zu und sinkt nach Überschreiten eines Maximums wieder ab (Gleichung (12)). Es bestehen Kopplungen zu den Vernadelungsbedingungen:

$$e_{RH,längs} = a_0 + a_1 \cdot \mathbf{n}_f + a_2 \cdot \mathbf{n}_f^2 + a_3 \cdot \mathbf{n}_f \cdot e + a_4 \cdot s + a_5 \cdot s^2 + a_6 \cdot e + a_7 \cdot e^2 \quad (12)$$

Ebenso steigt die Luftdurchlässigkeit bei Erhöhung des Flachsfasergehaltes an, da die Dichte auf Grund der steiferen Flachsfaser abnimmt:

$$q = a_0 + a_1 \cdot \mathbf{n}_f + a_2 \cdot \mathbf{n}_f^2 + a_3 \cdot s \quad (13)$$

2.6.2.3 Flächenmasse und Art der Flachsfaser

Sowohl [3] als auch [74] beschreiben einen linearen Zusammenhang zwischen der Flächenmasse und der Rohdichte des Vliesstoffes. Dabei geht [74] von einer direkten Abhängigkeit der Flächenmasse von der Rohdichte aus, [3] beschreibt umgekehrt die sta-

tistische Abhängigkeit der Rohdichte von Flächenmasse und Flachsfaseranteil.

Die Flachsfaser ist charakterisiert durch die Feinheit, das l/D -Verhältnis und die Beschaffenheit der Oberfläche. In der Literatur werden die Auswirkungen unterschiedlicher Faserarten nur wenig betrachtet. [74] gibt lediglich an, dass die Einflüsse durch die Faserart in den Faktoren a_2 und c_2 von Gleichung (8) ausgedrückt werden.

2.6.3 Bewertung der Modellansätze

Die auf der FEM basierenden Modelle setzen eine statistische Verteilung der Bindungspunkte und der Bindungskräfte voraus. Für spezielle Belastungen dieses Vliesstoffes (z.B. Zugversuch) lässt sich das Materialverhalten mit guter Übereinstimmung zum Versuch simulieren. Die Bestimmung der Bindungskräfte in einem einzelnen Berührungspunkt in Abhängigkeit der mechanischen Vliesverfestigung ist nicht möglich. Zur sinnvollen Nutzung muss die Anwendbarkeit auf komplexe Belastungsfälle erweitert werden.

Der mikromechanische Ansatz geht von makroskopisch bestimmbar Kennwerten aus, welche für Naturfaser-Thermoplast-Vliesstoffe unkompliziert ermittelt werden können. Die Ansätze müssen jedoch erweitert werden, da die Einflüsse der mechanischen Verfestigung mit den beschriebenen Gleichungen nicht erfasst werden können.

Die stochastisch-theoretischen Ansätze zur Beschreibung von Vliesstoffen gehen ebenfalls von Bindungen der Fasern in Berührungspunkten aus. Diese Bindungen entstehen durch Verklebung der Fasern entweder durch das Material selbst (thermoplastische Fasern) oder durch Zusatzstoffe (Bindemittel). Eine direkte Übertragung auf mechanisch verfestigte Vliesstoffe ist nicht möglich, da nach einer mechanischen Verfestigung die Annahme eines zufällig verteilten Faserhaufens nicht mehr zutreffend ist. Vielmehr findet durch die Umlenkung der Fasern in Dickenrichtung eine gezielte Erhöhung der Faser-Faser-Kontakte und der Reibungskräfte zwischen den Fasern statt.

Die Anwendung empirischer Modelle ist zur mathematischen Formulierung der Einflüsse der Prozessparameter auf die Eigenschaften von Naturfaser-Thermoplast-Vliesstoffen sehr gut geeignet. Die Regressionsrechnung ermöglicht die Bestimmung der Art der Abhängigkeit sowie die Bestimmung von Abhängigkeiten zwischen ver-

schiedenen Einflussfaktoren. Der größte Vorteil empirischer Modelle ist die Anwendbarkeit auch bei Zusammenhängen, welche großen Streuungen unterworfen sind, wie dies bei naturfaserverstärkten Thermoplasten der Fall ist. Empirische Modelle sind jedoch nicht in der Lage, Aussagen über die Ursachen der beobachteten Abhängigkeiten zu treffen.

3 Zielsetzung der Arbeit

Auf dem Gebiet der Textiltechnik sind empirische Untersuchungen zum Einfluss der Herstellung von Vliesstoffen auf ihre mechanische Eigenschaften prinzipiell Stand der Technik [4, 18, 31, 62]. Speziell Naturfaser-Thermoplast-Hybridvliese und ihre Verhalten bei Schmelztemperatur wurden bisher nicht untersucht. Auch sind die Auswirkungen der Verfahrensparameter bei der Herstellung auf die Eigenschaften der Bauteile bisher nicht betrachtet worden.

Die Abhängigkeit des Umformverhaltens von der Vliesherstellung wurde noch nicht systematisch betrachtet. In den bestehenden Anwendungen wurden die eingesetzten Materialien nach dem „trial-and-error“-Prinzip ausgewählt. Eine gezielte Herstellung von auf den jeweiligen Anwendungsfall angepassten Vliesstoffen ist auf Grund fehlender Auswahlprinzipien und Auslegungsvorschriften nicht möglich. Die bekannten Simulationen zum Umformverhalten von Vliesstoffen basieren zum überwiegenden Teil auf mathematischen Wahrscheinlichkeitsmodellen. Die Gültigkeit der formulierten Materialmodelle konnte nur in geringem Maße an praktischen Versuchen überprüft werden.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass beträchtliche Defizite bei Verfahrensoptimierung und Werkstoffauswahl bestehen und die Optimierung von Werkstoffeigenschaften und Prozessparametern kaum systematisch möglich ist.

Ziel dieser Arbeit ist die Beschreibung der Einflüsse der Prozessparameter bei der Herstellung und Verarbeitung von Flachsfaser-Polypropylen-Vliesstoffen auf das Umformverhalten und die mechanischen Eigenschaften. Die Untersuchungen sind in folgende Schwerpunkte gegliedert:

a) Mechanische Eigenschaften der Vliesstoffe

Die Untersuchungen ermöglichen die Beschreibung der Einflüsse des Herstellungsprozesses auf die mechanischen Vliesstoffeigenschaften, welche ihrerseits sowohl

das Umformverhalten wie auch die mechanischen Eigenschaften des Bauteils determinieren.

b) Mechanische Eigenschaften ebener Bauteile

Die mechanischen Eigenschaften ebener Bauteile werden sowohl durch die Eigenschaften des verwendeten Halbzeuges wie auch durch die Prozessparameter während der Bauteilherstellung beeinflusst. Die Haupteinflussfaktoren werden identifiziert und quantifiziert.

c) Charakterisierung des Umformverhaltens

Zur Charakterisierung des Umformverhaltens werden geeignete Verfahren entwickelt. Untersucht werden einerseits die Auswirkung der Herstellungsparameter von Flachs-Polypropylen-Vliesstoffen auf das Umformverhalten sowie andererseits der Einfluss der Prozessparameter des Umformvorganges selbst.

Die Ergebnisse ermöglichen eine differenziertere Betrachtung von Naturfasern als Verstärkungskomponente für thermoplastische Kunststoffe und deren Besonderheiten bei der Verarbeitung. Dem Anwender von Flachs-Polypropylen-Verbundwerkstoffen soll eine gezielte Auslegung von Verarbeitungsprozessen und Halbzeugen ermöglicht werden, wodurch Perspektiven auf neue Anwendungsgebiete dieser jungen Gruppe von Faserverbundwerkstoffen eröffnet werden.

4 Charakterisierung der Ausgangsmaterialien

4.1 Eigenschaften der verwendeten Flachsfasern

4.1.1 Vorbetrachtungen

Die Eigenschaften von Flachsfasern werden durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, beginnend mit Sorte und Art, über die Anbaubedingungen bis hin zu Ernte und Faseraufschluss. Derzeit stehen noch keine verbindlichen Qualitätskriterien zur Verfügung, welche bestimmte Eigenschaften garantieren. Deutlich wird dies durch die große Bandbreite der in der Literatur angegebenen Eigenschaften von Flachs- und anderen Naturfasern (Anhang 12.1). Für den Einsatz in technischen Anwendungen ist es daher unabdingbar, die für den Anwender relevanten Eigenschaften für die gewählten Fasern zu bestimmen, da in der Regel deren Vorgeschichte nicht bekannt ist bzw. die Auswirkungen von Faktoren wie Röstzeiten oder Aufschlussverfahren auf die Eigenschaften der Fasern noch nicht vollständig geklärt sind.

4.1.2 Mechanische Eigenschaften

Ein wesentlicher Einflussfaktor ist die Prüfung der Fasern selbst. Das Ergebnis der Prüfung der Faserfestigkeit ist sehr stark abhängig von der gewählten Einspannlänge. Bei eigenen Untersuchungen in einer Universalprüfmaschine wurde bei einer Einspannlänge von 3,2 mm eine mehr als doppelt so große Faserfestigkeit gemessen im Vergleich zu einer Einspannlänge von 30 mm (Abb. 8). Die Leistungsfähigkeit der Flachsfaser für die Verstärkung von Kunststoffen wird deutlich, wenn die Messergebnisse auf eine Einspannlänge von 1,5 mm extrapoliert werden. Für diese Länge, welche deutlich über den in der Literatur angegebenen kritischen Faserlängen [1, 79] liegt, beträgt die Faserfestigkeit theoretisch mehr als 1400 MPa.

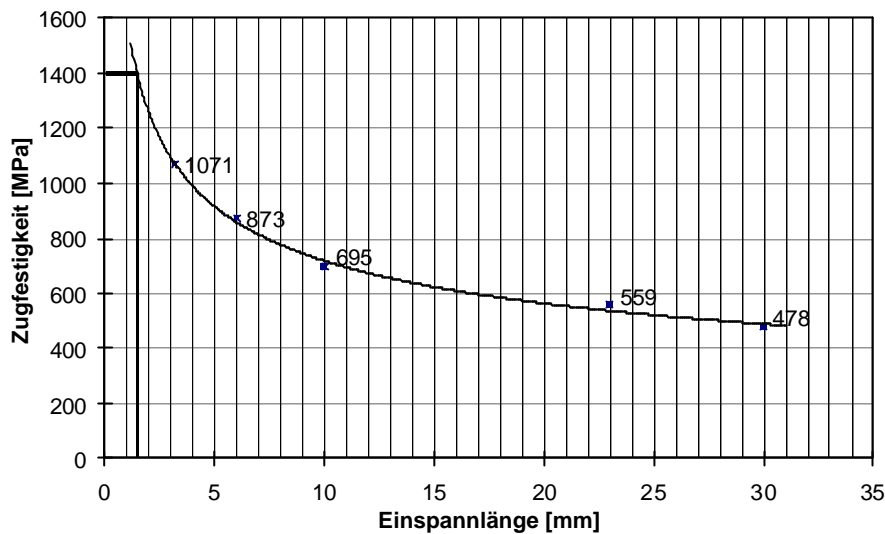


Abb. 8: Einfluss der Einspannlänge beim Einzelfaserzugversuch

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Faserfeinheit. Die Feinheit von Flachsfasern wird von der Anzahl der mechanischen Aufschlussstufen bei der Fasergewinnung bestimmt. Mit Durchlauf mehrerer Aufschlussstufen, bestehend aus profilierten Brecherwalzen, werden die Flachsfaserbündel immer weiter vereinzelt, d.h. der Fasertiter sinkt und gleichzeitig sinken die Anteile an Holz- und Schäbenpartikeln.

Es wurden vier verschiedene Flachsfasertypen untersucht. Zwei der Fasertypen unterscheiden sich nach Herkunft und Sorte (bezeichnet als „Werg“ und „E0“). Die Fasertypen „E0“, „B0“ und „13GR“ unterscheiden sich nach dem Aufschlussgrad, d.h. der Anzahl der durchlaufenen Öffnungs- und Brechstufen. Typ E0 besitzt den niedrigsten, 13GR den höchsten Aufschlussgrad.

Die Faserfeinheit wurde gemessen nach ÖTN 077. Mit zunehmender Intensität des Faseraufschlusses sinkt der Titer der Flachsfasern (Abb. 9). Die Faserfestigkeit, gemessen mit dem Rait-Modul [53], sinkt mit zunehmendem Faseraufschluss. Die mechanische Beanspruchung durch die Brecherwalzen der Aufschlussstufen führt nicht nur zu einer Faservereinzelnung sondern ebenfalls zu einer Verminderung der Flachsfaserfestigkeit.

Nahezu keinen Einfluss auf die Flachsfaserfestigkeit hat dagegen die Wahl unterschiedlicher Fasersorten, wie der Vergleich der Sorten „Werg“ und „E0“ ergibt.

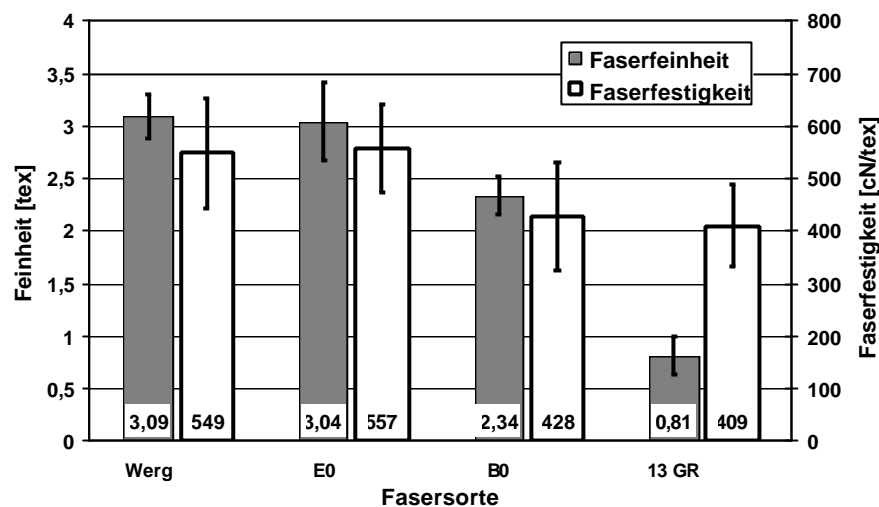


Abb. 9: Festigkeit der untersuchten Flachsfaserarten

4.1.3 Thermische Eigenschaften

Neben den mechanischen Eigenschaften sind für die Verarbeitung von Naturfasern die thermischen Eigenschaften von Bedeutung. Die thermische Belastung der Fasern während der Verarbeitung setzt sich aus Höhe der Verarbeitungstemperatur sowie der Dauer der Temperaturexposition zusammen.

Die Thermogravimetrie beruht auf der Aufzeichnung der Masse einer Materialprobe in Abhängigkeit einer Temperatur bzw. Temperaturänderung. Damit lassen sich alle physikalischen und chemischen Reaktionen untersuchen, die mit einer Masseänderung verbunden sind [19].

Es wurden Erwärmungsversuche in unterschiedlichen Reaktionsatmosphären, Luft, Argon und Vakuum (10^{-1} bar) durchgeführt. Die Proben wurden mit 2 K/min erwärmt. Diese langsame Erwärmung garantiert eine sehr feine Bestimmung der Starttemperaturen der auftretenden Reaktionen.

Die Untersuchungen zeigen, dass das Abbauverhalten in allen drei Atmosphären qualitativ gleich verläuft (Abb. 10). Bis 100 °C nimmt die Masse der Prüfeinwaage durch die Abgabe adsorbierten Wassers ab. Danach folgt ein Plateau, von welchem aus oberhalb 180 °C der thermische Abbau der Flachsproben beginnt. An Luftatmosphäre beträgt der Masseverlust bei 226 °C fünf Prozent, an Argon und im Vakuum tritt der gleiche Masseverlust erst bei einer Temperatur von 232 °C ein. Der in der Luft enthaltene Sau-

erstoff begünstigt die Bildung freier Radikale, wodurch der Abbau beschleunigt wird. Die chemischen Vorgänge, welche diesem Abbau zu Grunde liegen werden in [54] ausführlich behandelt.

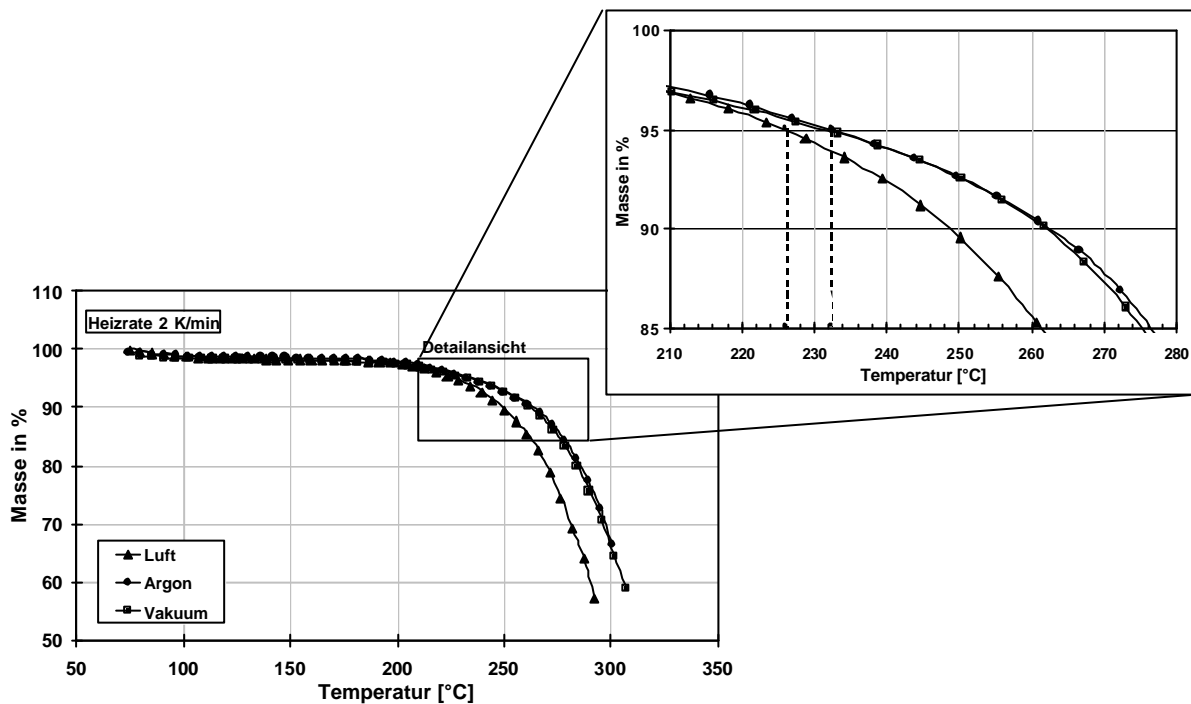


Abb. 10: Thermogravimetrie an Flachsfasern

Der Einfluss der Dauer der thermischen Beanspruchung der Fasern wurde in isothermen Versuchen ermittelt (Abb. 11). Im Temperaturbereich zwischen 160 °C und 260 °C wurde in Abstufungen von 20 K jeweils der Masseverlust der Flachsfaserproben als Funktion der Zeit ermittelt. Nach einer Aufheizphase mit 40 K/min erfolgt eine zweistündige Haltephase. Die jeweilige Haltetemperatur wurde aus gerätetechnischen Gründen erst nach 20 min. erreicht. Die Kurven sind auf diesen Zeitpunkt als Beginn der Messung normiert.

Die bei der Verarbeitung erreichten Prozesszeiten liegen bei realen Produktionsprozessen im Bereich von 2 min. bis max. 15 min.. Bis zu diesem Zeitpunkt treten bei Temperaturen bis 200 °C keine ausgeprägten Abbaureaktionen auf. Für die Verarbeitung von Naturfaserverbunden bedeutet dies, dass bei geeigneter Prozessführung, welche eine geringe Dauer der thermischen Belastung sicherstellt, Verarbeitungstemperaturen von 240 °C bis 260 °C realisiert werden können, ohne eine wesentliche Faserschädigung hervorzurufen. Weiterhin kann eine Vortrocknung des Flachsfasermaterials vor der

Verarbeitung bei Temperaturen bis zu 160 °C ohne Schädigung der Fasern über längere Zeiträume erfolgen.

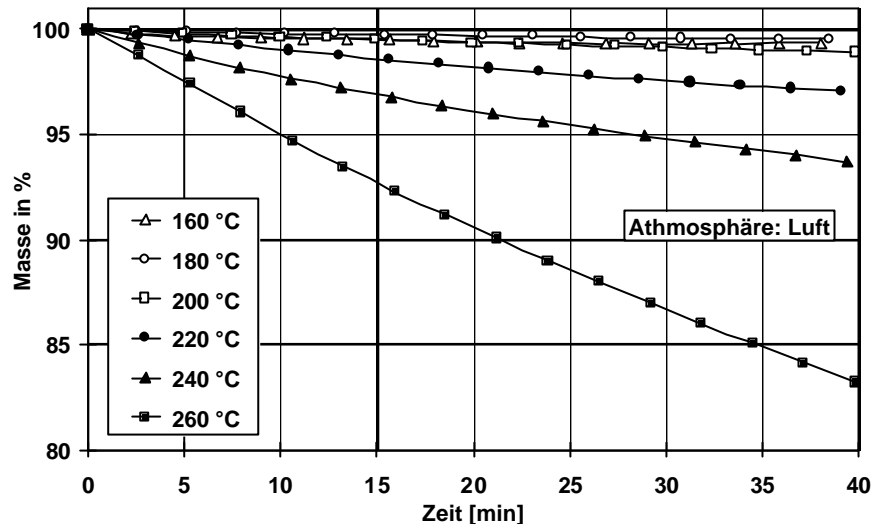


Abb. 11: Isotherme Thermogravimetrie an Flachfasern

4.2 Eigenschaften der verwendeten PP-Fasern

4.2.1 Vorbetrachtungen

Eingesetzt wurden zwei Polypropylenfasersorten. Die Fasersorte FV 10 DO soll den gleichen Molekülgrundkörper wie die Sorte FH 1000 besitzen, enthält aber zusätzlich ein aufgepfropftes Maleinsäureanhydrid-Copolymer zur Verbesserung der Faser-Matrix-Haftung für die Verstärkung mit Flachfasern in der Konzentration von 1 %. Da die Fasersorte FV 10 DO ein Versuchsmaterial ist, standen keine ausreichenden Materialkennwerte zur Verfügung. Die relevanten Verarbeitungskenndaten wurden daher mittels Thermoanalyse und Rheometrie bestimmt.

4.2.2 Mechanische Eigenschaften

Die Bestimmung der Faserfeinheit erfolgte nach DIN EN ISO 1973 [22] im Schwingungsverfahren, Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung wurden nach DIN EN ISO 5079 [23] gemessen.

Die PP-Variante ohne Haftvermittlerzusatz (FH 1000) weist eine geringere Faserfestig-

keit bei deutlich höherer Dehnung auf (Abb. 12). Unter der Voraussetzung, dass beide Faserarten den gleiche PP-Grundkörper besitzen, kann dieser Effekt nicht erklärt werden, da eine Propfreaktion mit MAH durch die kurzkettigen Moleküle in der Regel eine weichmachende Wirkung zeigt. Somit liegt der Schluss nahe, dass es sich um grundsätzlich unterschiedliche PP-Arten handelt. Zur weiteren Klärung dieser Annahme wurden rheologische Untersuchungen durchgeführt (Kapitel 4.2.3 und 4.2.3.2).

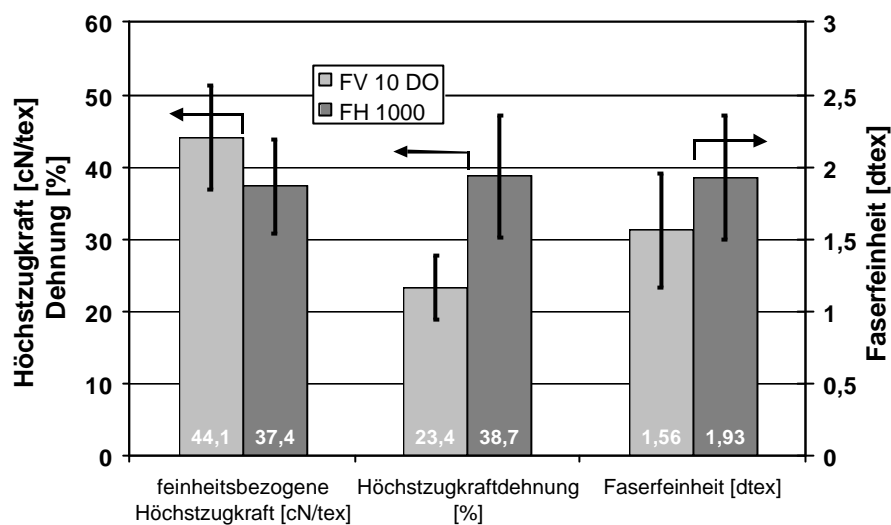


Abb. 12: Eigenschaften der verwendeten Polypropylenfasern

4.2.3 Viskosität

4.2.3.1 Mould Volume Index

Die Ermittlung des Volumenfließindex (MVI) stellt eine schnelle und leicht zu handhabende Methode dar, um das rheologische Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen zu charakterisieren.

Das nichtnewtonsche Fließverhalten von Kunststoffen spielt bei der zu untersuchenden Presstechnologie nur eine untergeordnete Rolle, da die Fließwege sehr kurz und durch den langsamen Umformvorgang die Fließgeschwindigkeiten gering sind. Die im MVI-Gerät erzeugten geringen Scherspannungen spiegeln somit die Verhältnisse bei der Verarbeitung sehr gut wider.

Die vergleichenden Untersuchungen zeigen die MVI-Kurven der Polypropylenfasersorten FH 1000 und FV 10 DO im Vergleich mit der Extrusions-Type Stamyln P. Es ist

festzustellen, dass die PP Type mit Haftvermittler (FV 10 DO) einen geringeren Volumenfließindex, also eine höhere Viskosität besitzt im Vergleich mit FH 1000 (Abb. 13).

In [60] ist ausgeführt, dass die Propfreaktion von MAH auf PP durch die Gegenwart eines Initiators einen radikalischen Abbau der PP-Ketten bedingt. Dies bestätigen ebenfalls Untersuchungen in der Literatur zum Einfluss des Haftvermittlers auf die rheologischen Eigenschaften von PP [1, 79]. Es ist somit davon auszugehen, dass den PP-Varianten FH 1000 und FV 10 DO nicht den gleichen PP-Grundkörper besitzen.

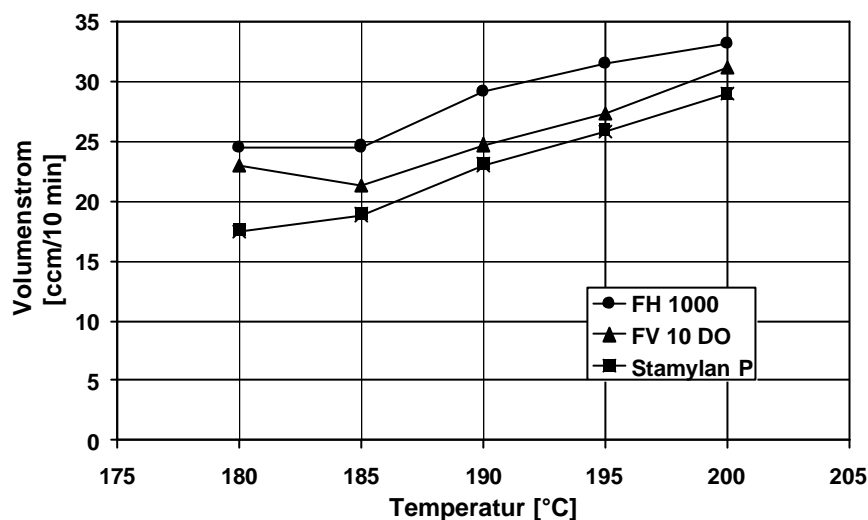


Abb. 13: Bestimmung des MVI an Polypropylen

4.2.3.2 Kapillarrheometer

Zur abschließenden Untersuchung des rheologischen Verhaltens der PP-Fasertypen wurde die Kapillarrheometrie eingesetzt. Die Messung erfolgte nach der CR-Methode (controlled rate), d.h. es wurde der sich vor der Kapillare einstellende Druck bei vorgegebener Vorschubgeschwindigkeit des Kolbens im Vorlageraum ermittelt. Für die Berücksichtigung des Einlaufdruckverlustes wurde mit verschiedenen langen Kapillaren gearbeitet. Zur Auswertung wurden die Korrekturen nach *Bagley* für den Einlaufdruckverlust und nach *Weissenberg-Rabinowitsch* für die Berücksichtigung des vom Newton'schen Fließverhalten abweichenden Strömungsprofils angewendet [21].

Die zuvor erzielten Ergebnisse konnten bei diesem Versuch bestätigt werden. Die Viskosität des gekoppelten PP liegt etwa um den Faktor 2 höher im Vergleich mit dem ungekoppelten PP (Abb. 14).

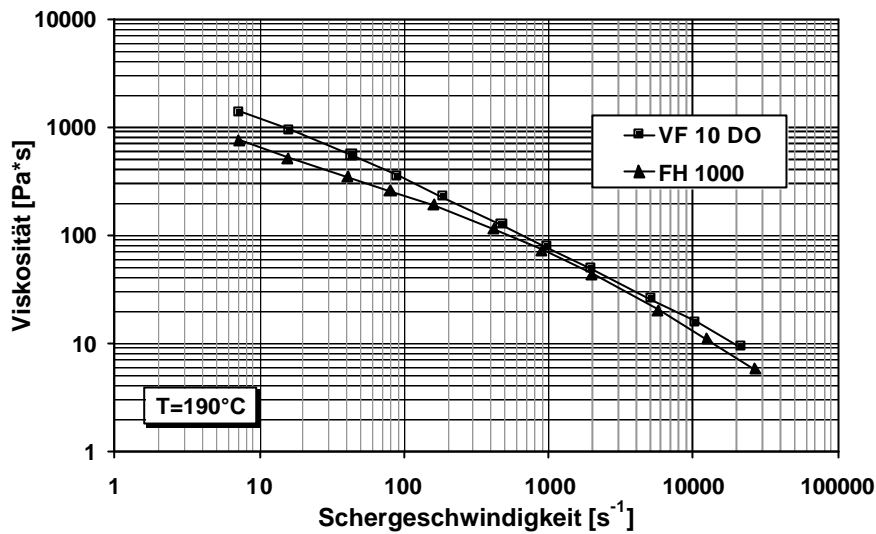


Abb. 14: Kapillarrheometrie an PP

Es ist somit auszuschließen, dass beiden PP-Sorten den gleichen Grundkörper besitzen, da die haftvermittelnden Molekülketten des MAH kürzer sind als die Molekülketten des PP und dadurch bei gleichem Grundkörper die Viskosität einer Variante mit Haftvermittler geringer sein müsste.

Damit sind die Polypropylenfasersorten FH 1000 und FV 10 D0 nicht ausschließlich durch den Haftvermittlergehalt charakterisiert, sondern müssen für die weiteren Untersuchungen als zwei völlig verschiedene PP-Materialien behandelt werden.

4.2.4 Thermische Eigenschaften

4.2.4.1 Thermisches Degradationsverhalten

Die isothermen thermogravimetrischen Untersuchungen (TG) zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Abbauverhaltens von PP an Luftatmosphäre von Zeit und Temperatur (Abb. 15). Bei Temperaturen über 160 °C kommt es zu einer annähernd linearen Massenabnahme über den untersuchten Zeitraum von 2 h. Diese durch Oxidationsprozesse hervorgerufene Degradation der PP-Fasern ist die Folge einer fortschreitenden Depolymerisation. Diese Verkürzung der Molekülketten führt zur Abnahme der mechanischen Eigenschaften [54]. Die Degradation nimmt mit zunehmender Temperatur und Expositionszeit zu. Der Vergleich mit den Ergebnissen der isothermen TG an Flachfasern (Kap. 4.1.3) zeigt, dass die Schädigung in Folge Temperatureinwirkung am Polypropylen deutlich geringer ist im Vergleich zur Flachsfaser.

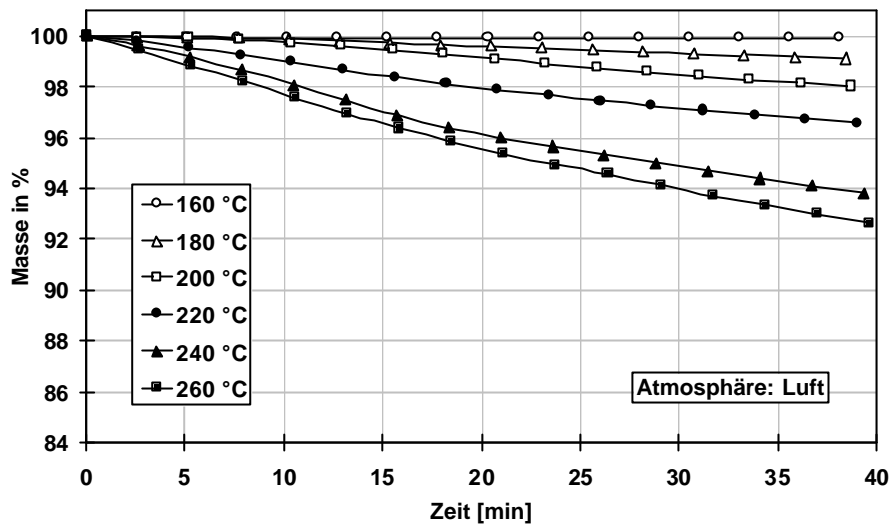


Abb. 15: Isotherme Thermogravimetrie an FH 1000

4.2.4.2 Kristallisationsverhalten

In der Differential Scanning Calorimetry (DSC) wird die Probe einem kontrollierten Temperatur-/Zeit-Programm unterworfen. Dabei werden die Wärmeströme zwischen Probe und Umgebung gemessen. „Alle physikalischen und chemischen Vorgänge, die mit einem Wärmeeffekt verbunden sind, können mittels DSC charakterisiert werden“ [44].

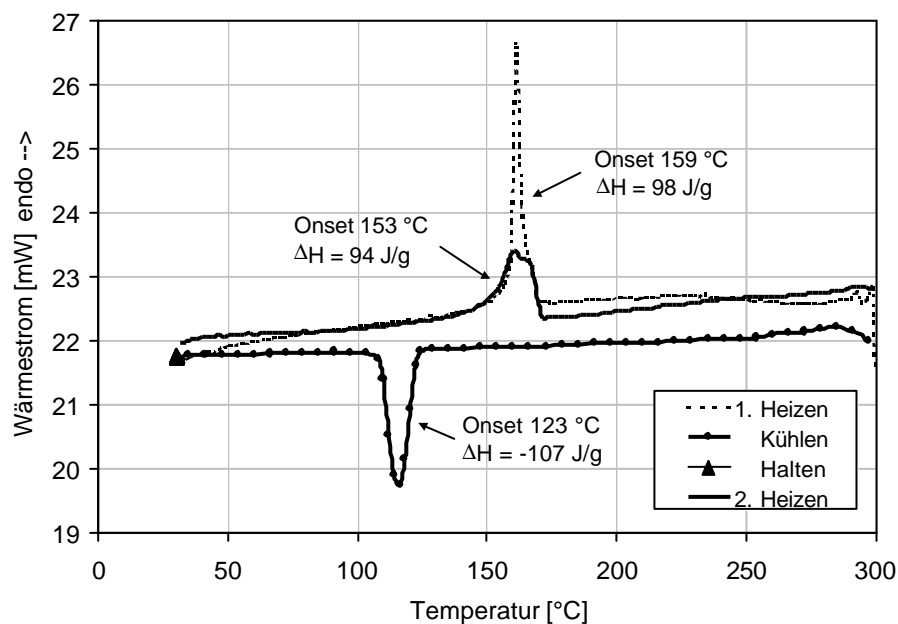


Abb. 16: Bestimmung der Schmelztemperatur mittels DSC

Die DSC-Untersuchung (Abb. 16) an FH1000 bestimmt den Beginn der Kristal-

litschmelze mit 159 °C bzw. 153 °C, wobei der erste Wert gemessen wurde bei unbekannter Vorgeschichte des Materials und der zweite Wert nach der kontrollierten Aufheizung und Abkühlung der Probe. Diese Behandlung führt zu einem reproduzierbaren Kristallisationsgrad, welcher die gemessene Onset-Temperatur des Schmelzbegins beeinflusst.

4.3 Ableitung der Prozessgrenzen

Die schematische Darstellung der Prozessgrenzen für die Verarbeitung von Flachsfaser-Polypropylen-Vliesstoffen zeigt Abb. 17.

Zu geringe Verarbeitungstemperaturen führen zu schlechter Benetzung und damit unzureichender Haftung der Flachsfasern durch die hohe Viskosität des Polypropylen. Zu hohe Verarbeitungstemperaturen führen zu einer Schädigung der Flachsfasern und der PP-Matrix. Die bei geringeren Temperaturen auftretende schlechtere Benetzung der Fasern kann durch einen hohen Verarbeitungsdruck ausgeglichen werden.

Die an den Einzelkomponenten Flachs und PP durchgeführten Untersuchungen ergeben folgende Temperaturgrenzen:

Minimaltemperatur:

Die minimale Prozesstemperatur liegt bei ca. 165 °C. Dies entspricht der in DSC-Untersuchung (Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) ermittelten Temperatur, bei der das gesamte Polymermaterial aufgeschmolzen ist.

Maximaltemperatur:

Flachs zeigt ab 226 °C in der thermogravimetrischen Untersuchung an Luft und ab 232 °C im Vakuum Zersetzungserscheinungen (Kapitel 4.1.3), ebenso die verwendeten Polypropylenarten (an Luftatmosphäre, siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die maximale Verarbeitungstemperatur kann sich an den Ergebnissen für Vakuum orientieren, da bei der Verarbeitung im Pressverfahren die Sauerstoffzufuhr zum verarbeiteten Material und damit die oxidative Wirkung des Luftsauerstoffes stark behindert wird. Die Maximaltemperatur kann nur mit Kenntnis der

Prozesszeiten festgelegt werden und kann daher je nach Expositionsdauer 200 °C bis 260 °C betragen.

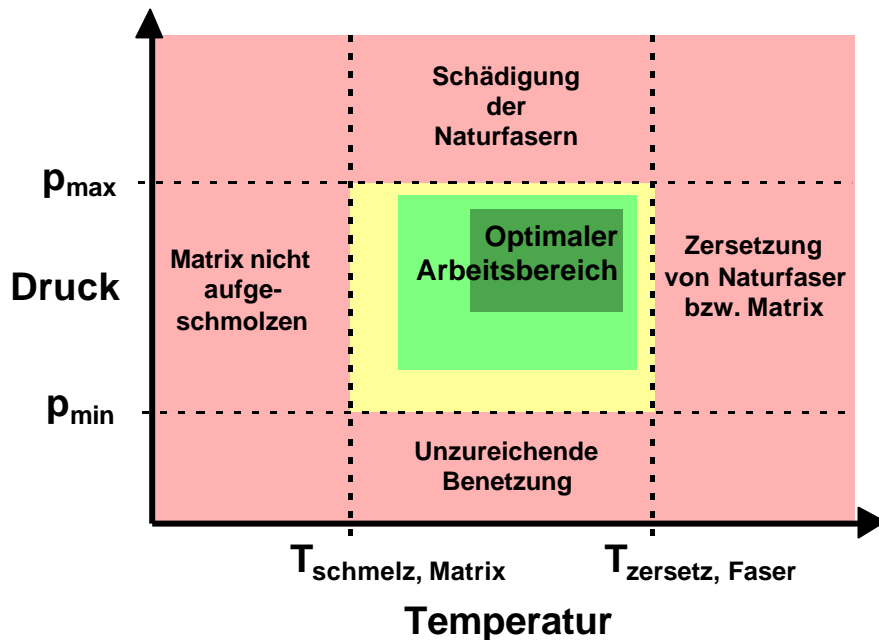


Abb. 17: Grenzen der Prozeßführung

Der Pressdruck wurde zwischen 1 N/mm² und 4 N/mm² (isothermes Verfahren) bzw. 1 N/mm² und 10 N/mm² (nicht isothermes Verfahren) variiert. Diese Prozessgrenzen sind technologisch aus der zur Verfügung stehenden Anlagentechnik begründet. Die Variationsbreite reicht dennoch aus, um den Einfluss des Pressdruckes bestimmen zu können, wie verschiedene Voruntersuchungen zeigen konnten [47, 66] und repräsentieren darüber hinaus das in der Praxis relevante Spektrum. Die Heizzeiten betragen 1 bis 40 min (siehe Anhang 12.3).

5 Einflüsse auf die mechanischen Vliesstoffeigenschaften

5.1 Untersuchte Einflussgrößen

Die mechanischen Eigenschaften von Vliesstoffen werden durch die Höchstzugkraft R_H sowie die Dehnung bei Höchstzugkraft ε_{R-H} charakterisieren. Die Prüfung wird durchgeführt nach DIN 53857-2 [20]. Bedingt durch die Herstellungs- und Verfestigungsverfahren der Vliesstoffe (Kapitel 2.5) sind die Materialeigenschaften anisotrop. Nachfolgend werden die Hauptrichtungen der Orientierung des Vliesstoffes mit Längsrichtung (parallel zur Abzugsrichtung) und Querrichtung (senkrecht zur Abzugsrichtung) bezogen auf das Endprodukt bezeichnet (Abb. 18).

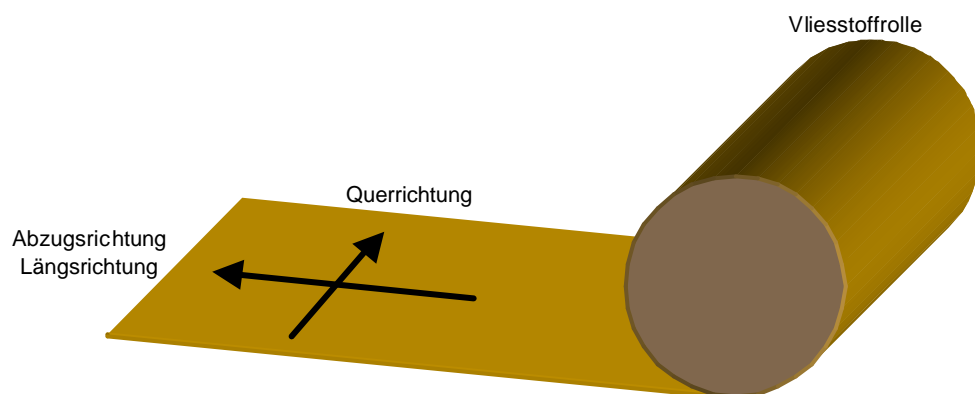


Abb. 18: Orientierung der Vliesstoffproben

Die Fasern werden durch die mechanischen Vlieslegung mittels Krempel oder Karde längs zur Produktionsrichtung orientiert. Bei der Herstellung von Nadelvliesstoffen wird das Vlies nach dem Doublieren der Vlieslagen vor der Vernadelung rechtwinklig abgezogen, in die Nadelmaschine eingeführt und anschließend auf eine Rolle aufgewickelt. Bei Abzug des Vliesstoffes von der Rolle liegt daher eine Vorzugsorientierung der Fasern quer zur Abzugsrichtung vor.

Ziel der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Flachs-Polypropylen-

Vliesstoffen ist die Ermittlung der Auswirkungen verschiedener Parameter der Vliesherstellung. Folgende Herstellungsparameter wurden variiert:

- Flachfasergehalt (30 %, 50 %, 70 %)
- Flächenmasse (400 g/m², 600 g/m², 800 g/m², 1000 g/m²)
- Stichdichte (25 E/cm², 50 E/cm², 75 E/cm², 100 E/cm²)
- Einstichtiefe (9 mm, 12 mm, 15 mm)
- Flachfaseraufbereitung (grob, mittel, fein)
- Haftvermittlergehalt (mit, ohne Haftvermittler)
- Verfestigungstechnologie (Maliwatt, Malivlies, Kunit, Nadelvlies)

Die Auswahl der Abstufungen der einzelnen Einflussfaktoren wurde dergestalt getroffen, dass einerseits ein möglichst breites Spektrum an Einstellungen abgedeckt ist, aber andererseits nur technologisch sinnvolle Einstellungen vorgenommen werden. Die vollständige Übersicht zu den Herstellungsparametern der untersuchten Vliesstoffvarianten findet sich im Anhang (Kapitel 12.2).

5.2 Verfestigungstechnologie

Die Verfestigung des Vlieses mit den in Kapitel 2.5 vorgestellten Technologien hat weitreichende Auswirkungen auf die Eigenschaften der Vliesstoffe (Abb. 19). Durch die grundlegenden Unterschiede der Verfahren kann lediglich ein qualitativer Vergleich der Verfestigungstechnologien erfolgen.

Durch den Polyesternähfaden weisen die Maliwattvliesstoffe in Produktionsrichtung (entspr. Richtung des Nähfadens) erheblich höhere Zugkräfte auf im Vergleich zu anderen Technologien (Abb. 19). Der Nähfaden verhindert gleichzeitig eine große Reißdehnung (Abb. 20). Quer zur Nahrichtung liegen die Zugkräfte sowie die Reißdehnung im Bereich der Nadelvliesstoffe und leicht darunter.

Die nach der Malivliestechnologie verfestigten Vliesstoffe zeigen für Festigkeit und Reißdehnung geringere Werte im Vergleich zu den Nadelvliesstoffen (Abb. 19 und Abb. 20).

Bei den Varianten Malivlies und Maliwatt machen sich die negativen Auswirkungen eines hohen Gehaltes an Naturfasern schon bei 70 % Flachsfasergehalt bemerkbar, da die Fasern bei diesen Technologien wesentlich weniger miteinander verschlungen sind im Vergleich zur Nadeltechnologie.

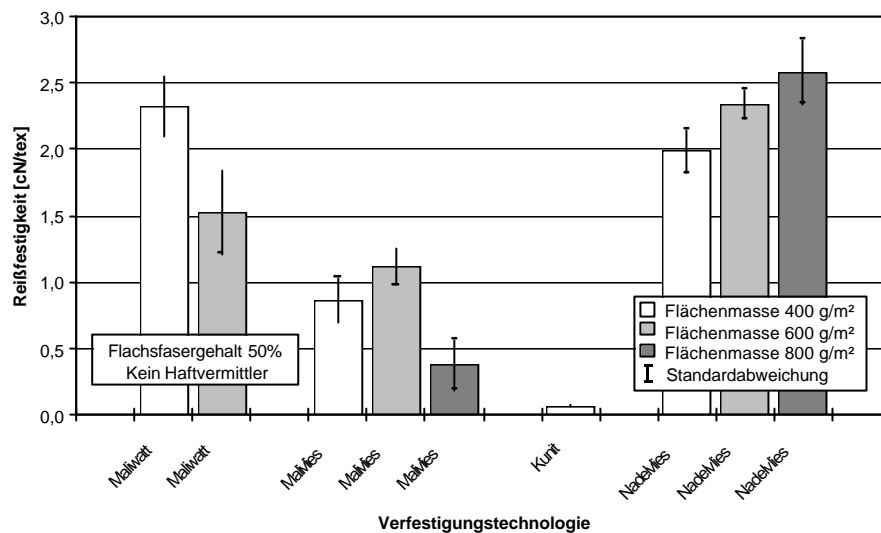


Abb. 19: Einfluss der Verfestigungstechnologie auf die Reißfestigkeit (quer)

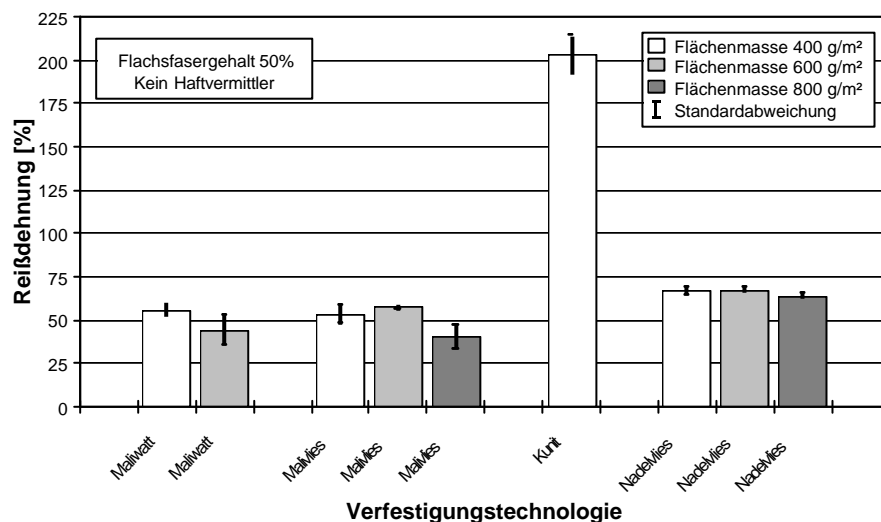


Abb. 20: Einfluss der Verfestigungstechnologie auf die Reißdehnung (quer)

Die Festigkeit des Kunitvliesstoffes quer zur Produktionsrichtung ist sehr gering, längs dagegen sehr gut (Anhang Abb. 71). Dies resultiert aus den im Gegensatz zu den Nadelvliesstoffen vorwiegend längs ausgerichteten Fasern. Sehr bemerkenswert vor allem unter den Gesichtspunkt der Umformbarkeit ist die Reißdehnung des Kunit mit über 200 % quer zur Produktionsrichtung (Abb. 20).

Die hergestellten Nadelvliesstoffe zeigen sehr ausgewogene mechanische Eigenschaften. Der Vergleich der mechanischen Eigenschaften in Längs- und Querrichtung zeigt die ausgeprägte herstellungsbedingte Anisotropie dieser Vliesstoffe (Abb. 19, Anhang Abb. 71). Die Festigkeit in Produktionsrichtung beträgt ein Drittel derer quer dazu, die Dehnungen stehen im umgekehrten Verhältnis. Gleichzeitig zu der hohen Festigkeit von über 2 cN/tex (Querrichtung) liegt die Reißdehnung immerhin noch bei 50 %, in Produktionsrichtung bei 120 % der Ausgangslänge (Anhang Abb. 72).

Die Untersuchungen zeigen, dass verschiedene Verfestigungstechnologien ein grundsätzlich verschiedenes Materialverhalten zur Folge haben. Neben der hohen Produktivität stellen Nadelvliesstoffe eine hervorragende Basis für viele Anwendungen dar, da die Festigkeits- und Dehnungseigenschaften sehr ausgewogen sind und wie im Folgenden noch gezeigt werden wird auch in weiten Bereichen durch die Herstellungsparameter variiert werden können. Für Spezialanwendungen, bei denen die lokale Dehnfähigkeit eines Nadelvliesstoffes nicht ausreicht, kann der Einsatz eines Kunitvliesstoffes erwogen werden. Zur unidirektionalen Steigerung der Festigkeit eines Flachs-Polypropylen-Vliesstoffes kann die Maliwatttechnologie eingesetzt werden. Vliesstoffe, welche mittels Malivliestechnologie verfestigt wurden, konnten weder hinsichtlich Reißfestigkeit noch Reißdehnung Vorteile gegenüber Nadelvliesstoffen zeigen. Die weiteren Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Variation der Herstellungsparameter werden nur mit Nadelvliesstoffen durchgeführt, da diese in Bezug auf ihr Eigenschaftsspektrum für den Einsatz in technischen Anwendungen favorisiert werden können.

5.3 Flachsfasergehalt und Flächenmasse

Mit steigendem Flachsfasergehalt nimmt die Anzahl der Berührungen zwischen den Flachsfasern zu. Da die Reibungskräfte zwischen Naturfasern wesentlich geringer sind als die zwischen Flachs- und PP-Fasern bzw. PP-Fasern untereinander, nimmt der Widerstand gegen eine relative Verschiebung von Fasern gegeneinander ab, die Festigkeit des Vliesstoffes sinkt (Abb. 21, Anhang Abb. 65).

Bei einer Flächenmasse von 800 g/m² erreicht die Reißfestigkeit ein Maximum. Die Faserpfropfen in den Vliesstoffen geringerer Flächenmasse sind auf Grund der gerin-

gen Materialdicke weniger gut fixiert und können sich unter Belastung wieder lösen, wodurch die Festigkeit sinkt. Bei einer Flächenmasse über 800 g/m² wird beim Eindringen der Nadel eine große Anzahl Fasern in Dickenrichtung des Vliesstoffes umgelenkt. Diese Fasern können keine Kraft in Zugrichtung mehr aufnehmen, damit sinkt die Reißfestigkeit ebenfalls.

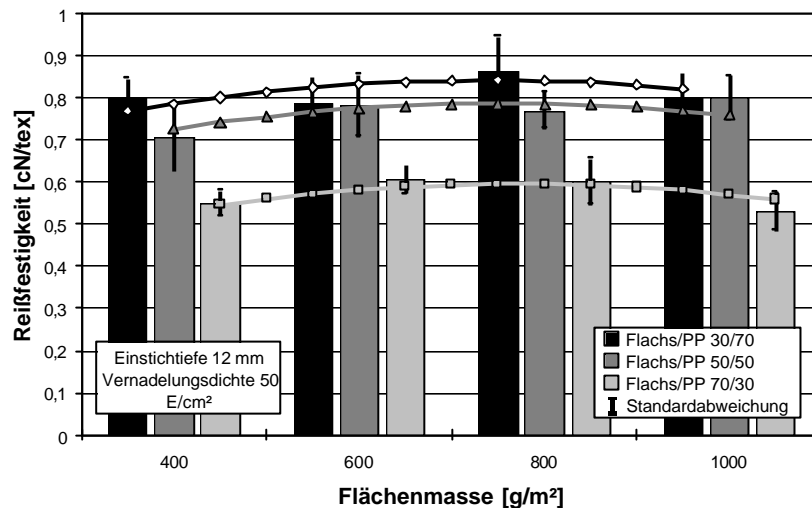


Abb. 21, Einfluss von Naturfasergehalt und Flächenmasse auf die Reißfestigkeit (längs)

Die Dehnungen verhalten sich umgekehrt proportional zu den Festigkeiten. Je höher die Festigkeit desto geringer die Reißdehnung des Vliesstoffes (Abb. 22, Anhang Abb. 66).

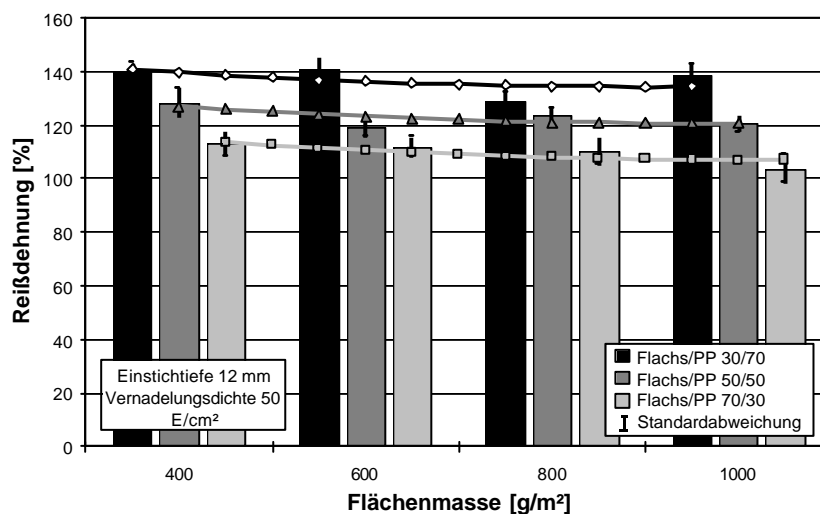


Abb. 22, Einfluss von Naturfasergehalt und Flächenmasse auf die Reißdehnung (längs)

Die Vliesstoffe weisen eine stark ausgeprägte Anisotropie auf. Die Reißfestigkeit in

Querrichtung beträgt über 300 % der Festigkeit in Längsrichtung. Dafür beträgt die Reißdehnung in Längsrichtung 200 % im Vergleich zur Querrichtung.

Mittels Regressionsanalyse wurde der Einfluss der Faktoren Flachsfasergehalt und Flächenmasse untersucht, sowie überprüft, ob eine Abhängigkeit zwischen den beiden Einflussfaktoren besteht. Ausgangspunkt der Auswertung ist Gleichung (14), welche von einem quadratischen Einfluss der beiden Parameter ausgeht und ein Koppelglied zwischen den Parametern beinhaltet. Mit diesem Ansatz werden Einflüsse beschrieben, welche innerhalb der gewählten Grenzen maximal ein Extremum haben. Die Auswertung der Regressionsrechnung liefert Informationen über die qualitativen Auswirkungen der Variation eines Parameters, z.B. linearer Anstieg bzw. Abfall, quadratischer Verlauf mit Maximum bzw. Minimum einschließlich Lage des Extremums, sowie über die gegenseitige Beeinflussung der variierten Parameter.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist ein Indikator für die Güte der Übereinstimmung des gewählten Ansatzes mit den real ermittelten Messwerten. Ein $R^2 \geq 0,8$ entspricht befriedigender, bei $R^2 \geq 0,9$ guter, bei $R^2 \geq 0,95$ sehr guter Übereinstimmung.

$$Y = a_0 + \underbrace{a_1 \cdot m_V + a_2 \cdot m_V^2}_{\text{Flächenmasse}} + \underbrace{a_3 \cdot m_V \cdot j_N}_{\text{Flachsfasergehalt}} + a_4 \cdot j_N + a_5 \cdot j_N^2 \quad (14)$$

Die Güte des gewählten Ansatzes ist für die Festigkeit in Längs- und Querrichtung sowie die Reißdehnung in Längsrichtung gut. Für die Reißdehnung in Querrichtung ergibt sich für den gewählten Ansatz nur eine befriedigende Übereinstimmung mit den Messwerten (Tabelle 1).

Tabelle 1: Güte der vollständigen Regressionsansätze für den Einfluss der Flächenmasse der Vliesstoffes und des Flachsfasergehaltes

Koeffizienten:	a_0	A_1	a_2	a_3	a_4	a_5	R^2
Messgröße							
$R_{H \text{ längs}}$ [cN/tex]	0,327	8,07E-04	-4,79E-07	-1,63E-06	0,012	-1,72E-04	0,950
$R_{H \text{ quer}}$ [cN/tex]	1,561	0,005	-3,75E-06	1,50E-05	-0,015	-2,38E-04	0,933
$e_{R-H \text{ längs}}$ [%]	169,769	-0,032	2,10E-05	-1,71E-04	-0,641	0,001	0,934
$e_{R-H \text{ quer}}$ [%]	31,079	0,010	-2,54E-06	-2,16E-04	1,308	-0,012	0,810

In der weiteren Analyse wurde zunächst die Wechselwirkung der beiden Faktoren untersucht. Die Regressionsanalyse der reduzierten Gleichung (15) ergab, dass der Einfluss des Koppelgliedes vernachlässigt werden kann (Ausnahme $\epsilon_{R-H \text{ quer}}$, siehe Regressionskoeffizienten Tabelle 2), d.h. es besteht keine Kopplung von Flächenmasse und Flachsfasergehalt in Bezug auf Reißfestigkeit und Reißdehnung.

$$Y = a_0 + a_1 \cdot m_V + a_2 \cdot m_V^2 + a_4 \cdot j_N + a_5 \cdot j_N^2 \quad (15)$$

Tabelle 2: Güte der reduzierten Regressionsansätze für den Einfluss von Flächenmasse und Flachsfasergehalt

Koeffizienten: Messgröße	a_0	a_1	a_2	a_4	a_5	R^2
$R_H \text{ längs [cN/tex]}$	0,327	8,07E-04	-4,79E-07	0,012	-1,72E-04	0,947 (-0,003)
$R_H \text{ quer [cN/tex]}$	1,561	0,005	-3,75E-06	-0,015	-2,38E-04	0,922 (-0,011)
$\epsilon_{R-H \text{ längs [\%]}}$	169,769	-0,032	2,10E-05	-0,641	0,001	0,931 (-0,003)
$\epsilon_{R-H \text{ quer [\%]}}$	38,63942	-0,00086	-2,54E-06	1,15650	-0,01184	0,736 (-0,074)

Da keine Wechselwirkung zwischen Flachsfasergehalt und Flächenmasse besteht, kann der Einfluss dieser beiden Faktoren getrennt formuliert werden:

$$Y = a_0 + a_4 \cdot j_N + a_5 \cdot j_N^2 \quad (15a)$$

$$Y = a_0 + a_1 \cdot m_V + a_2 \cdot m_V^2 \quad (15b)$$

Über den Einfluss der quadratischen Anteile in den Gleichungen für Festigkeit und Reißdehnung kann keine einheitliche Aussage erfolgen. Eine weitere Vereinfachung des Regressionsansatzes ist nur für die Beschreibung der Eigenschaften in Längsrichtung möglich. Der Zusammenhang zwischen dem Flachsfasergehalt und der Reißfestigkeit bzw. der Reißdehnung in Längsrichtung kann mit guter Näherung als linear betrachtet werden.

5.4 Stichdichte und Einstichtiefe

Die Verfestigungsparameter Stichdichte und Einstichtiefe bilden zusammen den Einflussfaktor der Vernadelungsintensität. Die Vernadelungsintensität ist ein Maß für die Verschlingung der Fasern untereinander. Mit zunehmender Stichdichte steigt die Anzahl der Faserpfropfen, damit die Anzahl der Faser-Faser-Berührungen, und die Anzahl der in Dickenrichtung orientierten Fasern. Durch eine erhöhte Einstichtiefe werden die von den Widerhaken erfassten Fasern tiefer im Faserpfropfen verankert.

Mit zunehmender Vernadelungsintensität nimmt die Reißfestigkeit des Vliesstoffes zu (Abb. 23, Anhang Abb. 67 und Abb. 68). Innerhalb der untersuchten Parameter konnte kein negativer Einfluss einer hohen Stichdichte und Einstichtiefe festgestellt werden („Zernadelung“). Eine weitere Erhöhung der Stichdichte war technologisch nicht möglich, da bereits bei 100 E/cm² beträchtlicher Nadelbruch auftrat. Die Einstichtiefe weiter zu erhöhen bringt ebenfalls keine Veränderungen, da bereits bei 15 mm alle Widerhaken vollständig den Vliesstoff durchdrungen hatten.

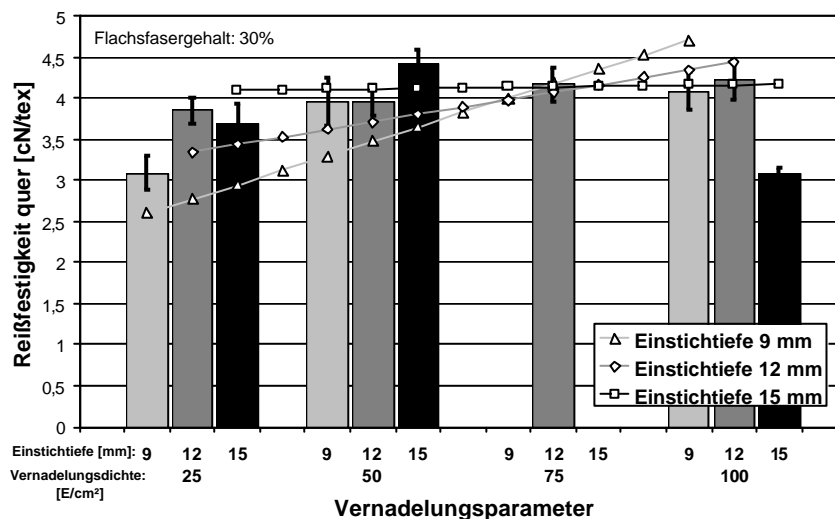


Abb. 23: Einfluss von Flachfasergehalt und Vernadelungsintensität auf die Reißfestigkeit (Flachfasergehalt 30%)

Der für die Durchführung der Regressionsanalyse gewählte Ansatz enthält den bereits ermittelten Term (15a) für den Einfluss des Flachfasergehaltes und die Terme des quadratischen Ansatzes für den Einfluss der Vernadelungsintensität. Es wird untersucht, ob eine Abhängigkeit der Vernadelungsparameter Einstichtiefe und Stichdichte besteht. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass eine Kopplung von Flachfasergehalt und den Ver-

nadelungsparametern nicht vorhanden ist. Die untersuchte Gleichung ergibt sich damit zu

$$Y = a_0 + \underbrace{a_1 \cdot j_N + a_2 \cdot j_N^2}_{\text{Fasergehalt}} + \underbrace{a_3 \cdot e + a_4 \cdot e^2}_{\text{Einstichtiefe}} + \underbrace{a_5 \cdot e \cdot s}_{\text{Stichdichte}} + a_6 \cdot s + a_7 \cdot s^2 \quad (16)$$

Die Übereinstimmung des Ansatzes mit den Ergebnissen der Werkstoffprüfung ist für die Festigkeiten unbefriedigend, für die Reißdehnung gut bis sehr gut (Tabelle 3).

Tabelle 3: Güte der vollständigen Regressionsansätze für den Einfluss der Verfestigungsparameter

Koeffizienten: Messgröße	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	R ²
R _H längs [cN/tex]	-3,59397	0,03538	-0,00038	0,41186	-0,01214	-0,00146	0,025732	-1,19E-5	0,729
R _H quer [cN/tex]	-3,44130	-0,18313	0,00135	1,33422	-0,04049	-0,00452	0,09910	-0,00024	0,738
ε _{R-H} längs [%]	264,0549	-1,76732	0,01172	-6,51427	0,11697	-0,00245	-0,55407	0,001725	0,964
ε _{R-H} quer [%]	-21,3045	1,68259	-0,01664	6,95134	-0,26029	-0,02070	0,18698	-2,90E-4	0,822

Die weitere Regressionsanalyse zeigt, dass die quadratischen Glieder für den Einfluss von Einstichtiefe und Stichdichte vernachlässigt werden können. Aus Gleichung (16) ergibt sich damit:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot j_N + a_2 \cdot j_N^2 + a_3 \cdot e + a_5 \cdot e \cdot s + a_6 \cdot s \quad (17)$$

Die entsprechenden Bestimmtheitsmaße zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4: Güte der reduzierten Regressionsansätze für den Einfluss der Verfestigungsparameter

Koeffizienten: Meßgröße	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₅	a ₆	R ²
R _H längs [cN/tex]	-1,89352	0,03525	-0,00036	0,12044	-0,00146	0,02435	0,698 (-0,031)
R _H quer [cN/tex]	2,58905	-0,17005	0,00127	0,36254	-0,00452	0,06877	0,705 (-0,034)
ε _{R-H} längs [%]	244,77985	-1,87449	0,01267	-3,70702	-0,00245	-0,33435	0,960 (-0,004)
ε _{R-H} quer [%]	15,20640	1,68207	-0,01629	0,70447	-0,02070	0,15301	0,783 (-0,039)

Die geringe Verschlechterung der Güte der Regressionsgleichungen (17) im Vergleich mit den vollständigen Gleichungen (16) bestätigt das Fehlen einer quadratischen Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von Einstichtiefe und Flächenmasse. Eine Vernachlässigung der Kopplung von Stichdichte und Einstichtiefe führt dagegen zu ei-

nem deutlichen Abfall des Bestimmtheitsmaßes und ist daher nicht zulässig.

Mit steigender Einstichtiefe nimmt die festigkeitssteigernde Wirkung der Stichdichte immer mehr ab. Die negativen Koeffizienten a_5 , welche dem Koppelglied von Einstichtiefe und Stichdichte vorangestellt sind, führen dazu, dass die Festigkeit bei 100 E/cm² mit steigender Einstichtiefe abnimmt, während bei 25 E/cm² mit steigender Einstichtiefe die mechanischen Eigenschaften ebenfalls steigen.

5.5 Fasersorten

Die Eigenschaften der eingesetzten Fasersorten wirken sich direkt auf die Eigenschaften der Vliesstoffe aus. Zur Interpretation der Ergebnisse ist es notwendig, mehrere, sich überlagernde Effekte zu betrachten. So ist die Abnahme der Vliesstofffestigkeit mit steigendem Flachsfaseranteil auf Grund der geringeren Faser-Faser-Reibung von Flachs gegenüber den PP-Fasern bereits in der Literatur dokumentiert (z.B. [3]). Weiterhin von Bedeutung sind die Festigkeiten von Flachs- und Polypropylenfasern. Wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, sinkt die Festigkeit der Flachsfasern mit abnehmenden Fasertiter durch die zunehmende mechanische Schädigung während des Faseraufschlusses. Die Festigkeit der eingesetzten PP-Fasern mit Haftvermittler liegt über der ohne Haftvermittler.

Abb. 24 zeigt den unmittelbaren Zusammenhang zwischen Faser- und Vliesstoffeigenschaften. Die Vliesstoffe mit geringerem Flachsfasergehalt, gröberen Fasern bzw. der PP-Variante FV 10 DO besitzen eine höhere Reißfestigkeit. Die Reißdehnungen verhalten sich erwartungsgemäß der Reißfestigkeit entgegengesetzt.

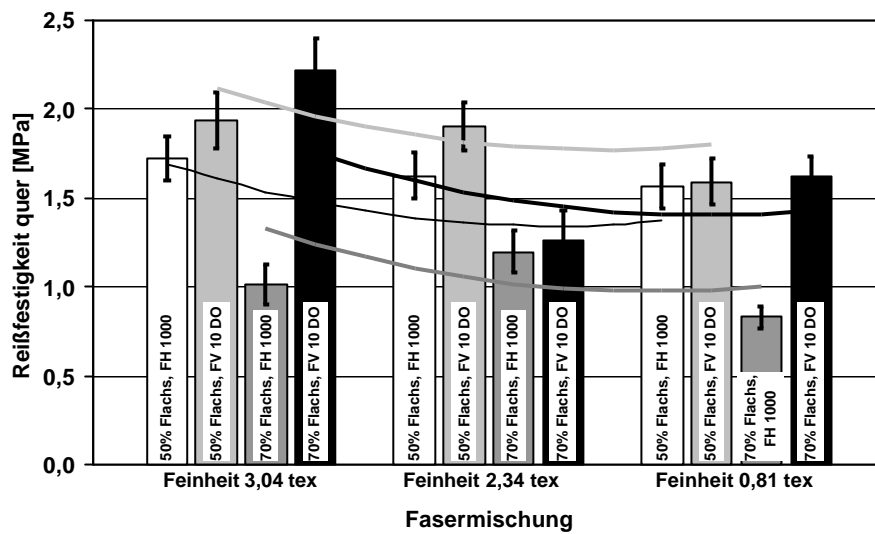


Abb. 24: Einfluss der Faserart auf die Reißfestigkeit (quer)

Zur Bestätigung der Beobachtungen wurde eine statistische Analyse mit folgender Gleichung (18) durchgeführt:

$$Y = a_0 + \underbrace{a_1 \cdot j_N}_{\text{Fasergehalt}} + \underbrace{a_2 \cdot r_{f,N} + a_3 \cdot r_{f,N}^2}_{\text{Naturfaserfeinheit}} + \underbrace{a_4 \cdot h}_{\text{Haftvermittlergehalt}} \quad (18)$$

Da nur zwei Fasergehalte untersucht wurden, ist die lineare Modellierung des Einflusses des Fasergehaltes ausreichend. Für die Faserfeinheit ist ein quadratischer Term angesetzt und die mathematische Modellierung des Einflusses des Haftvermittlers wurde realisiert, in dem für FH 1000 der Haftvermittlergehalt $h = 0$, für FV 10 DO $h = 1$ gesetzt wurde. Mittels Regressionsrechnung wurden folgende Werte für die Faktoren a bestimmt:

Tabelle 5: Güte der vollständigen Regressionsansätze für den Einfluss der Flächenmasse und des Flachsfasergehaltes des Vliesstoffes

Koeffizienten:	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	R^2
Messgröße						
R_H längs [cN/tex]	0,7577	-0,0071	0,0694	-0,0099	0,17446	0,951
R_H quer [cN/tex]	2,45817	-0,01839	-0,29973	0,11533	0,42818	0,664
ϵ_{R-H} längs [%]	143,3673	-0,2285	-2,7063	1,2079	-17,3237	0,582
ϵ_{R-H} quer [%]	68,59	-0,11	13,25	-3,3272	-11,0133	0,826

Die Resultate der Regressionsrechnung unterstreichen die bereits beschriebenen Zusammenhänge. Die PP-Variante FV 10 DO steigert die Reißfestigkeit des Vliesstoffes

in Längsrichtung um 0,17 cN/tex (33 %) und in Querrichtung um 0,42 cN/tex (24 %). Die Festigkeit von FV 10 D0 ist jedoch nur rund 20 % größer als die von FH 1000. Der stärkere Zuwachs der Reißfestigkeit des Vliesstoffes ist somit Resultat des geringeren Fasertiters des FV 10 D0.

5.6 Ergebnis

Die ermittelten Gleichungen zur Beschreibung des Einflusses der Verfestigungsintensität sind denen in [3] nahezu identisch, der Fasergehalt geht dort quadratisch in die Gleichung ein, die Verfestigungsparameter Stichdichte und Einstichtiefe innerhalb der untersuchten Grenzen jeweils linear. Die in [74] vorgestellte Gleichung (8) zur Bestimmung der spezifischen Vlieszugfestigkeit erreicht bei Anwendung auf die vorliegenden Messwerte sowohl in Längs- als auch in Querrichtung nicht die Güte des in den oben beschriebenen Untersuchungen verwendeten Polynomansatzes. Der Grund hierfür liegt im zu starken Einfluss der Abhängigkeit zwischen Stichdichte und Einstichtiefe im exponentiellen Gleichungsansatz von [74]. Der in den hier vorgestellten Untersuchungen verwendete Polynomansatz lässt in dieser Hinsicht eine bessere Anpassung an die realen Verhältnisse zu. Die Koeffizienten sind durch wenige Versuche schnell zu ermitteln. Das bedeutet, dass die Gleichungen in der Praxis gut anwendbar sind zur Auslegung der benötigten Halbzeuge, zur Prozesseinrichtung und Prozessoptimierung.

Die Untersuchungen der nach unterschiedlichen Technologien verfestigten Vliesstoffe zeigen, dass für unterschiedliche Anforderungen auch unterschiedliche Verfestigungsverfahren eingesetzt werden können. Für Spezialanwendungen stellen die Nähwirkvliesstoffe eine Ergänzung zur Palette der Nadelvliesstoffe dar.

Mit steigendem Flachsfasergehalt nimmt die Reißfestigkeit von Flachsfaser-Polypropylen-Vliesstoffen ab, da die Faser-Faser-Reibung bei Naturfasern deutlich geringer im Vergleich zu den eingesetzten PP-Fasern ist. Die Abnahme der Festigkeit erfolgt nahezu linear mit steigendem Flachsfasergehalt.

Die Reißfestigkeit ist bei einer Flächenmasse des Vliesstoffes von 800 g/m² maximal und sinkt gegen höhere und geringere Flächenmassen leicht ab. Der beobachtete Ein-

fluss ist durch die unterschiedlichen Auswirkungen der Verfestigung auf die unterschiedliche Dicke der Vliesstoffe erklärbar.

Die Reißfestigkeit von Flachs-PP-Vliesstoffen steigt mit zunehmender Vernadelungsintensität. Bei Stichdichten über 75 E/cm² beeinflusst der bis zu dieser Stichdichte positive Einfluss der Einstichtiefe die Reißfestigkeit negativ. Die gewählten Vernadelungsbedingungen stellen für die untersuchten Flächenmassen die technologischen Grenzen dar. Eine geringere Vernadelung führt zu einem schwer handhabbaren Flächengebilde, eine stärkere Vernadelung würde zu gehäuften Nadelbrüchen führen.

Während der Herstellung des Vlieses erhalten die Fasern eine Vorzugsorientierung. Abhängig von der weiteren Verarbeitung nach der Vlieslegung ergeben sich im Vliesstoff anisotrope Materialeigenschaften. Bei der Verarbeitung von Vliesstoffen zu Bauteilen wird sich dies in anisotropem Umformverhalten sowie richtungsabhängigen mechanischen Kennwerten niederschlagen.

Die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Vliesstoffe sind stark von den Eigenschaften der eingesetzten Fasern abhängig. Mechanisch höher aufgeschlossene Flachfasern besitzen geringere Festigkeiten. Feinheit und Festigkeit der PP-Fasern besitzen wesentlichen Einfluss auf die Vliesstoffeigenschaften.

6 Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften des ebenen Bauteils

6.1 Vorbemerkungen

In Biege- und Zugversuchen wurden die Festigkeit sowie die Steifigkeit der ebenen Versuchsbauteile bestimmt. Bei der Herstellung der Versuchsbauteile wurden die Vliesstoffe mit einheitlicher Ausrichtung verpresst. Dies hat zur Folge, dass sich die im Vliesstoff vorhandene Anisotropie auch im Bauteil widerspiegelt. Da das Verhältnis der Kennwerte der beiden Hauptrichtungen nahezu gleichbleibend ist, werden in den folgenden Ausführungen nur die Kennwerte der Proben behandelt, welche in Querrichtung des Vliesstoffes entnommen wurden.

Weiterhin werden in der Regel nur die Ergebnisse der Biegeprüfung als Diagramm dargestellt. Falls nicht explizit angegeben, gelten die aufgezeigten und diskutierten Zusammenhänge in gleicher Weise für die Zugprüfungen.

6.2 Prozessparameter

6.2.1 Allgemeines

Bei Faserverbundstrukturen entsteht der eigentliche Werkstoff erst bei der Bauteilherstellung. Damit werden die mechanischen Bauteileigenschaften durch die Verarbeitungsparameter wesentlich beeinflusst.

Bei der Herstellung von Bauteilen aus thermoplastischen Faserverbunden sind zwei grundlegend verschiedene Verfahren zu unterscheiden: einstufige und mehrstufige Verfahren. Einstufige oder isotherme Verfahren werden auf einer einzelnen Presse realisiert. Nach dem Aufheizen der Form wird das umzuformende Halbzeug eingelegt, und

nach Ablauf der Durchwärmzeit wird die Form und damit das Bauteil abgekühlt. Das einstufige Verfahren ist gut geeignet zur Herstellung von Kleinstserien und Labormustern mit minimalem apparativem Aufwand. Der zeitliche Aufwand zur Fertigstellung des Bauteils (Taktzeit) setzt sich zusammen aus der Aufheizzeit der Pressform t_{heiz} , der Durchwärm- oder Haltezeit t_{Halt} und der Zeit $t_{\text{kühl}}$ zur Abkühlung des Bauteils bis zur Entnahme. Übliche Taktzeiten liegen bei etwa 40 bis 50 min, 10 bis 20 min. Aufheizen der Form, 10 min. Haltezeit und 30 min. Abkühlen bis zur Entnahme. Abb. 25 zeigt einen typischen Prozessverlauf, der sich ab dem Einlegen der Vlieszuschnitte in das aufgeheizte Werkzeug ergibt. Der dargestellte Verlauf stellt sich ein für einen Vliesstoff mit einer Flächenmasse von $2 \times 800 \text{ g/m}^2$ und einer Gesamtdicke von 3 mm. Es zeigt sich eine zeitverzögerte Erwärmung der Vliesstoffmitte. Die Temperaturen an dieser Stelle eilen durch die Isolationswirkung des Vliesstoffes sowohl bei der Erwärmung wie auch bei der Abkühlung der Werkzeugtemperatur um ca. 2 min. nach.

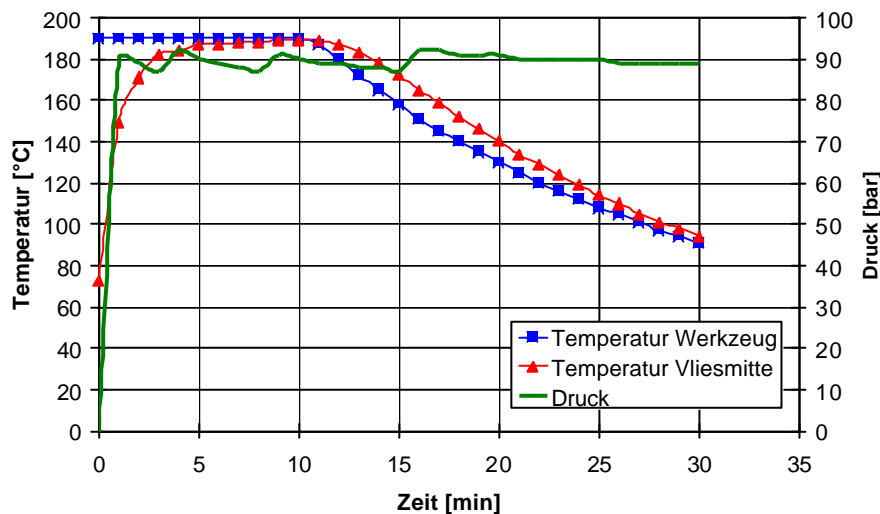


Abb. 25: Temperatur - und Druckverlauf beim einstufigen Preßverfahren

Bei zweistufigen Prozessen wird im ersten Schritt das Halbzeug über die Schmelztemperatur des Thermoplasten erwärmt. Die Taktzeit wird hauptsächlich von der Dauer der vollständigen Durchwärmung des gesamten Halbzeuges bestimmt. Die Erwärmungszeit von 120 sec. für einen Zuschnitt Flachs-PP-Vliesstoff mit einer Flächenmasse von $2 \times 800 \text{ g/m}^2$ und 3 mm Dicke entspricht den Untersuchungen des Einstufenverfahrens (Abb. 26). Danach erfolgt der Transfer in das gekühlte Formwerkzeug, in dem der Zuschnitt umgeformt wird und schnell erkaltet. Durch die Trennung von Aufheiz- und Form-

gebungsprozess können Taktzeiten von wenigen Minuten erreicht werden, wodurch größere Stückzahlen rationell gefertigt werden können.

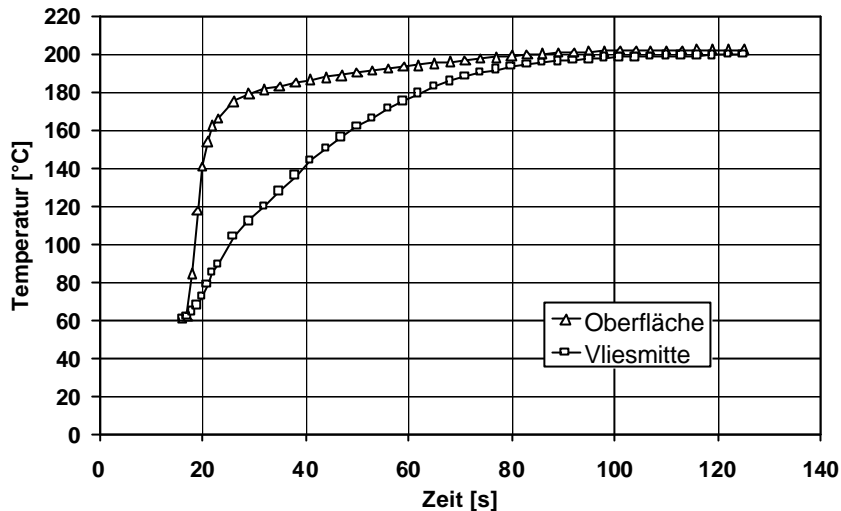


Abb. 26: Temperaturverlauf beim Aufheizen im Zweistufenverfahren

Die parallele Untersuchung der beiden Verfahren ermöglicht einen Abgleich der Versuchsergebnisse. Dies ist notwendig, da die grundlegend verschiedenen Heiz- und Abkühlvorgänge sehr großen Einfluss z.B. auf den Kristallisationsgrad des PP haben und damit eine direkte Vergleichbarkeit der resultierenden Verbundeigenschaften nicht gegeben ist.

6.2.2 Versuchsplan und Versuchsdurchführung

Abgeleitet aus den Ergebnissen der Thermoanalyse (Kapitel 4) sowie in Übereinstimmung mit Voruntersuchungen [47] wird der Versuchsplan innerhalb folgender Schranken festgelegt (vollständiger Versuchsplan siehe Anhang):

$$\begin{aligned}
 T_{P \min}: 180 \text{ °C}, & \quad T_{P \max}: 230 \text{ °C} \\
 p_{P \min}: 0,2 \text{ MPa}, & \quad p_{P \max}: 10,0 \text{ MPa} \\
 t_{P \min}: 1 \text{ min}, & \quad t_{P \max}: 40 \text{ min}
 \end{aligned}$$

Wenn nicht ausdrücklich abweichend angegeben wurde als Versuchsmaterial Vliesstoff mit 50 % Flachsfasergehalt und PP FH 1000 eingesetzt, verfestigt mit 12 mm Einstichtiefe, einer Stichdichte von 50 E/cm² und einer Flächenmasse von 800 g/m². Es wurden 5 Lagen dieses Vliesstoffes miteinander verpresst, um eine Platte mit einer Dicke von

etwa 4 mm zu erhalten, welche den Anforderungen der Prüfnormen entspricht.

Die Eigenschaften der ebenen Bauteile werden in Zug- und Biegeversuchen bestimmt. Die Auswertung und Analyse der Messergebnisse erfolgt mittels Regressionsrechnung.

6.2.3 Verfahren 1 - Isothermes Pressen

6.2.3.1 Einfluss von Druck und Temperatur

Die Messwerte zeigen, dass bei einem isothermen Herstellungsverfahren durch die langen Verweilzeiten hohe Verarbeitungstemperaturen zu schlechteren mechanischen Eigenschaften führen (Abb. 27). Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der thermischen Analyse der Einzelkomponenten Flachs und Polypropylen (Kapitel 4.1.3 und 4.2.4).

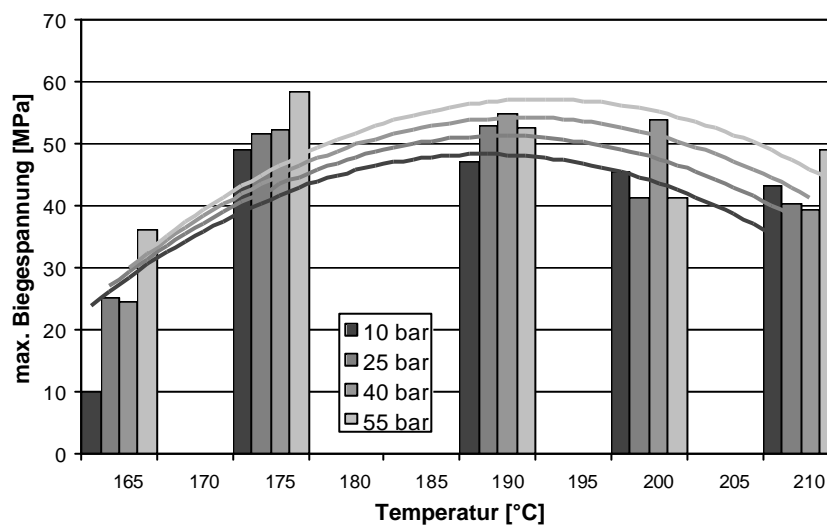


Abb. 27: Einfluss von Pressdruck und Temperatur auf die Biegefestigkeit

Aus den Vorbetrachtungen zu den Prozessgrenzen kann sowohl für die Variation der Verarbeitungstemperatur als auch des Pressdruckes erwartet werden, dass die mechanischen Eigenschaften zwischen den gewählten Grenzen ein Maximum besitzen. Der Ansatz für die statistische Auswertung gemäß Gleichung (19) beinhaltet daher jeweils einen quadratischen Ansatz für die Einflüsse Pressdruck und Temperatur sowie einen gemischten Term zur Beschreibung einer möglichen Abhängigkeit der beiden Parameter:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot p_p + a_2 \cdot p_p^2 + a_3 \cdot p_p \cdot T_p + a_4 \cdot T_p + a_5 \cdot T_p^2 \quad (19)$$

Aus der Regressionsrechnung ergeben sich die Koeffizienten wie in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Regressionskoeffizienten Biegeprüfung Gleichung (19)

Koeffizienten:	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	R ²
S _{b max.} [MPa]	-1313,011	1,826976	-0,001282	-0,008224	13,960584	-0,035837	0,686
E _b [MPa]	-84122,43	129,17040	0,0437822	-0,649319	878,90920	-2,219836	0,798

Die Übereinstimmung der Modellgleichung mit den Messwerten ist ausreichend für eine qualitative Bewertung der verschiedenen Einflussfaktoren. So zeigt die Regressionsanalyse, dass der Einfluss des Pressdruckes linear beschrieben werden kann und keine Kopplung von Pressdruck und Temperatur besteht. Die resultierende Gleichung (20) lautet:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot p_p + a_4 \cdot T_p + a_5 \cdot T_p^2 \quad (20)$$

Die Betrachtung der Koeffizienten (Tabelle 7) bestätigt die getroffenen Aussagen. Mit zunehmender Presstemperatur kommt es durch die abnehmende Viskosität der thermoplastischen Matrix zu einer besseren Faserbenetzung und damit zu besseren Verbundeigenschaften. Nach dem Überschreiten der optimalen Presstemperatur wird dieser positive Effekt durch die einsetzende thermische Zerstörung der Fasern überlagert, die Verbundkennwerte nehmen ab.

Tabelle 7: Regressionskoeffizienten Biegeprüfung der reduzierten Gleichung (20)

Koeffizienten:	a ₀	a ₁	a ₄	a ₅	R ²
S _{b max.} [MPa]	-1261,76681	0,19748	13,69329704	-0,03583723	0,646 (-0,040)
E _b [MPa]	-80189,0187	9,944266667	857,8063307	-2,21983578	0,742 (0,056)

Weiter zeigen die Positiven Koeffizienten a₁, dass mit steigendem Pressdruck innerhalb der untersuchten Prozessgrenzen eine Steigerung der mechanischen Eigenschaften verbunden ist, da ein steigender Pressdruck zu einer verbesserten Benetzung der Fasern führt.

6.2.3.2 Einfluss der Haltezeit

Durch die sinkende Viskosität der Thermoplastschmelze wird die Benetzung der Flachfasern verbessert, die Festigkeit des Bauteils steigt. Nach dem Überschreiten eines Maximums tritt bei langen Haltezeiten eine zunehmende thermische Schädigung der Verstärkungsfasern auf, die Verbundfestigkeit fällt wieder ab (Abb. 28).

Im Pressverfahren muss ein Kompromiss getroffen werden zwischen einer Schädigung des Werkstoffes durch zu lange Temperaturexposition und einem unzureichenden Aufschmelzen des Polypropylen auf Grund zu kurzer Wärmezeit. Abb. 28 macht diesen Zusammenhang deutlich und für das Versuchsmaterial wird eine optimale Verweilzeit vor Beginn der Kühlung von 12 min. bestimmt.

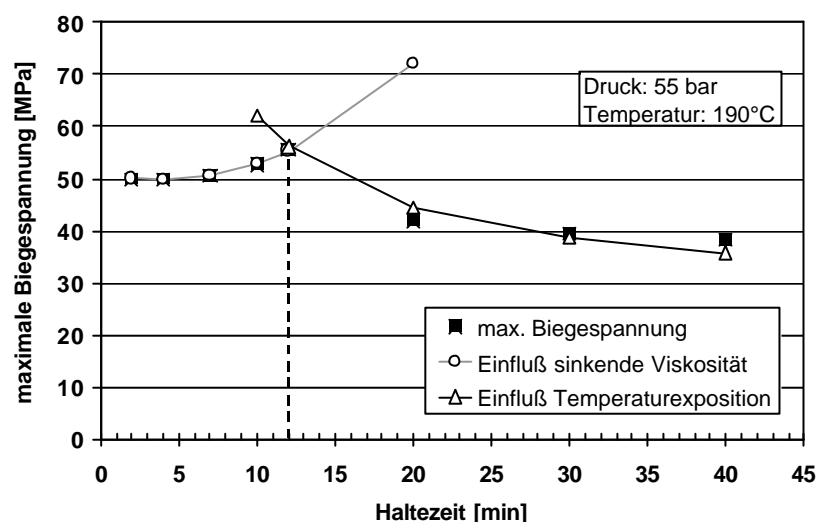


Abb. 28: Einfluss der Haltezeit auf die Bauteilfestigkeit

6.2.4 Verfahren 2 - Nicht isothermes Pressen

6.2.4.1 Druck und Temperatur

Der Einfluss des Pressdruckes auf die Biegeeigenschaften der untersuchten plattenförmigen Bauteile (Abb. 29) zeigt deutliche Unterschiede zu den Ergebnisse des isothermen Verfahrens. Die nicht isotherm hergestellten Platten weisen für niedrigere Temperaturen einen negativen Einfluss des Pressdruckes auf.

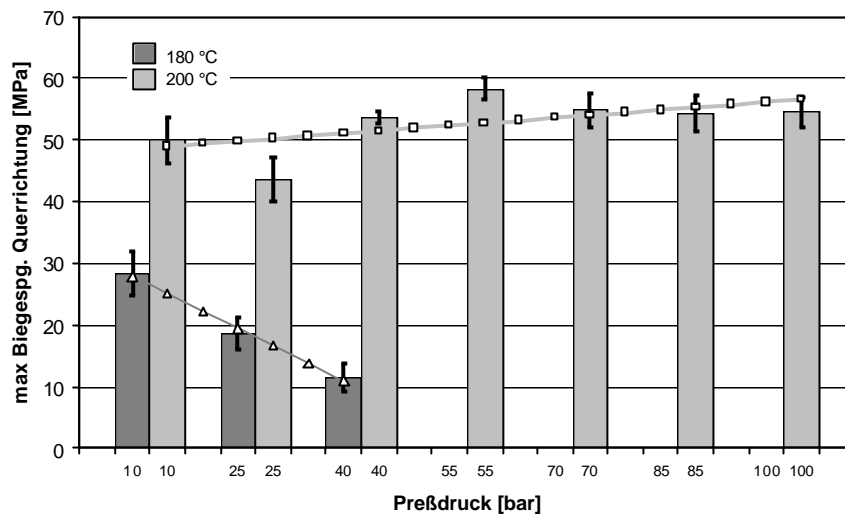


Abb. 29: Einfluss des Pressdruckes bei nicht isothermem Pressen

Bei geringen Temperaturen erfolgt das Aufschmelzen der thermoplastischen Fasern nur langsam bzw. erst nach Aufbringen des vollständigen Pressdruckes. Dadurch wird erst allmählich eine isostatische Druckverteilung in der Pressform aufgebaut. Durch die entstehenden Kraftspitzen an den Faserberührungspunkten werden die Naturfasern mechanisch geschädigt, die Verbundkennwerte fallen mit zunehmendem Druck.

Zur Regressionsanalyse wird folgender Gleichungsansatz (21) verwendet:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot T_p + a_2 \cdot T_p^2 + a_3 \cdot T_p \cdot p_p + a_4 \cdot p_p + a_5 \cdot p_p^2 \quad (21)$$

Die Koeffizienten ergeben sich wie folgt (Tabelle 8):

Tabelle 8: Regressionskoeffizienten Biegeeigenschaften Gleichung (21)

Koeffizienten:	a0	a1	a2	a3	a4	a5	R ²
$s_{b \max.}$ [MPa]	-1394,37	14,55	-0,04	0,04	-7,33	-0,0018	0,973
E_b [MPa]	-165765,72	1635,91	-3,96	1,46	-263,89	-0,21	0,994

Der positive Koeffizient a_3 des Mischgliedes aus Druck und Temperatur überwiegt bei höheren Temperaturen den negativen Term a_4 des Pressdruckes. Diese Zusammenhänge gelten explizit nur in den untersuchten Prozessgrenzen und können nicht ohne weitergehende Überlegungen auf z.B. höhere Presstemperaturen extrapoliert werden.

Die weitere Analyse zeigt, dass der quadratische Anteil des Einflusses des Pressdruckes vernachlässigt werden kann. Die resultierende Gleichung (22) lautet

$$Y = a_0 + a_1 \cdot T_p + a_2 \cdot T_p^2 + a_3 \cdot T_p \cdot p_p + a_4 \cdot p_p \quad (22)$$

mit folgenden Koeffizienten (Tabelle 9):

Tabelle 9: Regressionskoeffizienten Biegeeigenschaften Gleichung (22)

Koeffizienten:	a0	a1	a2	a3	a4	R ²
S _{b max.} [MPa]	-1433,7274	14,8347663	-0,03712884	0,03250554	-6,4161974	0,967 (-0,006)
E _b [MPa]	-170267,14	1668,67592	-3,99565469	0,82490381	-159,474052	0,987 (-0,007)

6.2.4.2 Einfluss der Haltezeit

Die Heizzeit hat, wie schon die Untersuchung des isothermen Pressprozesses zeigen konnte, einen positiven Einfluss auf die mechanischen Verbundeigenschaften durch bessere Benetzung der Verstärkungsfasern infolge geringerer Matrixviskosität. Im Gegensatz zum isothermen Prozess sind die Expositionszeiten des Werkstoffes bei hohen Temperaturen wesentlich kürzer, da die lange Abkühlphase völlig fehlt. Es kommt daher nach einer anfänglichen Verbesserung der mechanischen Eigenschaften ab einer Vorwärmzeit von 5 min. bis zu 15 min. zu keiner weiteren Änderung mehr (Abb. 30).

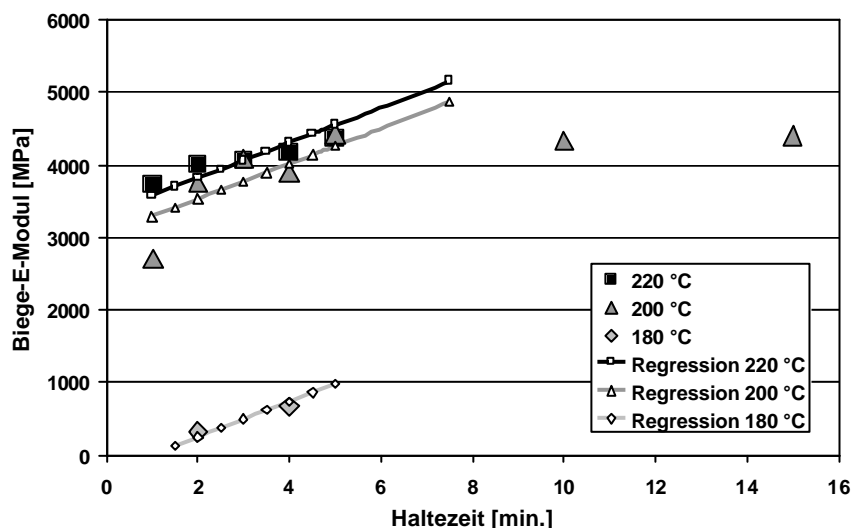


Abb. 30: Einfluß der Heizzeit bei nicht isothermem Pressen

Diese Beobachtung korreliert mit den isothermen Untersuchungen an Flachsfasern (Kapitel 4.1.3), bei welchen unterhalb von 15 min. kein Abfall der Faserfestigkeit registriert wurde.

Die Regressionsanalyse wurde für Vorwärmzeiten von 1 bis 5 Minuten durchgeführt, da längere Heizzeiten keine Veränderung der mechanischen Eigenschaften bewirkten. Es ergab sich eine hervorragende Übereinstimmung mit dem gewählten Ansatz:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot T_p + a_2 \cdot T_p^2 + a_3 \cdot T_p \cdot t_H + a_4 \cdot t_H + a_5 \cdot t_H^2 \quad (23)$$

Die Regressionskoeffizienten ergeben sich wie in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Regressionskoeffizienten Biegeprüfung Gleichung (23)

Koeffizienten:	a0	a1	a2	a3	a4	a5	R ²
S_{b max.} [MPa]	-1111,63816	10,25280 5	-0,022709	-0,140419	37,05489	-0,845032	95,68%
E_b [MPa]	-170934,3	1629,494	-3,810982	-4,8205	1595,054 3	-58,78571	97,86%

Die Vereinfachung von Gleichung (23) zeigt, dass das Mischglied aus Zeit- und Temperatureinfluss, sowie der quadratische Term des Zeiteinflusses eliminiert werden kann. Es ergibt sich folgende Gleichung (24):

$$Y = a_0 + a_1 \cdot T_p + a_2 \cdot T_p^2 + a_4 \cdot t_H \quad (24)$$

Die Regressionskoeffizienten (Tabelle 11) zeigen, dass in den untersuchten Prozessgrenzen mit steigender Prozesstemperatur die mechanischen Eigenschaften verbessert werden. Der negative Koeffizient a_2 deutet für Prozesstemperaturen oberhalb der untersuchten 220 °C sinkende Werkstoffeigenschaften an. Diese Vorhersage wird untermauert durch die thermoanalytischen Untersuchungen der Einzelkomponenten Flachs und Polypropylen.

Tabelle 11: Regressionskoeffizienten Biegeprüfung Gleichung (24)

Koeffizienten:	a0	a1	a2	a4	R ²
S_{b max.} [MPa]	-971,931038	9,38790556	-0,02165292	2,87965079	89,83% (-5,85%)
E_b [MPa]	-164292,1	1584,17	-3,7375	243,18182	97,02% (-0,84%)

6.2.5 Ergebnis - Verfahrensvergleich

Die gewählten quadratischen Regressionsansätze sind zur Beschreibung der Einflüsse von Druck, Temperatur und Haltezeit auf die mechanischen Eigenschaften von flachsfaserverstärkten Polypropylenwerkstoffen geeignet. Die Übereinstimmung zwischen den Regressionsgleichungen und den Prüfergebnissen kann als befriedigend (isothermes Verfahren) bis sehr gut (nicht isothermes Verfahren) bewertet werden.

Die in den thermoanalytischen Untersuchungen der Einzelkomponenten Flachs und Polypropylen bestimmten Prozessgrenzen konnten in den praktischen Versuchen bestätigt werden. Die möglichen Verarbeitungstemperaturen hängen stark vom Herstellungsverfahren ab. Bei längerer Expositionszeit, z.B. in einem isothermen Pressverfahren, muss die maximale Verarbeitungstemperatur entsprechend gesenkt werden.

Ein hoher Pressdruck wirkt sich in beiden Verfahren im Rahmen der untersuchten Grenzen günstig auf die mechanischen Eigenschaften aus. Lediglich bei der nicht-isothermen Verarbeitung ist bei geringen Temperaturen ein negativer Einfluss durch die Schädigung der Fasern auf Grund der nicht isostatischen Druckverhältnisse zu erkennen. Für die praktische Durchführung der Bauteilherstellung im Pressverfahren ist es daher günstig, zu Beginn einen niedrigen Pressdruck zu wählen und diesen bei fortschreitender Aufschmelzung des Polypropylen bis auf den eigentlichen Verarbeitungsdruck zu erhöhen. Somit werden Kraftspitzen in den Faserberührungspunkten vermieden und es kommt zu einem homogenen Druckaufbau im Werkzeug.

Die Zeit zur Erwärmung der Halbzeuge hat bei beiden beschriebenen Verfahren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Mit zunehmender Haltezeit ist eine Steigerung der mechanischen Eigenschaften zu beobachten. Bei isothermer Verarbeitung setzt nach Überschreiten eines Maximums eine Verschlechterung der Eigenschaften ein, da analog den thermoanalytischen Untersuchungen eine Schädigung der Fasern erst bei höheren Temperaturen bzw. längeren Haltezeiten einsetzt. Im nicht isothermen Prozess setzt der Abbau der Bauteileigenschaften auch bei Verarbeitungszeiten von 15 min. noch kein messbarer Rückgang der Eigenschaften ein. Ziel jeder Verfahrensentwicklung oder -optimierung muss es daher sein, Haltezeit und Heiztemperatur so aufeinander abzustimmen, dass es zu einer hinreichenden Durchwärmung der Vliesstoff-

fe kommt um maximale mechanische Eigenschaften zu erhalten. Gleichzeitig muss die Haltezeit möglichst kurz bleiben, um Taktzeit und Faserschädigung zu minimieren.

6.3 Einfluss der Halbzeugherstellung

6.3.1 Allgemeines

Wie die Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften der unverfestigten Vliesstoffe gezeigt haben, haben die Prozessparameter der Flachs-Polypropylen-Vliesstoffe sehr starke Auswirkungen auf die Struktur des Halbzeuges. Bei der Bauteilherstellung blieben die Faserorientierungen größtenteils erhalten, da in der Regel keine bzw. nur minimale Fliessvorgänge im Formwerkzeug stattfinden. Im Folgenden werden die Struktur-Eigenschafts-Beziehungen anhand der mechanischen Eigenschaften plattenförmiger Bauteile charakterisiert und bewertet.

6.3.2 Flachsfasergehalt und Flächenmasse

Die Theorie der Faserverbundwerkstoffe sagt mit zunehmendem Fasergehalt eine steigende Festigkeit und Steifigkeit des Verbundes voraus [48]. In Übereinstimmung mit dieser Aussage steigt bei den untersuchten Flachs-PP-Verbunden der E-Modul von einem Flachsfasergehalt von 30 % bis zu 70 % an (Abb. 31). Das in der Vliesstoffprüfung ermittelte Maximum der Bauteilsteifigkeit bei einer Flächenmasse von 800 g/m² findet sich im Bauteil in gleicher Weise. Die prinzipielle Orientierung der Fasern im Vliesstoff bleibt erhalten.

Der Verlauf der Festigkeit über dem Fasergehalt weicht jedoch von dem erwarteten linearen Anstieg ab. Die Bauteile mit 50 % Fasergehalt weisen die geringste Festigkeit auf (Abb. 32).

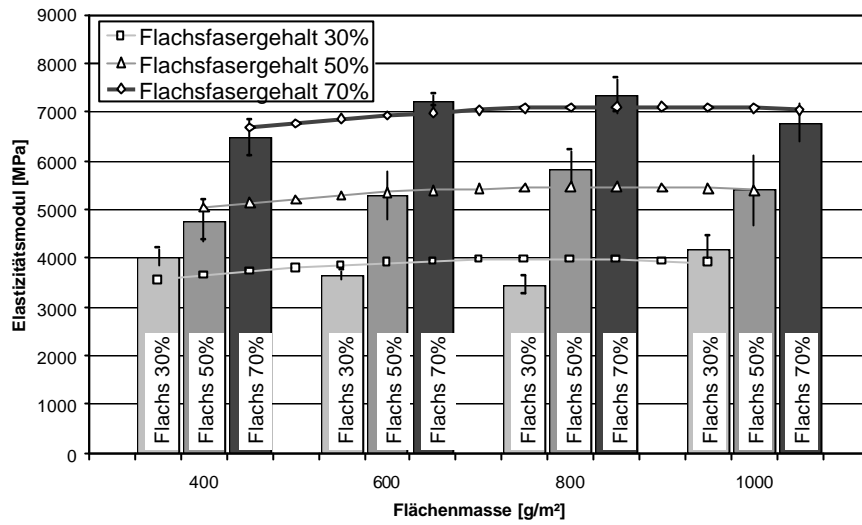


Abb. 31: Bauteilsteifigkeit als Funktion von Flächenmasse und Flachsfasergehalt

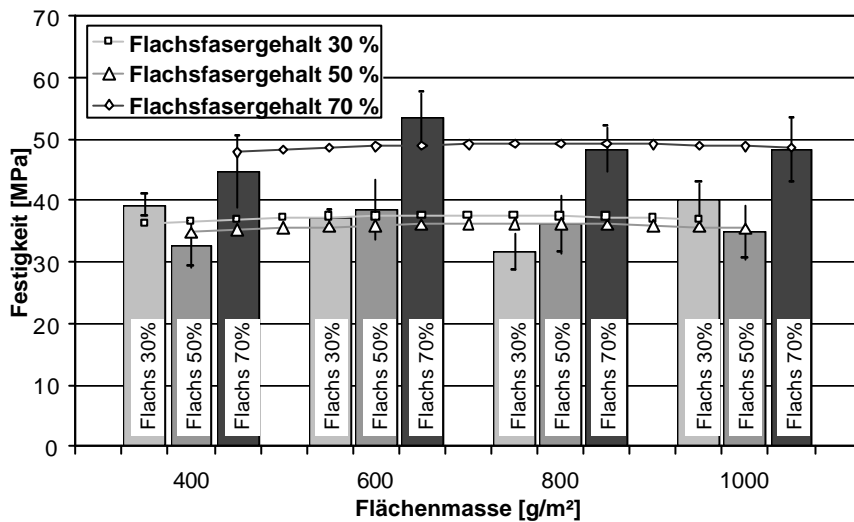


Abb. 32: Bauteilfestigkeit als Funktion von Flächenmassen und Flachsfasergehalt

Zur näheren Betrachtung dieses Verhaltens wird eine Regressionsanalyse mit Gleichung (14) durchgeführt.

Die Regressionsanalyse bestätigt den unerwarteten Verlauf der Festigkeit über dem Fasergehalt. Aus der partiellen Ableitung nach dem Flachsfasergehalt ergibt sich ein Minimum für die Festigkeit bei $\varphi_N = 44\%$ (Biegeversuch) bzw. 42% (Zugversuch). Die aus der Regressionsanalyse resultierenden Koeffizienten zeigt Tabelle 12.

Es zeigt sich, dass der lineare Term zur Beschreibung des Einflusses des Fasergehalts einen negativen Koeffizienten a_4 besitzt. Dieser negative Einfluss wird erst bei höheren Fasergehalten kompensiert. Dies wird mathematisch bestätigt durch den positiven quadratischen Term für den Einfluss des Fasergehaltes.

Tabelle 12: Güte der vollständigen Regressionsansätze für den Einfluss der Flächenmasse und des Flachsfasergehaltes des Vliesstoffes

Koeffizienten: Messgröße	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	R^2
E_b [MPa]	-303,5542	5,1237154	-0,003799	0,0115809	74,929263	0,0097594	0,964
$S_{f \max}$ [MPa]	70,66783	0,0836942	-0,000058	0,000022	-1,81815	0,020225	0,926
E [MPa]	770,7573	3,416496	-0,002393	0,0107414	52,001413	0,1874406	0,952
S_m [MPa]	64,176313	0,0114263	-0,000011	0,0001079	-1,587263	0,0180281	0,814

Eine mögliche Erklärung ist die Betrachtung zweier gegenläufiger Effekte. Die Naturfasern haften ohne die Zugabe von Haftvermittlern wie MAH sehr schlecht an der sie umgebenden PP-Matrix, d.h. eine stoffschlüssige Kraftübertragung kann nur sehr begrenzt stattfinden. Dadurch können die Naturfasern Ihr Verstärkungspotential nicht nutzen, sondern wirken im Gegenteil eher als Störstellen im Verbund, die Festigkeit sinkt mit zunehmendem Faser- und damit Störstellengehalt im Bereich von 30 % bis 50 % Flachsfasergehalt. Dem entgegen wirkt der Effekt, dass es bei hohen Verstärkungsfasergehalten durch die Vliesherstellung zu einer starken Verschlingung der Flachsfasern untereinander kommt und dadurch eine formschlüssige Kraftübertragung ermöglicht wird. Je höher der Fasergehalt desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für diese Art der Kraftübertragung im Verbund, die Festigkeit steigt mit zunehmendem Fasergehalt. Durch die Überlagerung der beiden Effekte kann es zu dem beobachteten Verlauf der Verbundfestigkeit in Abhängigkeit des Fasergehaltes kommen.

Die weitere Regressionsanalyse zeigt, dass keine Kopplung zwischen der Flächenmasse und dem Flachsfasergehalt besteht. Das bedeutet, dass der Term für die Kopplung der Einflüsse von Flächenmasse und Flachsfasergehalt aus der Gleichung eliminiert werden kann. Damit ergibt sich die reduzierte Regressionsgleichung analog Gleichung (15) der Untersuchungen der Vliesstoffeigenschaften. Die entsprechenden Koeff-

fizienten sind in Tabelle 13 dargestellt:

Tabelle 13: Güte der reduzierten Regressionsansätze für den Einfluss der Flächenmasse und des Flachsfasergehaltes des Vliesstoffes

Koeffizienten: Messgröße	a_0	a_1	a_2	a_4	a_5	R^2
E_b [MPa]	-708,88485	5,7027592	-0,0037993	83,035875	0,0097594	0,964 (-0,000)
$S_{f \max}$ [MPa]	69,897833	0,0847942	-0,0000582	-1,80275	0,020225	0,926 (-0,000)
E [MPa]	394,80919	3,953565	-0,0023927	59,520375	0,1874406	0,951 (-0,001)
S_m [MPa]	60,4006875	0,01682	-0,0000113	-1,51175	0,0180281	0,811 (-0,003)

Die Gültigkeit der Untersuchungsergebnisse beschränkt sich auf den betrachteten Bereich von 30 bis 70% Flachsfaseranteil. Bei zu geringem Matrixanteil ist eine Benetzung der Fasern nicht mehr möglich und es kann keine Krafteinleitung in die Fasern erfolgen. Bei zu geringem Faseranteil nähern sich die Verbundkennwerte immer mehr den Eigenschaften des Matrixwerkstoffes an, wobei die Fasern eher als Störstellen wirken und die Verbundfestigkeit auf Werte unterhalb der Matrixfestigkeit verringern kann.

In diesem speziellen Fall der Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften der Bauteils vom Fasergehalt kann das Ergebnis nicht verallgemeinert werden, sondern bezieht sich auf die untersuchten Halbzeuge. An aus Hanf-Polypropylen-Mischvliesstoffen hergestellten Probepplatten wurde ein linearer Anstieg von Festigkeit und Steifigkeit mit steigendem Fasergehalt nachgewiesen. Auch für diese Proben ergaben jedoch die beschriebenen Gleichungen eine sehr gute Übereinstimmung zu den Prüfwerten.

6.3.3 Vernadelungsparameter

Der ausgeprägte Einfluss der Vernadelungsparameter auf die Eigenschaften des unverfestigten Vliesstoffes (Kapitel 5.2), lässt sich im Bauteil nicht mehr nachweisen (Abb. 33 und Abb. 34). Durch die starke Verdichtung im Pressprozess spielt die Orientierung der in den Pfropfen verankerten Fasern in Dickenrichtung eine deutlich geringere Rolle im Vergleich zum unverpressten Vliesstoff.

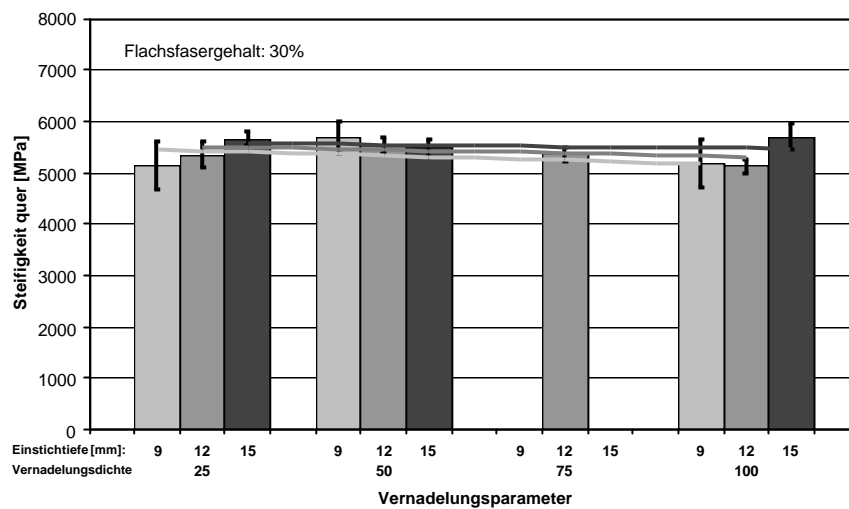


Abb. 33: Bauteilsteifigkeit als Funktion der Vernadelungsintensität

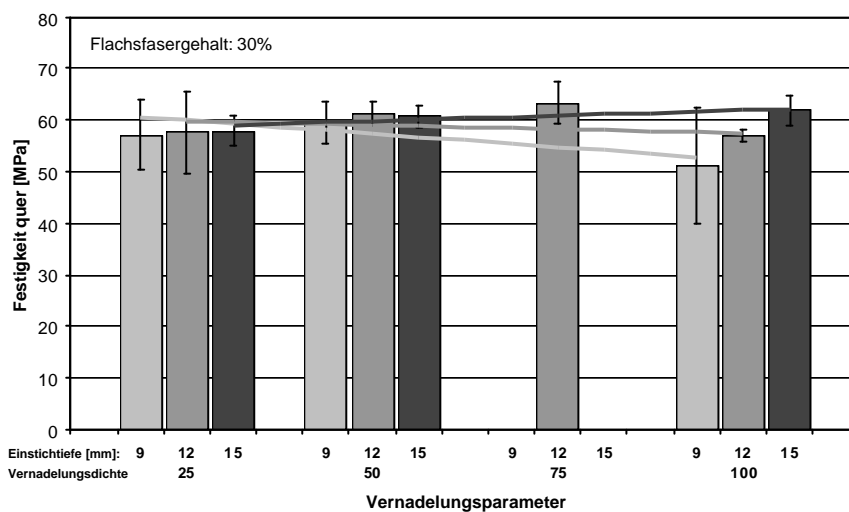


Abb. 34: Bauteilfestigkeit als Funktion der Vernadelungsintensität

Lediglich im Bereich starker Verfestigung (hohe Stichdichte und große Einstichtiefe) ist ein nennenswerter Einfluss erkennbar. Die Regressionsanalyse wurde analog Kapitel 5.4 mit Gleichung (16) durchgeführt. Die resultierenden Koeffizienten sind in Tabelle 14 dargestellt. Die weitere Analyse ergab, dass die quadratischen Terme für Stichdichte und Einstichtiefe innerhalb der untersuchten Grenzen vernachlässigt werden können. die daraus resultierende reduzierte Gleichung entspricht Gleichung (17), welche bei der Vliesstoffprüfung ermittelt wurde.

Tabelle 14: Güte der vollständigen Regressionsansätze für den Einfluss der Flächenmasse und des Flachfasergehaltes des Vliesstoffes

Koeffizienten: Meßgröße	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	R^2
E_b [MPa]	4976,824	-73,6279	1,463337	-24,3132	1,575182	0,852165	8,251808	-0,14799	0,943
$S_{f\max}$ [MPa]	335,9033	-4,75726	0,045965	-19,1402	0,539246	0,08753	-1,02595	-0,00101	0,841
E [MPa]	13081,17	-258,723	3,113114	-626,137	26,48794	0,403095	32,64846	-0,31000	0,928
S_m [MPa]	173,4227	-5,13707	0,049855	-2,07981	0,050123	0,024477	0,230850	-0,00432	0,971

Die zugehörigen Koeffizienten zeigt Tabelle 15. Die Koeffizienten a_6 (Tabelle 15) sind für alle Messgrößen negativ. Das bedeutet, dass mit zunehmender Stichtichte s alle untersuchten mechanischen Eigenschaften sinken. Gleiches gilt für den Einfluss der Stichtiefe auf die Festigkeit des Verbundes. Abb. 33 verdeutlicht, dass auch die Verbundsteifigkeit durch eine hohe Vernadelungsintensität nur unwesentlich verbessert werden kann.

Tabelle 15: Güte der reduzierten Regressionsansätze für den Einfluss der Verfestigungsparameter

Koeffizienten: Messgröße	a_0	a_1	a_2	a_3	a_5	a_6	R^2
E_b [MPa]	5025,1505 9	-63,538925	1,3570322	13,491140 4	0,8521649	-10,741587	0,936 (-0,007)
$S_{f\max}$ [MPa]	263,15064 1	-4,6479911	0,0441190	-6,1983333	0,0875333	-1,1614994	0,808 (-0,033)
E [MPa]	9976,1023 8	-235,80613	2,8411759	9,5734211	0,4030947	-7,4171827	0,853 (-0,075)
S_m [MPa]	174,26869 6	-4,8419408	0,0467396	-0,8768421	0,0244772	-0,3242101	0,904 (-0,067)

Eine hohe Vernadelungsintensität für das Vliesstoffhalbzeug hat somit generell eine negative Wirkung auf die Eigenschaften eines daraus hergestellten Naturfaserverbundbauteils. Wie bereits beschrieben, werden bei der Vernadlung Fasern aus der Vliesstoffebene in die Dickenrichtung umorientiert. Durch eine Erhöhung der Stichtichte wird die Anzahl der entstehenden Faserpfropfen vergrößert, mit steigender Einstichtiefe wird die Anzahl der Fasern pro Pfropfen erhöht bzw. die Länge des im Pfropfen eingebundenen Faserabschnittes steigt. In beiden Fällen wird der Anteil der in Dickenrichtung orientierten Fasern bzw. Faserabschnitte größer. Diese Fasern bzw. Faserabschnitte nehmen keine Kräfte mehr auf, welche in der Vliesstoffebene wirken. Im Gegenteil stellen diese

Fasern insbesondere bei schlechter Faser-Matrix-Haftung Störstellen im Verbund dar, wodurch die mechanischen Eigenschaften in Verbunden aus hochverfestigten Halbzeugen abfallen.

Der geringfügige Anstieg der Verbundfestigkeit bei sehr hoher Verfestigungsintensität im Vliesstoff deutet die Wirksamkeit eines weiteren Effektes an. Insbesondere bei höheren Fasergehalten wird die Faser-Matrix-Interaktion in klassischen Faserverbundwerkstoffen überlagert von einer Faser-Faser-Interaktion. Das bedeutet, dass die klassische Annahme, Zugkräfte werden über die Matrix in Form von Schubkräften von Faser zu Faser übertragen nicht mehr gilt. Die Fasern übertragen durch die intensive Verschlaufung miteinander die Zugkräfte zumindest teilweise formschlüssig von Faser zu Faser.

6.3.4 Fasersorten

In Abb. 35 und Abb. 36 ist der Einfluss von Faserfeinheit und Haftvermittlerzugabe dargestellt. In Kapitel 4.1.2 wurde bereits der Einfluss der Faserfeinheit bzw. der Einfluss des Faseraufschlusses dargelegt. Die Untersuchungen der Fasern selbst ergab mit sinkendem Fasertiter eine ebenfalls sinkende Faserfestigkeit. Im Verbund tritt nunmehr der Vorteil einer dünneren Faser zutage.

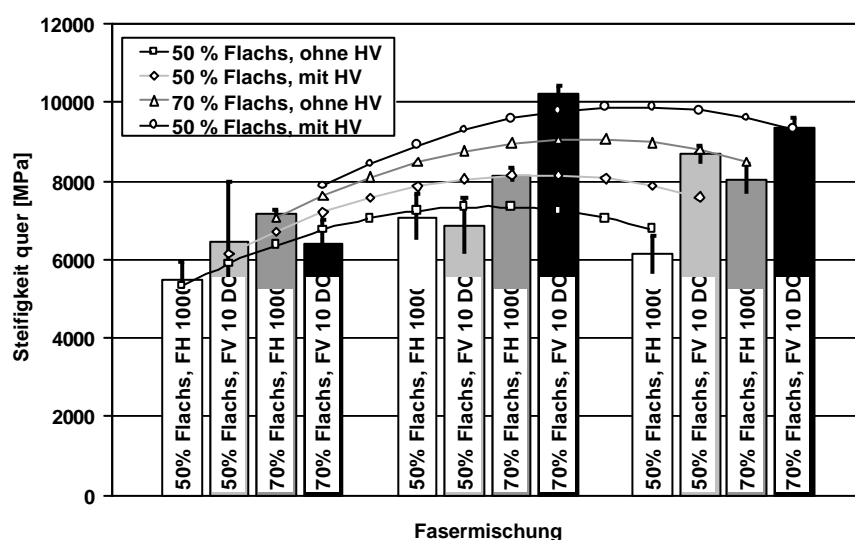


Abb. 35: Einfluss von Faserfeinheit und Haftvermittlerzugabe auf die Verbundsteifigkeit

Ein geringerer Faserdurchmesser entspricht bei gleichem Fasergehalt einer erhöhten Faseroberfläche und damit einer besseren Haftungsmöglichkeit zwischen Faser und

Matrix. Dieser positive Effekt kann zwischen den grob und mittel aufgeschlossenen Fasern beobachtet werden. Eine weitere Verfeinerung der Fasern führt aber zu einer überproportionalen mechanischen Schädigung der Fasern, wodurch sowohl die Festigkeit (Abb. 36) als auch die in Abb. 35 dargestellte Steifigkeit des Verbundes sinken.

Die Verwendung eines Haftvermittlers erhöht die Verbundsteifigkeit um durchschnittlich über 10%. Die in der Literatur beschriebene Steigerung der Verbundfestigkeit durch den Einsatz von Haftvermittler um bis zu 50 % konnte in den durchgeführten Versuchen nicht reproduziert werden. Hauptursache hierfür ist die zu geringe Konzentration des Haftvermittlers.

Um eine gleichmäßige Verteilung des Haftvermittlers zu erreichen, wurden MAH-modifizierte PP-Fasern verwendet, welche lediglich 1 % MAH enthielten. Untersuchungen an Spritzgussproben [1] ergaben einen optimalen MAH-Gehalt von 3 %. Bei der Verarbeitung von Hybridvliesstoffen muss von einer noch höheren Haftvermittlerkonzentration ausgegangen werden, da die Ausbildung von chemischen Bindungen zwischen Fasern und PP im Extrusions-/Spritzgießprozess durch die intensive Durchmischung besser realisiert werden kann.

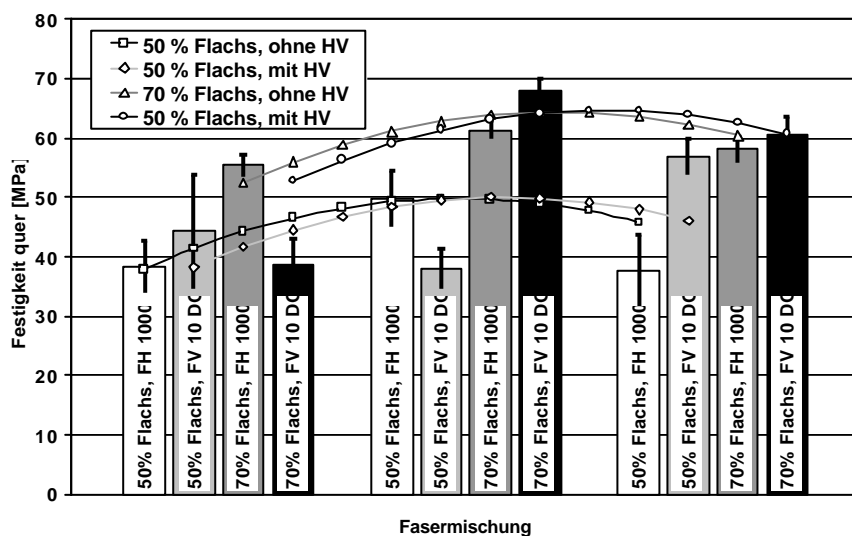


Abb. 36: Einfluss von Faserfeinheit und Haftvermittlerzugabe auf die Verbundfestigkeit

Die Steigerung der Verbundsteifigkeit kann durch die unterschiedlichen PP-Grundkörper nicht eindeutig der Wirkung des Haftvermittlers zugeordnet werden, da in [1] nachgewiesen wurde, dass selbst geringe Unterschiede in der PP-Sorte sichtbare

Auswirkungen auf die Steifigkeit im Verbund haben.

Zur statistischen Verifikation der Ergebnisse konnte Gleichung (18) übernommen werden. Die Ergebnisse der Regressionsrechnung für die Bestimmung der Faktoren a zeigt Tabelle 16.

Tabelle 16: Güte der vollständigen Regressionsansätze für den Einfluss der Flächenmasse und des Flachfasergehaltes des Vliesstoffes

Koeffizienten: Messgröße	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	R^2
Festigkeit längs	11,5134	0,5705	9,9512	-3,3457	-1,0250	56,60%
E-Modul längs	3338,5302	51,2705	1947,3313	-658,6750	627,7468	67,31%
Festigkeit quer	-2,5647	0,7296	19,4624	-5,9712	0,2710	65,02%
E-Modul quer	623,4529	86,5181	3015,0233	-951,3360	819,8646	74,92%

Der Einfluss der Haftvermittlers wurde über eine binäre Beschreibung formuliert. Bei Proben mit Haftvermittler ist $h=1$, ohne Haftvermittler ist $h=0$.

Die optimale Faserfeinheit für die untersuchte Fasersorte lässt sich durch partielle Ableitung nach $r_{i,N}$ bestimmen. Damit ergibt sich eine optimale Faserfeinheit zwischen 2,97 dtex und 3,26 dtex.

Die Übereinstimmung der Regressionsgleichungen mit den Messwerten ist auf Grund des geringen Bestimmtheitsmaßes nicht geeignet, zu erwartende mechanische Eigenschaften exakt vorherzusagen. Dennoch wird der qualitative Einfluss von Faserfeinheit und Haftvermittlerzugabe transparent. Die oben getroffenen Aussagen werden bestätigt. Die Festigkeit wird vom Haftvermittler in der untersuchten Konzentration nicht beeinflusst, die Steifigkeit wird in Längsrichtung um über 600 MPa, in Querrichtung um über 800 MPa verbessert.

6.3.5 Verfestigungstechnologie

Abb. 37 und Abb. 38 zeigen, dass der im unverfestigten Vliesstoff sehr starke Einfluss der Verfestigungstechnologie im Bauteil stark gedämpft auftritt. Malivlies, Maliwatt und Nadelvliesstoff weisen vergleichbare Kennwerte auf.

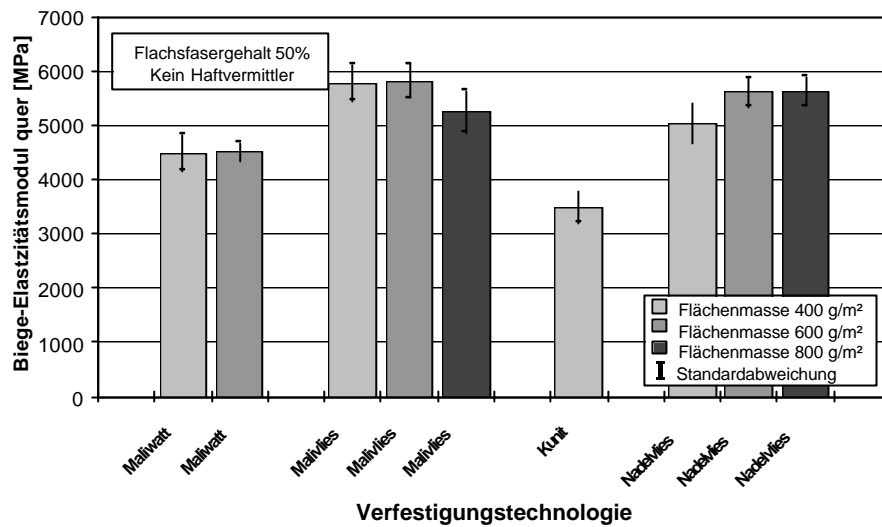


Abb. 37: Bauteilsteifigkeit in Querrichtung als Funktion der Verfestigungstechnologie

Die aus dem Herstellungsprozess resultierende Anisotropie der Vliesstoffe bleibt nahezu erhalten. Die Variante Malivlies und vor allem Kunit zeigen deutliche Unterschiede in den Längs- und Quereigenschaften. So besitzt Kunit als längsorientierter Vliesstoff in Längsrichtung sehr gute, in Querrichtung die im Vergleich geringsten Werte, wobei ein Verhältnis der Eigenschaften von nahezu 2:1 auftritt.

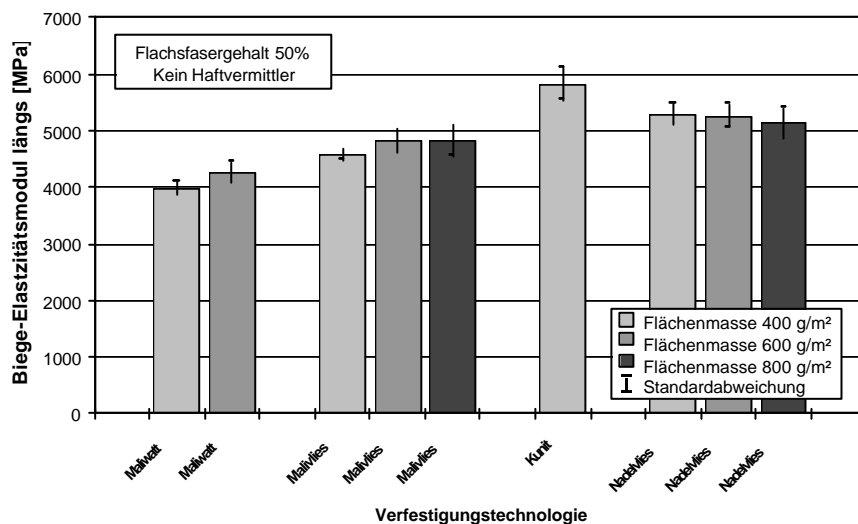


Abb. 38: Bauteilsteifigkeit in Längsrichtung als Funktion der Verfestigungstechnologie

Für den Anwender bedeutet die deutliche Abschwächung der Unterschiede in den Eigenschaften, dass sich die Auswahl der Verfestigungstechnologie stark auf die Anforderungen des Umformvorganges konzentrieren kann und die resultierenden Eigenschaften

ten nur wenig tangiert werden.

Limitiert wird die Auswahl, wenn höhere Fasergehalte oder Flächenmassen verarbeitet werden sollen. Die Kunit- wie auch die Maliwatt-Technologien sind in der genutzten Konfiguration sehr anfällig für die bei Naturfaser-Misch-Vliesstoffen üblichen Schwankungen von Flächenmasse und Beschaffenheit der Fasern. Bei Kunit konnten dadurch bei 50 % Fasergehalt nur eine Flächenmasse von 400 g/m² realisiert werden, bei Maliwatt Flächenmassen bis 600 g/m².

6.3.6 Ergebnis

Verfestigungstechnologie und Verfestigungsparameter besitzen sehr großen Einfluss auf das Verformungsverhalten des Vliesstoffes, jedoch sehr geringen Einfluss auf die mechanischen Bauteileigenschaften. Somit ist es möglich, die Verfestigung nach den Anforderungen der Bauteilgeometrie und des Umformvorganges zu gestalten, ohne Einschränkungen hinsichtlich der geforderten Bauteileigenschaften.

Die Wahl der Faserfeinheit muss die gegenläufigen Faktoren Faserfeinheit und Faserschädigung durch den Aufschlussprozess berücksichtigen. Ziel ist die Ermittlung der optimalen Faserfeinheit, bei der einerseits der geringe Fasertiter eine Steigerung der Verbundeigenschaften bewirkt, die Fasern andererseits aber durch den Aufschlussprozess noch nicht zu stark mechanisch geschädigt ist. Die vorliegenden Ergebnisse stimmen mit den Untersuchungen in [27] an Hanffasern überein, wonach die mechanischen Eigenschaften von Naturfaserverbundwerkstoffen um so besser sind, je größer die verwendeten Fasern sind.

Der Vergleich zu den in der Literatur beschriebenen Berechnungsansätzen macht die Vorteile der in dieser Arbeit verwendeten Polynomgleichungen deutlich. Der aus der Laminattheorie hergeleitete Ansatz nach [63] zur allgemeinen Beschreibung des Verhaltens eines wirrfaserverstärkten Faserverbundbauteils beschreibt den speziellen Fall einer dreidimensional orientierten Struktur (Gleichung (6)). Die Gleichung sieht keine Terme vor, um beispielsweise die Verfestigungsparameter einfließen zu lassen. Mit den entsprechenden Faserkennwerten ergibt sich bei 70 % Naturfasergehalt ein E-Modul von 9554 MPa. Dieser Wert liegt leicht unterhalb des höchsten gemessenen Wertes von

10205 MPa. Die nach der Laminattheorie berechneten Werte können somit als sichere Obergrenze der praktisch erreichbaren Werte betrachtet werden. Für eine Anwendung in der Praxis fehlt die Möglichkeit zur Formulierung der Einflüsse der Halbzeugherstellung.

Der stochastisch-theoretische Ansatz aus [67] lässt sich ebenfalls an die erreichten Messwerte anpassen. Diese Anpassung ist erforderlich, da z.B. die Bindungskräfte im Berührungspunkt zweier Fasern experimentell auf Grund der geringen Faserlänge nur sehr schwer messbar sind. Bei diesem Ansatz fehlen ebenfalls Terme zur Beschreibung der Einflüsse der Prozessparameter bei der Vliesstoffherstellung.

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten polynomischen Gleichungsansätze berücksichtigen die Vielzahl der Einflussfaktoren auf die mechanischen Eigenschaften, welche sich aus der Modifikation des Faserhalbzeuges ergeben. Damit sind diese Gleichungsansätze einerseits in der Lage, die Wirkungen vorgegebener Halbzeugherstellungs- und Verarbeitungsprozessparameter vorherzusagen, andererseits ermöglichen sie eine gezielte Auslegung der Vliesstoffhalbzeuge auf einen vorhandenen Verarbeitungsprozess und geforderte mechanische Eigenschaften.

7 Reibung Vlies – Werkzeug

7.1 Vorbetrachtung

Die Verarbeitung von Naturfaser-Thermoplast-Vliesstoffen erfolgt in der Regel auf Zwei-stufenpressen im Tiefziehverfahren. Im ersten Verfahrensschritt wird das Halbzeug zwischen zwei planen Heizplatten auf Verarbeitungstemperatur erwärmt. Nach dem Transfer in das Formwerkzeug erfolgt dort die Umformung zum Bauteil. Das Formwerkzeug ist temperiert, um definierte, reproduzierbare Abkühlraten einstellen zu können.

Zur Vermeidung von Faltenbildung während der Umformung werden Haltesysteme eingesetzt, welche am Rand des zu verarbeitenden Halbzeuges eine Rückhaltekraft einleiten. Im einfachsten Falle wird diese Kraft mittels Reibung zwischen dem Vliesstoff, dem Werkzeug und einem Niederhalter realisiert. In diesem Zusammenhang ist es für die Applikation einer definierten Rückhaltekraft notwendig, die relevanten Einflüsse auf die Reibkraft zu identifizieren und die Variationsmöglichkeiten der verschiedenen Parameter aufzuzeigen.

Folgende Parameter wurden bei der Bestimmung des Reibungskoeffizienten zwischen Vliesstoff und Werkzeug untersucht:

- Flachsfasergehalt,
- Oberflächentemperatur des Werkzeuges,
- Relativgeschwindigkeit Werkzeug-Vliesstoff,
- Flächenpressung.

Der Versuch wurde als Streifenauszugsversuch konzipiert (Abb. 39). Ein Vliesstreifen wurde über eine Zugprüfmaschine zwischen zwei beheizten Werkzeugbacken herausgezogen. Die Prüfmaschine registrierte Kraft und Weg bei vorgegebener Geschwindigkeit. Die Aufbringung der Normalkraft erfolgte über Massestücke. Der Vliesstreifen wur-

de in die Vorrichtung eingelegt und 5 min erwärmt, um eine homogene Oberflächentemperatur während des Versuchs zu garantieren (vgl. Kapitel 6.1), danach erfolgte der Start des Versuchs.

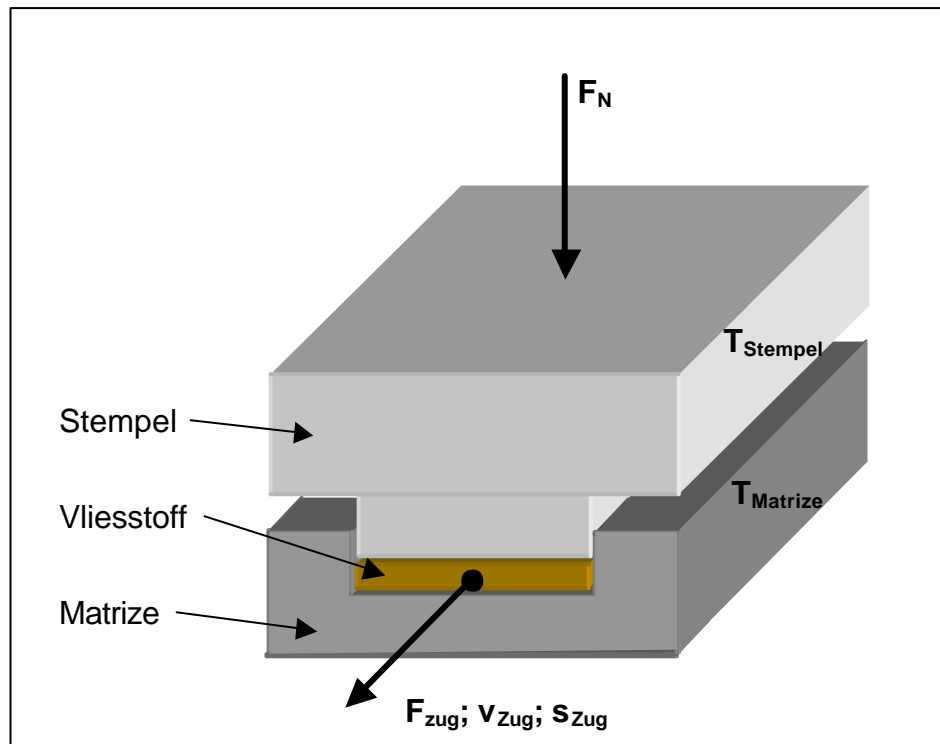


Abb. 39: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten

Zur Erklärung der Einflüsse der verschiedenen Faktoren wird von folgendem Modell ausgegangen:

Die Werkzeugoberfläche kommt sowohl mit den Natur- wie auch mit Thermoplastfasern in Kontakt. Das Verhältnis der Kontaktflächen Naturfaser/Werkzeug zu Thermoplastfaser/Werkzeug verhält sich analog dem Flachsfasergehalt im Vliesstoff. Mit zunehmender Normalkraft sinkt der Anteil der freien Werkzeugoberfläche zwischen den Berührungsfächen mit den Fasern.

Die Thermoplastfasern verhalten sich gemäß dem visko-elastischen Stoffmodell nach *MAXWELL* :

$$\mathbf{t} = \mathbf{t}_H + \mathbf{t}_N = G \cdot \mathbf{g} + \mathbf{h} \cdot \dot{\mathbf{g}} \quad (25)$$

Das Reibungsverhalten von Polymeren kann allgemein beschrieben werden durch zwei

gemeinsam wirkende Mechanismen, die Adhäsion der Grenzschichten und die Deformation der Mikrokontaktstellen. Nach [70] ergibt sich die Reibkraft F_R bei Relativbewegung der Reibpartner zu:

$$F_R = F_{R_adh} + F_{R_def} \quad (26)$$

Durch die Rauheit der Oberflächen berühren sich die Reibpartner nur auf einem Bruchteil der projizierten Fläche. Im realen Kontaktbereich bilden sich atomare Wechselwirkungen zwischen den beiden Reibpartnern aus.

Die Adhäsion entsteht durch atomare Haftkräfte zwischen der Reibpartnern. Durch das Zusammenpressen werden die äußeren Atome einander angenähert, und es kommt nach Überwindung der atomaren Abstoßungskräfte zur Adhäsion. Nach [70] berechnet sich der adhäsive Anteil der Reibungskraft wie folgt:

$$F_{R_adh} = f_a \cdot A = f_a \cdot \frac{F_N}{H} \quad (27)$$

Daraus lässt sich ableiten, dass mit sinkender Härte H der Oberfläche der adhäsive Anteil der Reibkraft steigt. Ebenso ist der adhäsive Anteil wesentlich abhängig von der Oberflächenenergie bzw. der spezifischen Adhäsionskraft f_a des Polymers, d.h. von der Größe der Dipolkräfte in den Molekülen. Diese sind bei Polypropylen als langkettigem Kohlenwasserstoff nur sehr gering ausgebildet.

Der deformative Anteil der Reibkraft entsteht durch ein Verhaken der Rauheitsspitzen. Bei der Relativbewegung der Körper gegeneinander kommt es zu elastischen bzw. plastischen Verformungen dieser Rauheitsspitzen. An den Flanken der Rauigkeitsspitzen kommt es wieder zu Adhäsion zwischen den Reibpartnern. Der deformative Anteil wird als Produkt der Kontaktfläche und der Scherfestigkeit beschrieben:

$$F_{R_def} = A \cdot S \quad (28)$$

7.2 Flachsfasergehalt und Kontaktflächentemperatur

Die Kontaktflächentemperatur beeinflusst die Abkühlgeschwindigkeit des vorgewärmten

Vliesstoffes. Höhere Abkühlgeschwindigkeiten und die damit verbundene schnellere Erstarrung der Thermoplastmatrix können zu Problemen durch Faltenbildung führen. Bei geringeren Abkühlgeschwindigkeiten erhöht sich die Taktzeit. Die sich während des Prozesses einstellende Kontaktflächentemperatur ist ein wesentlicher Faktor für die Rückhaltekräfte beim Einsatz einer Niederhaltersystems, welches auf der Wirkung von Reibung zwischen Zuschnitt und Werkzeug basiert. Es wurde der Einfluss von Kontaktflächentemperaturen zwischen 60 °C und 200 °C bei Flachsfasergehalten von 30 %, 50 % und 70 % untersucht.

Die Abhängigkeit der Reibwertes von der Kontaktflächentemperatur lässt sich in drei Bereiche einteilen (Abb. 40). Im Bereich I zwischen 60 °C und 120 °C halbiert sich der Reibwert bei steigender Temperatur. Beim Übergang von 120 °C auf 130 °C (Bereich II) kommt es zu einem sprunghaften Anstieg des Reibwertes. Dieser fällt danach bei weiterer Erwärmung bis zum Schmelzen der Matrix (Bereich III) wiederum ab, wobei ein stärkerer Abfall als im Bereich I zu beobachten ist.

Der Bereich I ist gekennzeichnet durch deformative Reibung. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Scherfestigkeit des Polypropylen, wodurch nach Gleichung (28) die Reibkraft sinkt. Dies entspricht auch dem in den praktischen Versuchen nachgewiesenen Verhalten. Der Naturfasergehalt hat in diesem Bereich keinen Einfluss auf die Reibkraft.

Im Bereich II kommt es wie bereits erwähnt beim Überschreiten von 120 °C zu einem sprunghaften Anstieg des Reibwertes. Der Deformationsanteil der Reibkraft nimmt weiter ab, wird aber von Adhäsionsanteil überlagert. In diesem Temperaturbereich ist die Oberfläche der PP-Fasern so stark erweicht, dass die reale Kontaktfläche zwischen PP-Fasern und Werkzeugoberfläche stark zunimmt und damit in großem Maße Adhäsionskräfte ausgebildet werden können.

Bei Kontaktflächentemperaturen von mehr als 130 °C (Bereich III) sinkt die Scherfestigkeit des PP weiter stark ab, die Adhäsion reduziert sich durch stärkere Molekülbewegungen, wodurch die Reibkräfte wiederum stark abnehmen. In diesem Bereich kommt darüber hinaus der Einfluss des Flachsfasergehaltes zum Tragen. Durch einen hohen Gehalt an Flachsfasern wird die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und

Polypropylenfasern geringer. Das hauptsächlich die erweichten Polypropylenfasern für den Adhäsionsanteil der Reibkraft verantwortlich sind, sind die Reibkräfte bei hohen Flachsfasergehalten geringer.

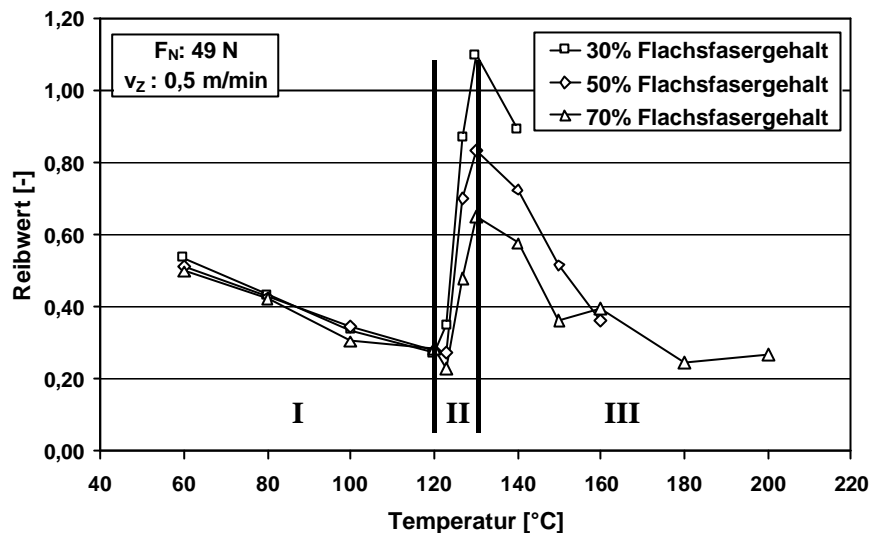


Abb. 40: Reibwert in Abhängigkeit von Temperatur und Flachsfasergehalt

7.3 Flächenpressung

Der Einfluss der Flächenpressung wurde für vier verschiedene Temperaturen ermittelt. Für alle Temperaturen zeigte sich, dass mit steigender Flächenpressung der Reibwert sinkt (Abb. 41). Dieses Verhalten ist umso ausgeprägter, je höher das Ausgangsniveau des Reibwertes ist. Die lineare Approximation des Kurvenverlaufes zeigt sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten ($R^2 = 94\%$ bis 99%).

Der adhäsive Anteil der Reibkraft (Gleichung (26)) steigt mit zunehmender Normalkraft, da eine größere Anzahl an Fasern mit der Werkzeugoberfläche in Berührung kommen. Da aber die resultierende Reibkraft sinkt, muss der deformative Anteil stärker abnehmen, als der adhäsive Anteil zunimmt. Dies könnte der Fall sein, da die zur plastischen Deformation der Fasern notwendigen Spannungen bereits zu einem Teil durch die Normalkraft aufgebracht wird.

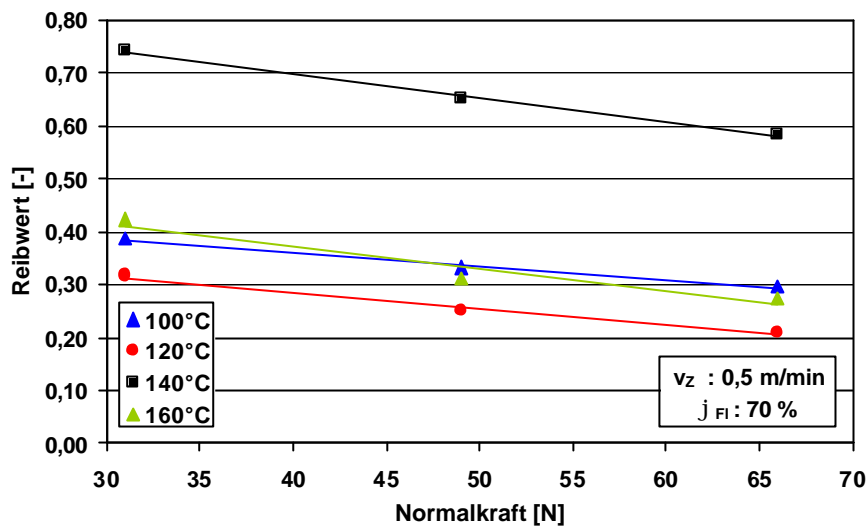


Abb. 41: Reibwert in Abhängigkeit von Normalkraft und Temperatur

7.4 Relativgeschwindigkeit

Auch verschiedene Auszugsgeschwindigkeiten aus den Versuchseinrichtung entsprechend unterschiedlicher Umformgeschwindigkeiten wurden bei vier Temperaturstufen untersucht. Abb. 42 zeigt den identischen Einfluss der Temperatur wie in Kapitel 7.2 beschrieben.

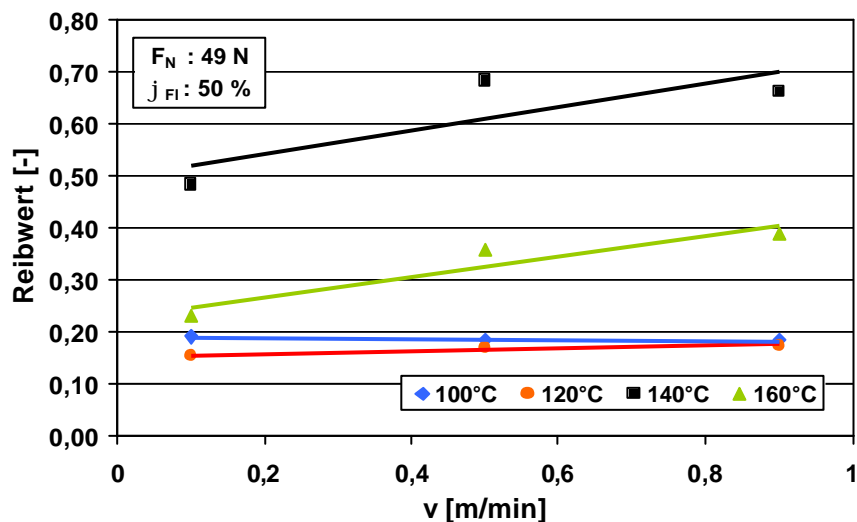


Abb. 42: Reibwert in Abhängigkeit von Ziehgeschwindigkeit und Temperatur

Bei 100 °C ist noch kein Einfluss der Auszugsgeschwindigkeit zu beobachten. Erst ab 120 °C kann ein Ansteigen des Reibwertes mit steigender Auszugsgeschwindigkeit festgestellt werden, da es ab dieser Temperatur zu einer deutlichen Erweichung des PP

kommt und das viskoelastische Verhalten die Reibverhältnisse beeinflusst. Gleichung (25) bestätigt, dass die Scherkraft bei der Verformung viskoelastischer Materialien geschwindigkeitsabhängig ist, d.h. die Scherkraft τ steigt mit zunehmender Schergeschwindigkeit \dot{g} .

7.5 Ergebnis

In allen Untersuchungen wird der in Abb. 40 dargestellte Temperaturverlauf beobachtet. Bei ca. 130 °C kommt es zu einem sprunghaften Anstieg der Reibkraft. Für die Umformung von Naturfaser-Polypropylen-Vliesstoffen mittels Tiefziehen bzw. Pressen bedeutet diese Beobachtung, dass der Bereich um 130 °C Kontaktflächentemperatur während des Umformvorganges möglichst nicht durchfahren werden sollte, da schwer vorhersagbare Reibungsverhältnisse auftreten, welche den Umformvorgang negativ beeinflussen. Andererseits ist es bei genauer Einhaltung der Kontaktflächentemperatur mit geringen Normalkräften möglich, hohe Rückhaltekräfte zu erzeugen, was den konstruktiven Aufwand für das Rückhaltesystem verringern würde.

Für die Auslegung des Rückhaltesystems ist es bedeutsam, dass der Reibungskoeffizient mit steigender Normalkraft sinkt, d.h. die Reibkräfte nehmen nicht in gleicher Weise zu wie die Normalkräfte. Für eine rationelle Fertigung von Naturfaserverbundbauteilen ist eine hohe Umformgeschwindigkeit wünschenswert. Im Bereich bis 120 °C ist keine Abhängigkeit der Reibkraft von der Relativgeschwindigkeit zwischen Vliesstoff und Werkzeug festzustellen, die Umformgeschwindigkeit kann also nach den Anforderungen des Prozesses gewählt werden. Darüber hinaus sind die erhöhten Rückhaltekräfte bei steigender Umformgeschwindigkeit zu berücksichtigen.

Abschließend ist zu beachten, dass die in diesen Untersuchungen verwendeten Temperaturen in der Kontaktfläche zwischen Vliesstoff und Werkzeug vorliegen müssen und bei einem realen Verarbeitungsprozess nicht gleich der Werkzeugtemperatur sind. Vielmehr liegt ein instationärer Prozess vor, bei dessen Modellierung im Wesentlichen Werkzeug- und Materialtemperatur, die Wärmekapazität des Vliesstoffes sowie die Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden müssen.

8 Charakterisierung des Umformverhaltens

8.1 Allgemeines

Bei gewebeverstärkten Faserverbundkunststoffen wird die Drapierbarkeit des Verstärkungstextils durch einen einfachen Scherversuch bestimmt [78]. Die Ergebnisse dieses Scherversuches korrelieren direkt mit den Grenzen des Umformvermögens eines gewebeverstärkten Kunststoffes. Beim Einsatz von thermoplastischen Matrixmaterialien muss zusätzlich die Temperatur bzw. die Temperaturverteilung des Bauteils berücksichtigt werden, da die Viskosität des Matrixmaterials einen wesentlichen Einfluss auf die Umformkräfte, die innere Spannungsverteilung des Bauteils und die Reibungsverhältnisse während der Umformung hat. Für die Umformung von gewebeverstärkten Thermoplasten existieren bereits numerische Modelle mittels FEM-Analyse [6, 43]. Bei wirrfaserverstärkten Kunststoffen sind vergleichbare Modelle auf Grund der komplexen Verformungsmechanismen noch nicht implementiert.

Bei der Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen im Spritzguss- oder Fließpressverfahren stehen rheologische Betrachtungen zur Bestimmung des Umform- bzw. Formfüllverhaltens im Vordergrund. Verschiedene rheometrische Verfahren beschreiben das Verhalten von kurzfaserverstärkten Thermoplasten bei unterschiedlichen Prozessbedingungen, Formfüllsimulationen auf Basis von FEM-Modellen stehen dem Anwender zur Verfügung.

Für Fließpressmassen wie z.B. GMT sind verschiedene charakterisierende Verfahren bekannt, welche den Fließweg und die damit zusammenhängenden Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Prozessparameter Temperatur, Pressdruck und Pressgeschwindigkeit bestimmen.

Thermoplastische, naturfaservliesverstärkte Kunststoffe zeigen ein lokal ausgebildetes kombiniertes Fließ- und Dehnungsverhalten während der Umformung. Die Umforme-

enschaften sind einerseits vom viskoelastischen Verhalten der Thermoplastmatrix, andererseits von der Struktur des Verstärkungstextils bestimmt. Damit nehmen diese Materialien eine Mittelstellung zwischen gewebeverstärkten und unverstärkten Kunststoffen ein. Bestehende Verfahren können nur eingeschränkt bzw. nur für einzelne Komponenten genutzt werden (vergleiche Rheometrie an PP-Fasern, Kapitel 4.2). Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten zur Charakterisierung des Umformverhaltens in Bezug auf die Anwendbarkeit für naturfasermattenverstärkte Thermoplaste diskutiert.

Der Überblick zum Stand der Technik zeigt, dass für die Bereiche gewebeverstärkte Thermoplaste mit faserdominiertem Verformungsverhalten einerseits und fasergefüllte Press- und Spritzgußmassen mit strömungsdominiertem Umform- bzw. Formgebungsverhalten andererseits Modelle und Methoden zur Modellierung des Umformverhaltens existieren und zur Vorhersage, z.B. von Faserorientierungen und mechanischen Eigenschaften genutzt werden können. Für den Übergangsbereich der wirrfaserverstärkten Thermoplaste, welche ein teils faserdominiertes, teils matrixdominiertes Umformverhalten besitzen, fehlen entsprechende Modelle.

Daher werden zunächst die in Frage kommenden Verformungsgrößen auf ihre Anwendbarkeit für flachfaserverstärktes Polypropylen hin untersucht. Um diese Verformungsgrößen ermitteln zu können, werden zwei Verfahren zur optischen Dehnungsmessung an Flachfaser-Polypropylen-Vliesstoffen entwickelt, um damit das Verformungsverhalten dieser Vliesstoffe phänomenologisch zu untersuchen.

8.2 Verformungsgrößen

Technische Dehnung

Die technische Dehnung e ist als ein Maß für eine Verformung über eine bezogene Längenänderung definiert. Für eine Ausgangslänge in X-Richtung x_0 und eine Länge x_1 nach der Verformung gilt folgende Festlegung:

$$e_x = \frac{x_1 - x_0}{x_0} \quad (29)$$

Die Dehnung ϵ ist eine dimensionslose Größe und wird meist in % angegeben [36].

Umformgrad

Die Ermittlung des Umformgrades erfolgt auf experimentell-theoretischem Weg mit Hilfe der Formänderungsanalyse. Der experimentelle Teil besteht im Sichtbarmachen und Messen der Werkstoffbewegung. Zu diesem Zweck werden vor dem Umformprozess geeignete, geometrisch definierte Raster auf die zu untersuchende Werkstückoberfläche aufgebracht. Infolge des Materialflusses ändern diese Raster während des Umformvorganges ihr Aussehen. Je nach Größe der Formänderung entstehen große, kleine oder gar keine geometrischen Veränderungen des Messrasters. Die Verformungen werden vermessen und durch die Ermittlung der Geometrieänderung lassen sich Richtung und Größe des Werkstoffflusses bestimmen. Die anschließende Auswertung und Weiterverarbeitung der erhaltenen Abweichungen stellt den theoretischen Teil der Ermittlung des Umformgrades dar [55].

Bei der Umformung von Metallblechen dient die Ermittlung des Umformgrades in erster Linie zur Erstellung der Fließkurve, also der Darstellung der Fließspannung über dem Umformgrad [73]. Die Definition nach [64] besagt, dass der Umformgrad ϕ die Kenngröße zur Erfassung der plastischen Formänderung von Werkstücken beim Umformen ist.

Der Umformgrad ist definiert als Verhältnis der Abmessungsänderung dx zur Ausgangsabmessung x . Die Integration über den Umformweg von x_0 nach x_1 ergibt

$$\mathbf{j}_x = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{x} = \ln \frac{x_1}{x_0} \quad (30)$$

Wenn für das untersuchte Material Volumenkonstanz vorausgesetzt werden kann, gilt die Beziehung

$$\mathbf{j}_x + \mathbf{j}_y + \mathbf{j}_z = 0 \quad (31)$$

Für unverfestigte Vliesstoffe kann die Beziehung (31) nicht übernommen werden, da es zu Dichteänderungen während des Umformvorganges kommen kann.

Tabelle 17: Vergleich Technische Dehnung - Umformgrad

	Technische Dehnung ε	Umformgrad φ
Aufsummierung von Teilverformungen	<i>nicht möglich</i> $\varepsilon_{x1 \rightarrow x2} + \varepsilon_{x2 \rightarrow x3} \neq \varepsilon_{x1 \rightarrow x3}$	<i>möglich</i> $\varphi_{x1 \rightarrow x2} + \varphi_{x2 \rightarrow x3} = \varphi_{x1 \rightarrow x3}$
Betrag für positive/ negative Längenänderung	<i>ungleich:</i> Verdopplung: $\varepsilon=100\%$ Halbierung: $\varepsilon=-50\%$	<i>gleich</i> Verdopplung: $\varphi= 0,693$ Halbierung: $\varphi=-0,693$
Anschaulichkeit der Darstellungsgröße	<i>sehr gut</i>	<i>schlecht</i>

Zur mathematischen Auswertung und Verarbeitung bietet die Verwendung des Umformgrades deutliche Vorteile. Die Additivität von Teilergebnissen spielt dabei eine wesentliche Rolle. Die Übertragbarkeit von Umformgrad in technische Dehnung und umgekehrt erlaubt die parallele Verwendung beider Größen und damit die gleichzeitige Nutzung der jeweiligen Vorteile.

Durch Einsetzen von (29) in (30) ergibt sich Beziehung (32):

$$j_x = \ln(e_x + 1) \text{ bzw. } e_x = e^{j_x} - 1 \quad (32)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (32) können die z.B. in der Werkstoffprüfung üblichen Angaben der technischen Dehnung vor der Weiterverarbeitung und zu Vergleichszwecken umgewandelt werden. Ebenso können Umformgrade in die anschaulichere Darstellung der technischen Dehnung überführt werden.

8.3 Grauwertkorrelationsanalyse

8.3.1 Verfahrensprinzip

Die meisten technischen Oberflächen besitzen ein für das menschliche Auge nicht wahrnehmbares Helligkeitsmuster. Aufgenommen von einer digitalen Kamera und im Rechner ausgewertet kann dieses als Grauwertmuster verarbeitet werden. Durch den Vergleich lokaler Ausschnitte zweier Digitalbilder, welche zu unterschiedlichen Zeitpunk-

ten von einem sich ändernden Objekt (z.B. Materialproben während der Werkstoffprüfung) bei gleichbleibenden Randbedingungen (Licht, Hintergrund, etc.) aufgenommen wurden, lässt sich die ebene Verschiebung des Grauwertmusters bestimmen. „Bilder üblicher technischer Oberflächen unterschiedlichster Werkstoffe sind in aller Regel zur Analyse geeignet, falls sie nicht stark spiegelnd, optisch durchsichtig oder optisch zu einheitlich sind“ [15]. Die mathematischen Grundlagen wurden von der *Chemnitzer Werkstoff Mechanik (CWM)* in das PC basierte Programm VEDDAC implementiert, welches zur Auswertung der im folgenden beschriebenen Versuche verwendet wurde.

Das System ist auf die Auswertung von Bildern nur einer Kamera ausgelegt. Daher können nur ebene Verformungsvorgänge untersucht werden. Die Grauwertkorrelationsanalyse ist daher in dieser Form nicht zur Beobachtung eines realen Umformprozesses geeignet. Dagegen hat sich das Verfahren bei der im folgenden beschrieben berührungslosen Messung der Querdehnung beim Streifenzugversuch an Vliesstoffproben gut bewährt.

8.3.2 Streifenzugversuch

Die erste Analyse des Umformverhaltens an den Versuchsvliesstoffen aus Flachs- und Polypropylenfasern wurde an einem Streifenzugversuch durchgeführt. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur und in einer Klimakammer bei ca. 150 °C (T_{\max} der Klimakammer) durchgeführt.

Mittels Grauwertkorrelationsanalyse wurden zusätzlich zu der von der Prüfmaschine ermittelten Zugkraft und der daraus abgeleiteten Zugspannung die Querkontraktion sowie die Längsdehnung bestimmt.

Die zur Auswertung verwendete Software ermittelt das Dehnungsfeld über der Materialprobe, welches beim Vergleich zweier aufeinanderfolgender Bilder entsteht. Die Dehnungen wurden über die Gleichungen (32) im Umformgrade übertragen, um die bereits beschriebene Additivität des Umformgrades nutzen zu können. Der Vergleich zwischen der Summe der Teilergebnisse zu der von der Prüfmaschine vorgegebenen Längenänderung liegen bei weniger als zehn Prozent. Für jeden der durchschnittlich vierzig Teilschritte ergibt sich damit eine Abweichung von weniger als einem viertel Prozent zwi-

schen den Ergebnissen der Grauwertkorrelation und dem von der Prüfmaschine gemessenen Weg. Dieser offensichtlich systematische Fehler ist auf die Fehler der nicht kalibrierten optischen Messachse zurückzuführen.

8.3.2.1 Flachsfasergehalt

Der Flachsfasergehalt zeigte bei den vorangegangenen Zugversuchen (Kapitel 5.1) mit den deutlichsten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Die Prüfungen werden sowohl bei Raumtemperatur als auch im klimatisierten Zustand durchgeführt, um relevante Aussagen über das Materialverhalten bei Umformbedingungen treffen zu können. Abb. 44 zeigt, dass das Dehnungsverhalten in Längs- und Querrichtung weder vom Flachsfasergehalt noch von der Temperatur beeinflusst wird. Lediglich die Spannungen im Werkstoff variieren.

Beim Vergleich der bei diesem Versuch gemessenen Zugspannungen im Vliesstoff mit denen in Kapitel 5.1 fallen die unterschiedlichen Ergebnisse auf. Dabei ist zu beachten, dass die Randbedingungen beider Versuche nicht identisch sind. Die Einspannlänge in Kapitel 5.1 beträgt nach DIN 53857-2 [20] 200 mm, in dieser Versuchsanordnung auf Grund der geringen Bauhöhe der Klimakammer 150 mm. Der normgerechte Versuch endet beim Versagen der Probe. Die in den Vlieszugversuchen aus Kapitel 5 ermittelten Reißdehnungen liegen für Nadelvliesstoffe bei 100 %, und Malivlies bei 60 %. Wegen der räumlichen Verhältnisse in der Klimakammer wird in den hier beschriebenen Versuchen lediglich eine Dehnung von 47 % (70 mm Weg) erreicht, d.h. es erfolgt keine Prüfung bis zum Bruch des Materials.

Abb. 43 zeigt, dass die auftretenden Zugspannungen bei einem Flachsfasergehalt von 50 % über denen mit 30 % und 70 % liegen. Dieser Effekt ist sowohl bei Raumtemperatur wie auch bei 150 °C zu beobachten. Im Gegensatz dazu stehen die in Kapitel 5.2 durchgeführten Untersuchungen, welche eine sinkende Reißfestigkeit mit steigendem Flachsfasergehalt aufzeigten. Eine Erklärung für dieses Verhaltens ist in der Interaktion zwischen dem Fasergehalt, den Vernadelungsparametern und der Einspannlänge zu suchen. Unabhängig vom Fasergehalt zeigt sich ein weitgehend identischer Verlauf des Umformgrades in Längs- und Querrichtung der Probe (entsprechend der Längsdehnung und Querkontraktion).

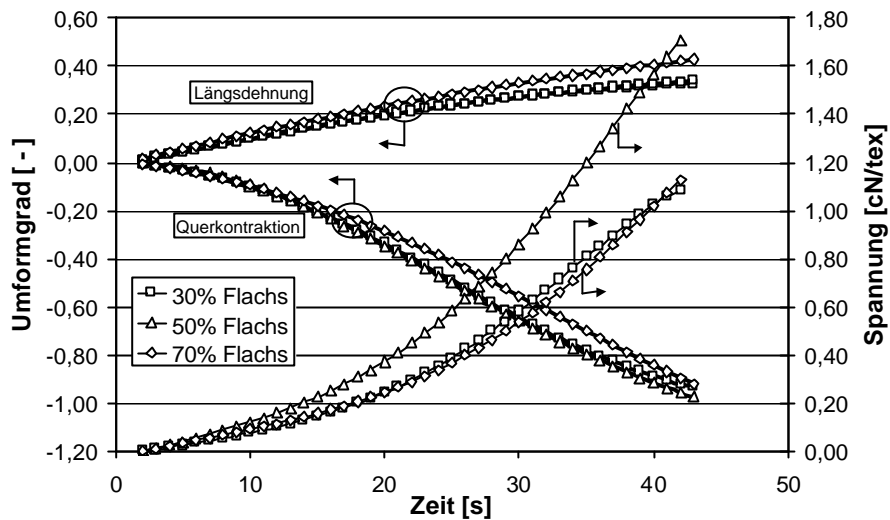


Abb. 43: Grauwertkorrelation: Einfluss des Flachsfasergehaltes

8.3.2.2 Temperatur

Der Einfluss der Prüftemperatur ist in Abb. 44 dargestellt. Durch die sinkende Festigkeit der Polypropylenfasern mit zunehmender Temperatur sinken die Zugkräfte. Es wird deutlich, dass sich das Verformungsverhalten nicht ändert, Längsdehnung und Querkontraktion besitzen nahezu identische Verläufe. Die Prüftemperatur von 150 °C hat nicht ausgereicht, um die PP-Fasern zum Schmelzen zu bringen und damit ein verändertes Verformungsverhalten hervorzurufen. Die eingesetzte Prüftechnik ermöglichte jedoch keine höheren Prüftemperaturen.

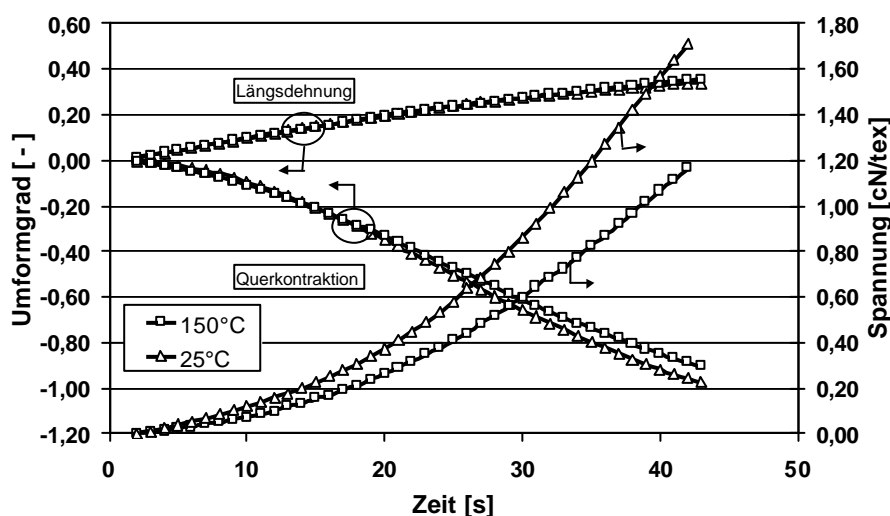


Abb. 44: Grauwertkorrelation, Einfluss der Temperatur

Erhöhte Temperaturen haben eine Erweichung der Polypropylenfasern zur Folge. Diese Fasern tragen wesentlich zur Zugfestigkeit des Vliesstoffes bei, daher sinkt bei höherer Prüftemperatur der Verformungswiderstand respektive die auftretenden Spannungen. Es erfolgt jedoch keine prinzipielle Änderung des Verformungsverhaltens.

8.3.2.3 Verfestigungsparameter

Abb. 45 und Abb. 46 machen deutlich, dass sowohl Längsdehnung wie auch Querkontraktion im Streifenzugversuch von den Verfestigungsparametern nicht beeinflusst werden. Die auftretenden Spannungen verhalten sich analog der Festigkeit des Vliesstoffes, d.h. ein festerer Vliesstoff führt bei der Umformung zu höheren Umformkräften. Es kommt jedoch bis zu den maximal erreichten Dehnungen nicht zu einer Behinderung der Querkontraktion durch eine erhöhte Anzahl an Faserpfropfen pro Fläche. In Übereinstimmung mit den oben beschriebenen Ergebnissen der Vliesstoffprüfung zeigt sich auch in diesen Untersuchungen der deutlich stärkere Einfluss der Einstichtiefe im Vergleich zur Stichdichte.

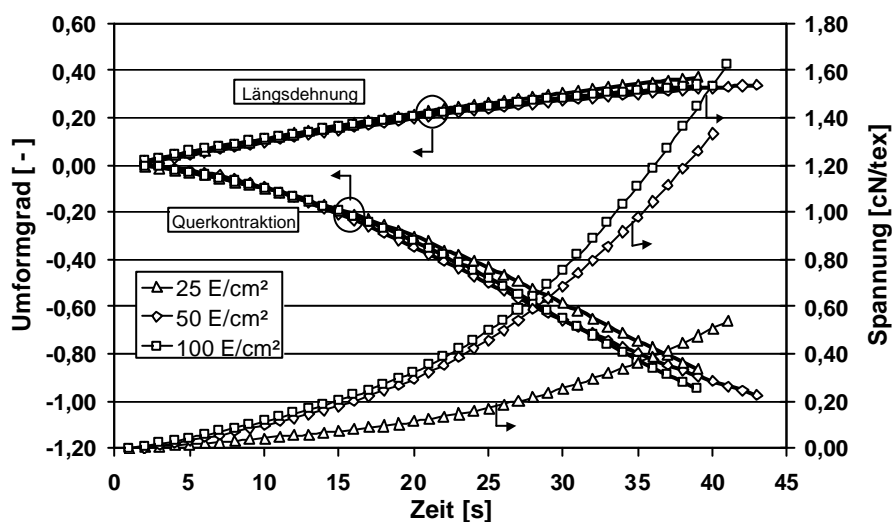


Abb. 45: Querkontraktion - Einfluss der Stichdichte

Sowohl eine Änderung der Einstichtiefe wie auch der Stichdichte verändern die Struktur des Vliesstoffes nicht grundlegend. Der Aufbau des Vliesstoffes wird nicht verändert, lediglich die Anzahl und Tiefe der verfestigenden Faserpfropfen sowie die Anzahl der darin fixierten Fasern variiert. Werden zur Abformung komplexer Geometrien erhöhte Reißkräfte benötigt, kann dies durch intensive Verfestigung erreicht werden. Steht hin-

gegen eine hohe lokale Dehnfähigkeit im Vordergrund der Anforderungen an das Halbzeug, ist ein gering verfestigtes Halbzeug zu wählen.

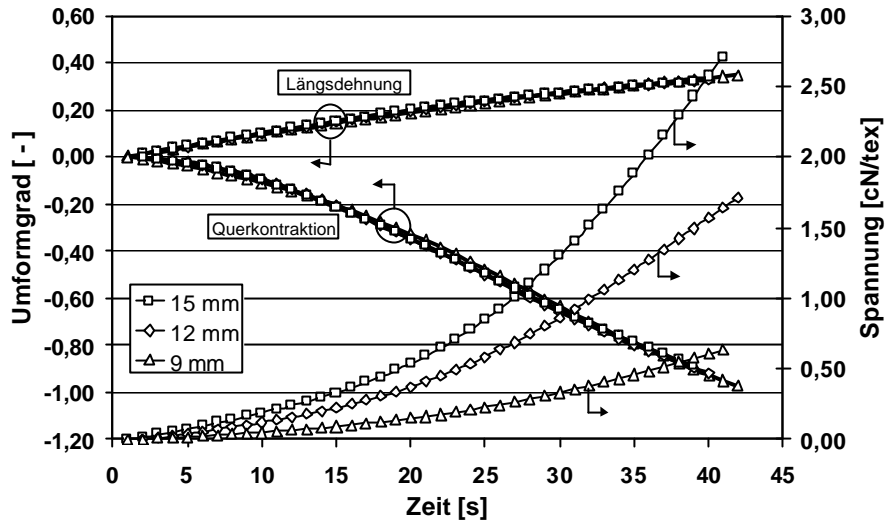


Abb. 46: Querkontraktion - Einfluss der Einstichtiefe

8.3.2.4 Verfestigungstechnologie

Der Vergleich der Verfestigungstechnologien (Abb. 47) zeigt die speziellen Eigenschaften des jeweiligen Vliesstoffes in Bezug auf das Dehnungsverhalten. Nadelvliesstoffe weisen z.B. eine doppelt so hohe Querkontraktion auf wie vergleichbare Maliwatterzeugnisse.

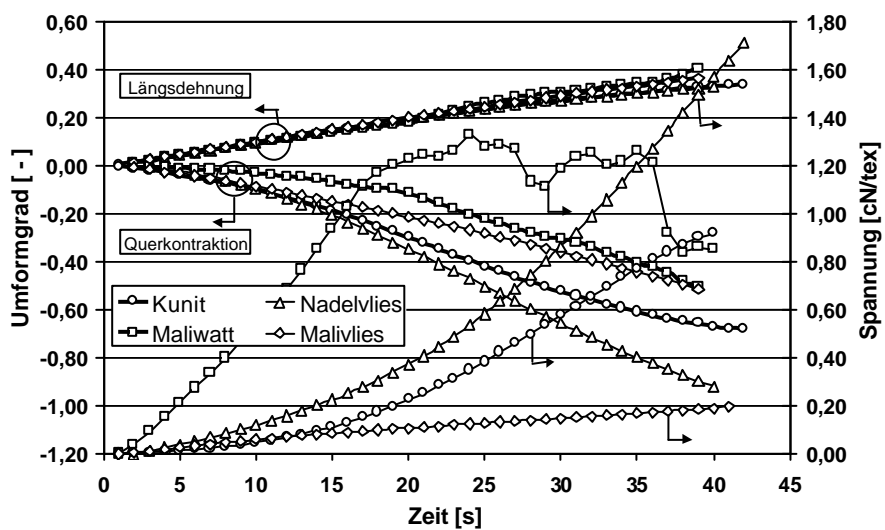


Abb. 47: Grauwertkorrelation - Einfluss der Verfestigungstechnologie auf die Querkontraktion

Die Spannungskurve des Maliwatt-Vliesstoffes spiegelt den Versagensmechanismus des Vliesstoffes wider. Die hohe Steifigkeit des Vliesstoffes durch die in Zugrichtung liegenden Nähfäden führt zu einem steilen Spannungsanstieg. Bei 20 s steigt die Spannung trotz fortschreitender Dehnung nicht weiter an. Mit zunehmender Dehnung reißt der erste Nähfaden, verbunden mit einem Abfall der Spannung. Mit fortschreitender Dehnung baut sich die Spannung erneut auf, bis der nächste Faden seine Belastungsgrenze überschreitet und wiederum reißt.

Die geringe Spannung bei nach der Malivliestechnologie verfestigten Vliesstoff entspricht der in Prüfrichtung bereits im Kapitel 5.2 ermittelten geringen Festigkeit. Die bis 40 s stetig fallende Kurve der Querkontraktion zeigt, dass die Grenze des Umformvermögens dieses Vliesstoffes wesentlich über der in dieser Versuchsanordnung erreichbaren Dehnung liegt.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Verfestigungstechnologie den deutlichsten Einfluss auf das Verformungsverhalten von Naturfaser-Thermoplast-Vliesstoffen ausübt.

8.3.2.5 Ergebnis

Die Grauwertkorrelationsanalyse ist sehr gut geeignet zur berührungslosen Bestimmung der Querkontraktion im Streifenzugversuch. Die geringe Abweichung der Ergebnisse mehrerer Versuchswiederholungen zeigt, dass nur eine minimale Streuung der Messwerte auftritt. Die beobachteten Verformungen liegen im Bereich deutlich unterhalb der beginnenden Schädigung. Für diesen Bereich haben die Herstellungsparameter keinen relevanten Einfluss auf das Verformungsverhalten. Lediglich durch die Wahl der Verfestigungstechnologie kann die Verformung variiert werden.

Die Umformeigenschaften von Vliesstoffen werden nicht nur durch das Verformungsverhalten sondern ebenso durch die Steifigkeit, also den Widerstand des Vliesstoffes gegen Verformung, determiniert. Und im Gegensatz zum Verformungsverhalten kann die Steifigkeit durch die Wahl unterschiedlicher Herstellungsparameter in einem großen Bereich verändert werden.

Für eine Modellierung bzw. Simulation des Umformvorganges bedeutet dies, dass die Verfestigungsparameter von Nadelvliesstoffen lediglich bei der Angabe der Materialsteifigkeit berücksichtigt werden müssen. Die Querkontraktion hingegen kann bei gleicher Verfestigungstechnologie unabhängig von den Verfestigungsparametern angegeben werden.

Bei vielen Werkstoffen, insbesondere den Metallen, ist das Verhältnis von Längs- zu Querdehnung während der Verformung bis zum Ende der Gleichmaßdehnung konstant und wird mittels der werkstoffspezifischen Poissonzahl (Querkontraktionszahl) ν angegeben:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{e}_q}{\mathbf{e}_l} \quad (33)$$

Um entgegen dieser Definition den Umformgrad verwenden zu können, wird die Umformverhältniszahl ν_φ eingeführt:

$$\mathbf{n}_j = -\frac{\mathbf{j}_q}{\mathbf{j}_l} \quad (34)$$

Abb. 48 zeigt exemplarisch, dass ν_φ mit zunehmender Längsdehnung linear ansteigt. Die Regressionsanalyse bestätigt diesen Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von 99 %. Damit kann folgender Zusammenhang definiert werden:

$$\mathbf{n}_j = a \cdot \mathbf{j}_l \quad (35)$$

woraus sich mit (34) ergibt:

$$\mathbf{j}_q = -a \cdot \mathbf{j}_l^2 \quad (36)$$

Abb. 48 zeigt die sehr gute Übereinstimmung zwischen der berechneten Kurve der Querdehnung und den Messwerten. Die Verifikation dieses Zusammenhangs an allen durchgeführten Zugversuchen mittels Regressionsrechnung ergibt ein Bestimmtheitsmaß zwischen 0,95 und 0,99.

Durch die Einführung der Umformverhältniszahl ν_φ (Gleichung (36)) kann der Verlauf der

Querkontraktion über die Längsdehnung auf einfache Weise beschrieben werden. Bei der Anwendung einer numerischen Verformungssimulation kann damit auf die Anwendung umfangreicher Wertetabellen zur Beschreibung des Querkontraktionsverhaltens verzichtet werden.

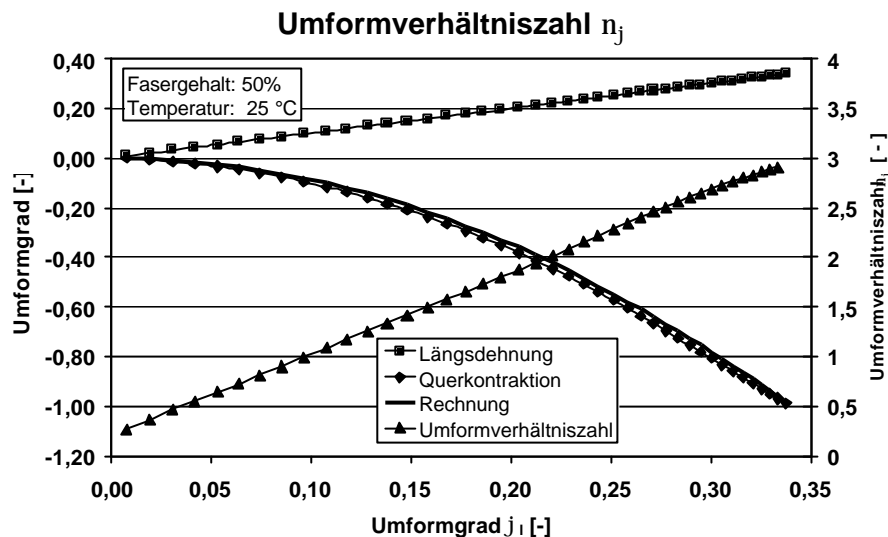


Abb. 48: Verhältnis von Längs- und Querdehnung

8.4 Photogrammetrie

8.4.1 Verfahrensprinzip

Die Durchführung der Photogrammetrie erfolgt durch die Aufnahme des zu vermessen- den Objektes aus verschiedenen Perspektiven (Abb. 49). Der bei der Aufnahme statt- findende Abbildungsvorgang lässt sich mathematisch als Zentralprojektion des Objekt- raumes auf die Filmebene beschreiben. Ist die Lage des Projektionszentrums, die Ka- merakonstante und die Verzeichnung des Objektivs (innere Orientierung) sowie Lage und Orientierung der Bildebene im Objektkoordinatensystem (äußere Orientierung) be- kannt, lässt sich nach dem Prinzip der Triangulation die räumliche Lage eines Objekt- punktes bestimmen [55].

Das für die Berechnung der Umformgrade verwendete Verfahren ist in [71] beschrie- ben. Durch Aufbringen definierter Rastergeometrien auf die vor der Umformung ebenen Halbzeugoberfläche sind die Ausgangskordinaten der Rasterkreuzungspunkte be- kannt. Nach Auswertung der Koordinaten der Kreuzungspunkte nach der Umformung

gemäß oben beschriebenem Verfahren, kann die Verformung in jedem Punkt beschrieben werden. Das exakte Vorgehen beschreibt [69]. Um dieses Verfahren für die optische Dehnungsmessung an flachfaserverstärktem Polypropylen nutzbar zu machen, musste eine Methode entwickelt werden, um ein auswertbares Messraster auf den Vliesstoff applizieren zu können.

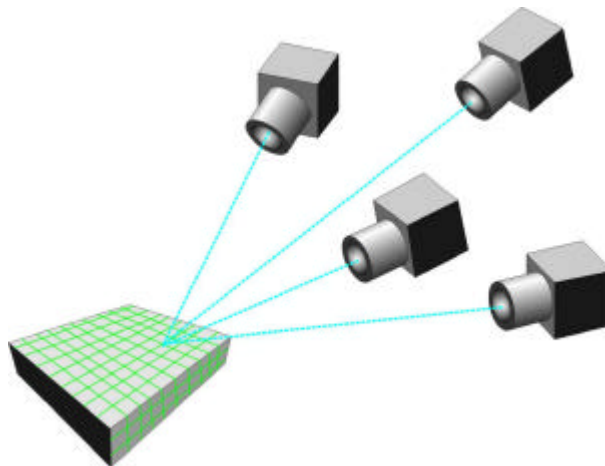


Abb. 49: Prinzip der Photogrammetrie

8.4.2 Applikation des Messrasters

Grundsätzlich können zur Verformungsmessung Kreis- und Quadratraster, sowie Kombinationen verwendet werden [55]. Idealerweise entstehen aus Kreisen Ellipsen und aus Quadraten Rechtecke bzw. Parallelogramme.

Das verwendete Messraster beeinflusst die Durchführbarkeit und Genauigkeit der Ermittlung des Umformgrades. Wesentliche Voraussetzung ist die gute Sichtbarkeit des Rasters nach der Umformung. Scharf kontrastierte und dünne Linien sind vorteilhaft für die Erkennung der Kreuzungspunkte. Zudem darf das Messraster das Umformverhalten des Werkstückes nicht oder nur in geringem Maße beeinflussen.

Die Umsetzung dieser Anforderungen stellt bei der Umformung von naturfaserverstärkten Thermoplasten ein wesentliches Problem dar. Eine direkte Applikation des Messrasters stellte sich nach ersten Vorversuchen als nicht geeignet heraus, da durch die Bewegung der Fasern gegeneinander das Messraster nahezu vollständig verschwindet. Zudem ist eine Vorkonsolidierung des Materials zu einer bedruckbaren Platte notwendig, was im Widerspruch steht zur realen Durchführung der Umformung.

Das Messraster muss daher auf eine Trägerfolie aufgebracht werden, welche im Temperaturbereich um den Schmelzpunkt des Polypropylen plastisch verformbar ist. Um die hohen Dehnungen des Vliesstoffes realistisch abbilden zu können, sind im Blasverfahren hergestellte Folien aufgrund ihrer hohen Verstreckung und der daraus resultierenden geringen Dehnbarkeit nicht verwendbar. Als geeignetes Trägermaterial erwies sich gegossene Polycarbonat (PC)-Folie, mit einer Dicke von 125 μm . PC besitzt eine amorphe Gefügestruktur sowie eine hohe Glasübergangstemperatur T_g von 145 $^\circ\text{C}$, bei T_g geht der E-Modul des PC gegen Null [24]. Durch die fehlende Eigensteifigkeit ist gesichert, dass das Umformverhalten nicht durch die PC-Folie beeinflusst wird. Auf die geschwärzte Folie wird das Messraster mit einer Linienstärke von 0,5 mm und einem Linienabstand von 5 mm im Siebdruckverfahren aufgebracht (Abb. 50).

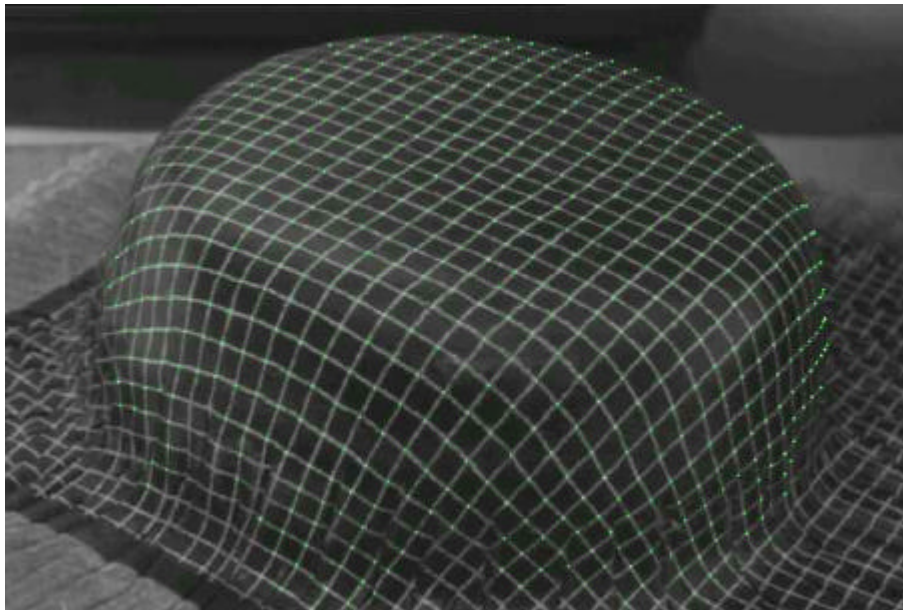


Abb. 50: Linienraster auf umgeformtem Probebauteil

Die Haftung der PC-Folie auf dem Naturfaser-Polypropylen-Vliesstoff ist gut bis sehr gut, ein Schlupf zwischen Folie und Vliesstoff konnte nicht festgestellt werden. Wie in Abb. 50 zu erkennen ist, sind die Linien auch nach dem Umformvorgang kontrastreich scharf erhalten. Damit sind die Voraussetzungen für eine hohe Sicherheit bei der Punkterkennung gegeben.

8.4.3 Versuchsaufbau

Zur Beobachtung des Umformverhaltens der Flachs-Polypropylen-Vliesstoffe wurde ein einfacher Tiefziehversuch durchgeführt (Abb. 51). Die Umformeinrichtung wurde in einer Zug-/Druckprüfmaschine installiert, welche den Umformweg und die auftretenden Verformungskräfte protokollierte. Zudem konnte die Verfahrensgeschwindigkeit präzise vorgegeben werden. Die auf den Niederhalter wirkende Kraft F_2 wird pneumatisch über 4 Zylinder aufgebracht.

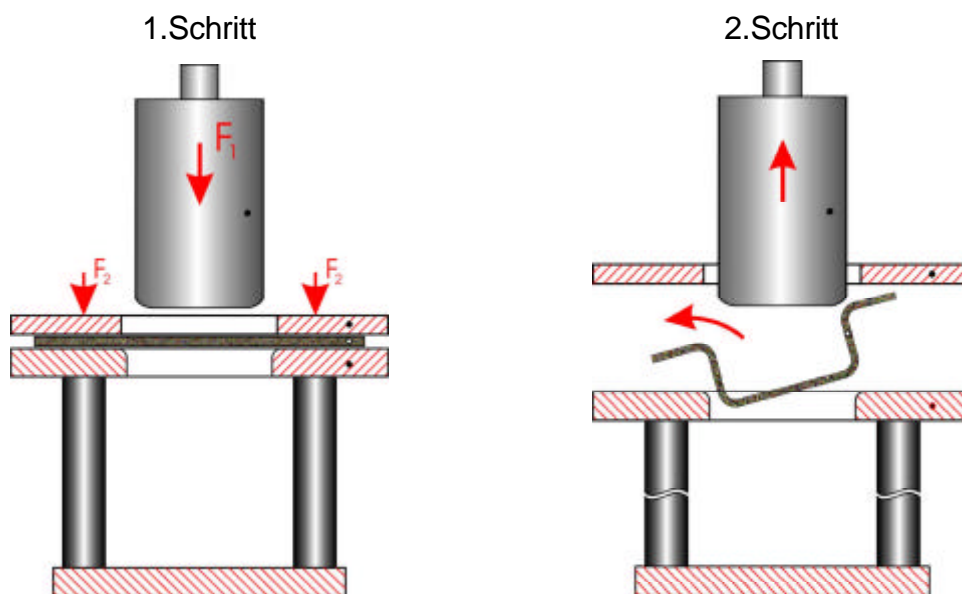


Abb. 51: Prinzip des Umformversuches

8.4.4 Auswertung

Die Auswertung erfolgte gemäß dem oben beschriebenen Verfahrensprinzip mittels der Software Autogrid. Neben dem Übersichtsbild des Dehnungsfeldes über der vermessenen Probe in Falschfarbendarstellung ist die Software in der Lage über eine Linienvorfölgungsfunktion den Verlauf der Dehnungen entlang einer beliebig wählbaren Linie auszugeben. Start- und Endpunkt der Linie sind frei wählbar, die Dehnungswerte werden von den benachbarten Gitterkreuzungspunkten interpoliert (Annahme eines stetigen Dehnungsfeldes). Abb. 52 zeigt exemplarisch die grafische Ausgabe der Dehnungsmessung. Die Abbildung zeigt den maximalen Umformgrad in den Gitterkreuzungspunkten, wobei die Farbe den Betrag des Umformgrades repräsentiert und die in den Kreuzungspunkten dargestellten Vektoren die Richtung im Raum. Anfang und Ende der aus-

gewerteten Linien sind über die symbolischen Stecknadeln gekennzeichnet. Sowohl das Gitterraster als auch die betrachteten Linien sind in Längs- bzw. Querrichtung des Vliesstoffes orientiert.

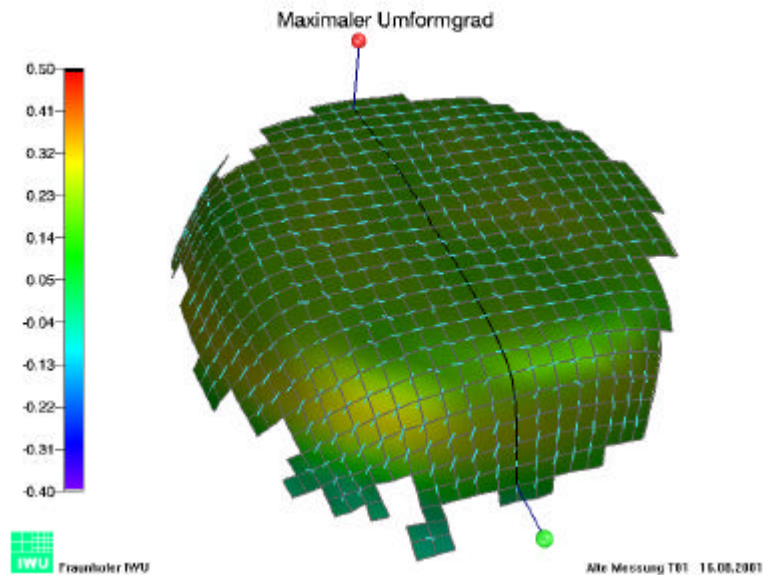


Abb. 52: Auswertung der photogrammetrischen Dehnungsmessung

8.4.5 Bestimmung des Umformverhaltens

8.4.5.1 Fasergehalt

Aus der photogrammetrischen Auswertung der Tiefziehversuche ergab sich eine mit zunehmendem Fasergehalt deutlich abnehmende Dehnung des Vliesstoffes nach der Verformung (Abb. 53). Dargestellt ist der Vergleichsumformgrad der Proben, die Richtung der ausgewerteten Linie ist quer zur Produktionsrichtung des Vliesstoffes. Der mittlere gemessene Vergleichsumformgrad bewegt sich zwischen 0,15 bei 70 % Flachsfasergehalt und 0,7 bei 30 %.

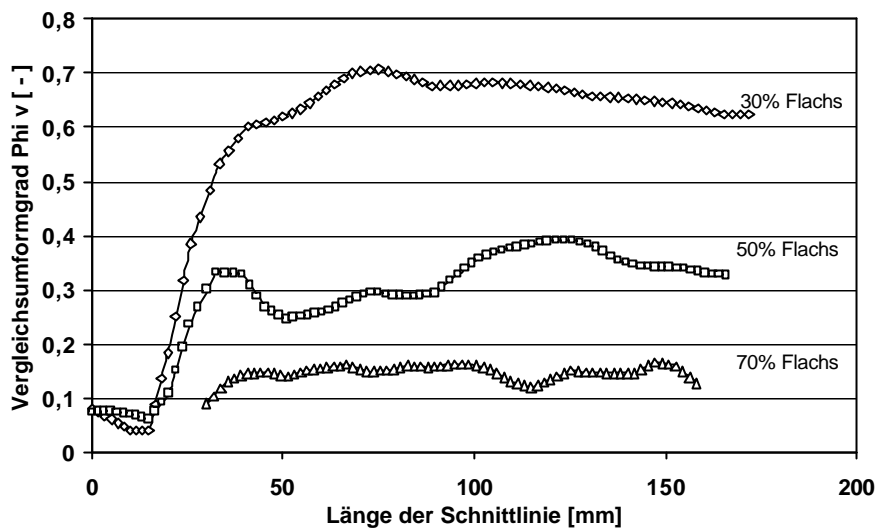


Abb. 53: Umformgrad als Funktion des Fasergehaltes

Die Auswertung der Kraft-Weg-Diagramme (Abb. 54) bestätigt die Beobachtungen. Bei der Probe mit einem Flachsfasergehalt von 30 % trat der geringste Kraftanstieg auf. Da die Polypropylenfasern, welche bei Raumtemperatur die hohe Zugfestigkeit dieses Vliesstoffes begründen, aufgeschmolzen sind, kommt es zunächst zu einer großen lokalen Verformung. Anhand der Kraftkurve (Abb. 54) lässt sich kein deutlicher Übergang von Haft- in Gleitreibung erkennen.

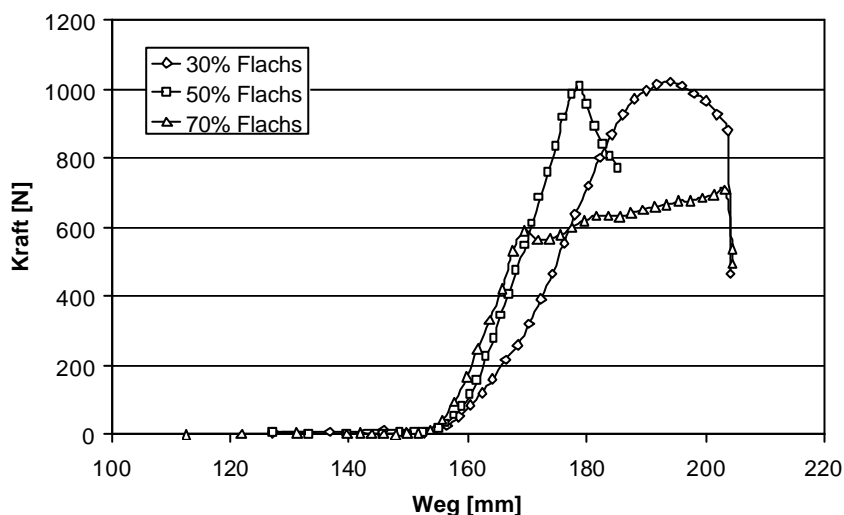


Abb. 54: Umformkraft bei unterschiedlichem Flachsfasergehalt

Bei den Proben mit 50 % und 70 % Flachsfasergehalt konnte ein schneller Anstieg der Umformkräfte zu Beginn der Umformung nachgewiesen werden. Durch die geringere Haftreibung des Vliesstoffes mit 70 % Flachsfasergehalt, setzt die Gleitreibung wesent-

lich früher ein, die Dehnung des Materials bleibt geringer. Dieses Ergebnis deckt sich mit denen aus der Untersuchung zur Reibung zwischen Vliesstoff und Werkzeug (Kapitel 7)

8.4.5.2 Einstichtiefe

Im Unterschied zu dem deutlichen Einfluss der Einstichtiefe auf die mechanischen Eigenschaften des Vliesstoffes kann in den Umformversuchen kein deutlicher Einfluss der Einstichtiefe nachgewiesen werden. Die Messwerte (Abb. 55) lassen keine systematischen Unterschiede erkennen, die Betrachtung des maximalen Umformgrades (ohne Abbildung) ergibt sogar einen einheitlichen Wert von 0,2. Die Ergebnisse der Dehnungsmessung setzen sich bei der Betrachtung der Umformkräfte (Abb. 56) fort. Für die Kraftmaxima konnten geringe Unterschiede ermittelt werden, der Verlauf des Kraftanstiegs ist identisch.

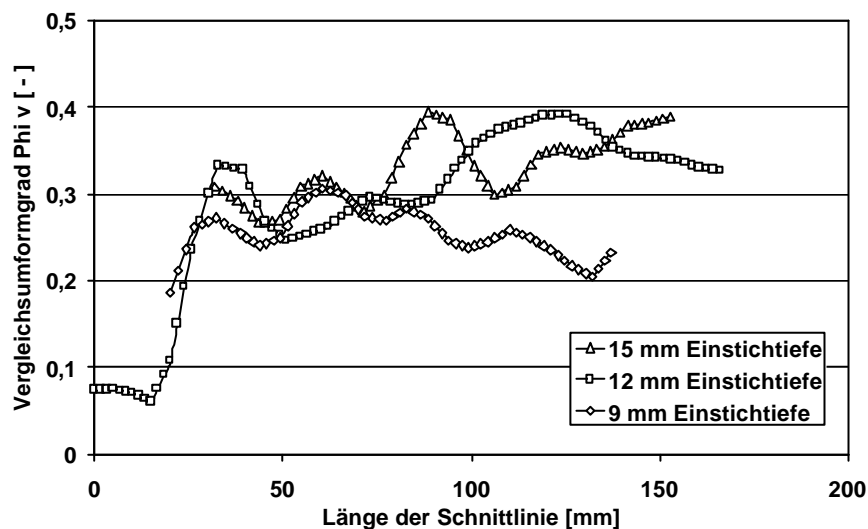


Abb. 55: Umformgrad als Funktion der Einstichtiefe

Dieses unerwartete Werkstoffverhalten liegt im komplexen Spannungszustand im Material während des Tiefziehvorganges begründet. Während in Zarge und Boden des tiefgezogenen Napfes in der Ebene der Bauteiloberfläche lediglich Zugspannungen auftreten, herrscht in der Ronde und am Einlauf in den Ziehring ein kombinierter Zug-/Druckspannungszustand. Somit sind für diesen Bereich, der wesentlich für die benötigte Presskraft verantwortlich ist, die Aussagen für das Verhalten des Vliesstoffes aus dem Streifenzugversuch nicht übertragbar.

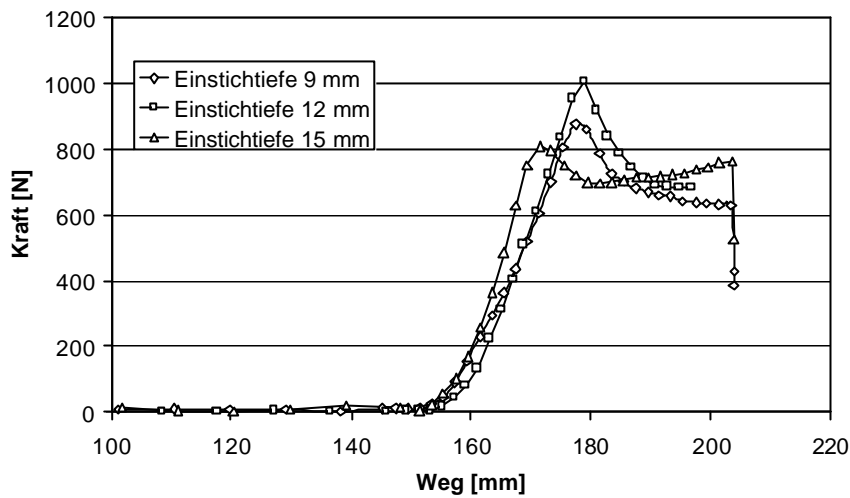


Abb. 56: Einfluss der Einstichtiefe auf die Umformkraft

8.4.5.3 Stichdichte

Ebenso wie die Einstichtiefe wurde auch für die Stichdichte eine sehr geringe Wirkung auf das Umformverhalten festgestellt (Abb. 57). Mit zunehmender Stichdichte ist infolge der höheren Verfestigung eine Abnahme der erreichten Materialdehnung verbunden. Die Dehnungen des Vliesstoffes sind mit zunehmender Stichdichte homogener über die Bauteilgeometrie verteilt.

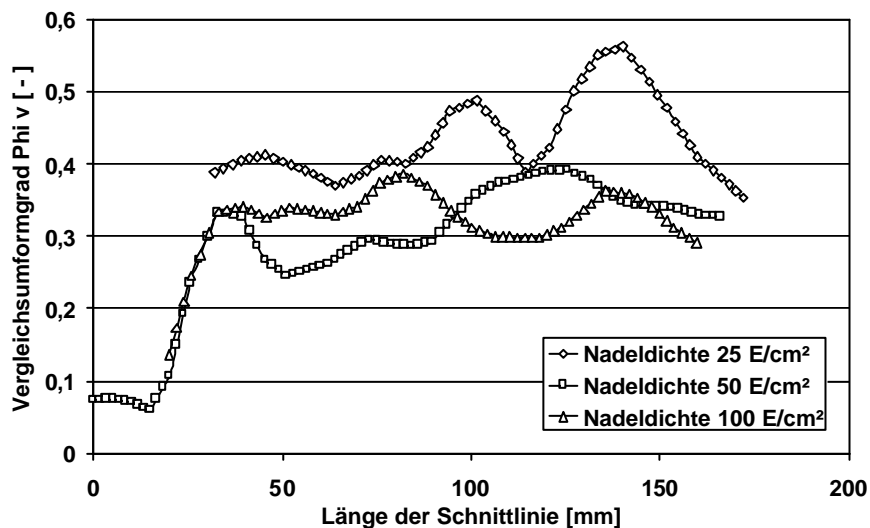


Abb. 57: Umformgrad als Funktion der Stichdichte

Die Analyse der Umformkräfte (Abb. 58) ergab keine signifikanten Auswirkungen der

Stichdichte. Die Kraft-Weg-Kurven liegen bei gleichem Flachsfasergehalt eng beieinander. Der Vliesstoff mit geringer Einstichdichte (25 E/cm²) zeigt keine ausgeprägte Kraftspitze vor dem Übergang zur Gleitreibung, da das gering verfestigte Material eine größere lokale Dehnung zulässt.

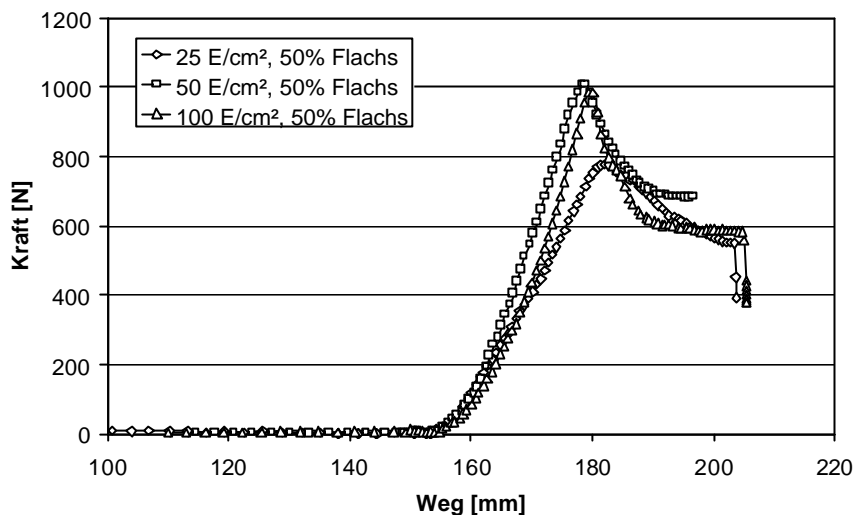


Abb. 58: Kraftverlauf in Abhängigkeit der Stichdichte

8.4.5.4 Niederhalterdruck

Der Einfluss des Niederhalterdruckes auf die Dehnung der umgeformten Bauteile stellt sich uneinheitlich dar (Abb. 59). Am Rand der Probe erzeugt ein geringerer Niederhalterdruck eine geringere Verformung des Vliesstoffes. Zur Mitte des Probeteils hin zeigt sich bei einem Niederhalterdruck von 4 bar ein überproportional großer Umformgrad. Es kann davon ausgegangen werden, dass in diesem Fall eine Materialinhomogenität vorliegt, z.B. eine lokal geringere Flächenmasse.

Die Umformkraft steigt mit zunehmendem Druck des Niederhalters (Abb. 60). Aus dem Hooke'schen Reibungsgesetz lässt sich bei Annahme gleicher Fläche des Zuschnittes die Beziehung ableiten

$$F_R \sim m \cdot p_N \quad (37)$$

damit ist

$$m \sim \frac{F_R}{P_N} \quad (38)$$

Analog den Reibungsuntersuchungen (Kapitel 7), sinkt der Reibungskoeffizient mit zunehmendem Druck des Niederhalters, welcher aus der steigenden Normalkraft resultiert.

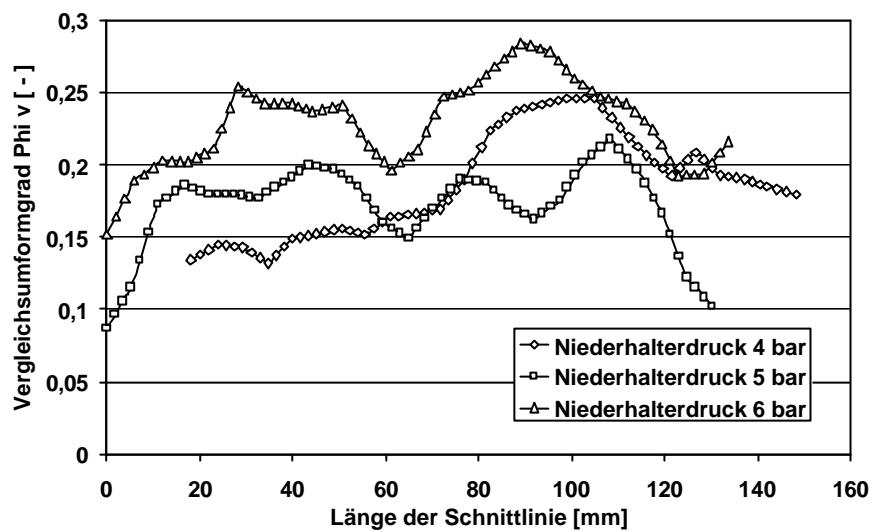


Abb. 59, Einfluss des Niederhalterdruckes

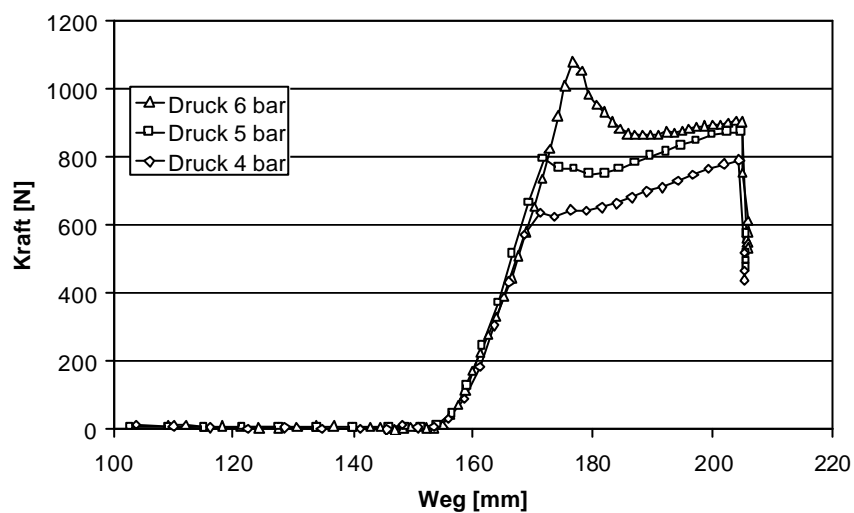


Abb. 60: Umformkraft in Abhängigkeit des Niederhalterdruckes

8.4.5.5 Ziehgeschwindigkeit

Die in den Reibungsversuchen (Kapitel 7) festgestellte Tendenz, dass mit zunehmender Relativgeschwindigkeit zwischen Vliesstoff und Werkzeug die Umformkraft zunimmt, wird durch den in Abb. 61 dargestellten Verlauf der Ziehkräfte für den Tiefziehversuch bestätigt.

Die daraus resultierenden Verformungsgrade lassen jedoch keine eindeutigen Aussage über den Einfluss der verschiedenen Ziehgeschwindigkeiten zu (Abb. 62). Das komplexe Verformungsverhalten der Tiefziehversuches ist gekennzeichnet durch die Überlagerung von Dehnung durch Zugspannungen in radialer Richtung und Stauchung durch Druckspannungen in tangentialer Richtung. Durch die Verformung des Vliesstoffes weicht die Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Vliesstoffzuschnitt von der Vorschubgeschwindigkeit des Stempels ab (im Gegensatz zu den Reibungsversuchen).

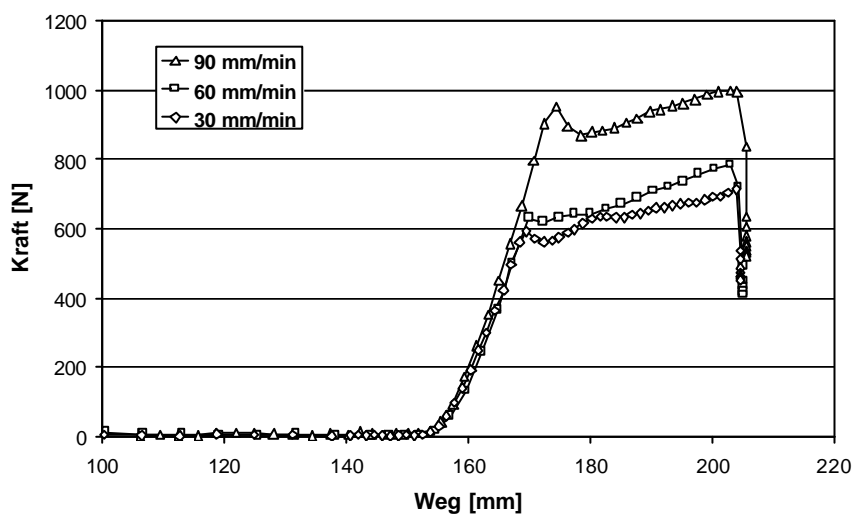


Abb. 61: Umformkraft als Funktion der Umformgeschwindigkeit

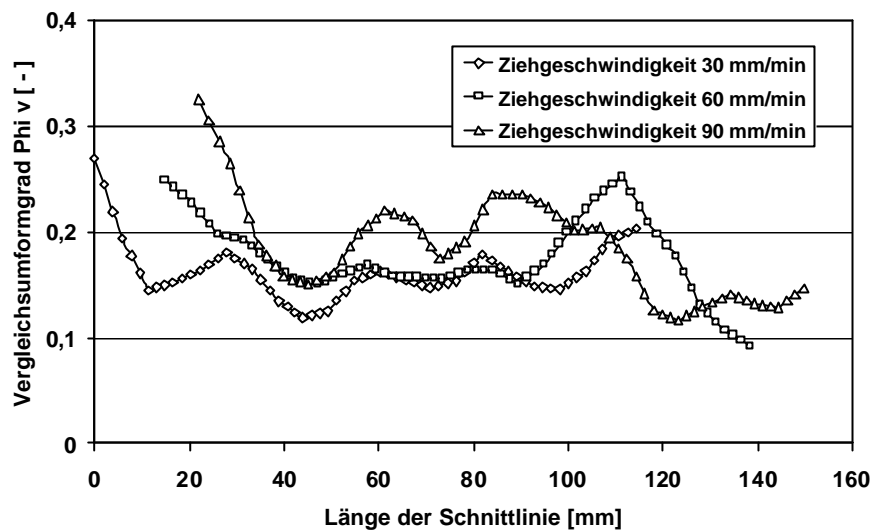


Abb. 62: Einfluss der Ziehgeschwindigkeit auf den Vergleichsumformgrad

8.4.5.6 Verfestigungstechnologie

Die untersuchten Verfestigungstechnologien sind gekennzeichnet durch ein individuell sehr verschiedenes Umformverhalten. Analog dem Streifenzugversuch (Kapitel 8.3.2.4) zeigt Abb. 63 das unterschiedliche Dehnungsverhalten in Folge der eingesetzten Verfestigungstechnologie. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass trotz der sehr unterschiedlichen Dehnungen der Kraftbedarf sowie der Kraftverlauf mit Ausnahme des Kunitvliesstoffes nahezu identisch sind.

Die Untersuchungen machen deutlich, dass die Wahl der Verfestigungstechnologie nach dem Fasergehalt der wesentlichste Einflussfaktor für das Umformverhalten ist. Die Variationsbreite der auftretenden Umformgrade reicht von durchschnittlich 0,15 bis 0,55 (Dehnung von 17 % bis 70 %). Bei einer Dehnung von 17 % ist der Maliwattvliesstoff bereits fast an der Grenze der Dehnfähigkeit angelangt, wo hingegen der Kunitvliesstoff noch deutliche Dehnungsreserven besitzt. Dies ist dann relevant, wenn die Geometrie des Bauteil eine hohe lokale Dehnung gegen Ende der Umformung erfordert, wenn kaum noch Material aus den Randbereichen nachgeführt werden kann.

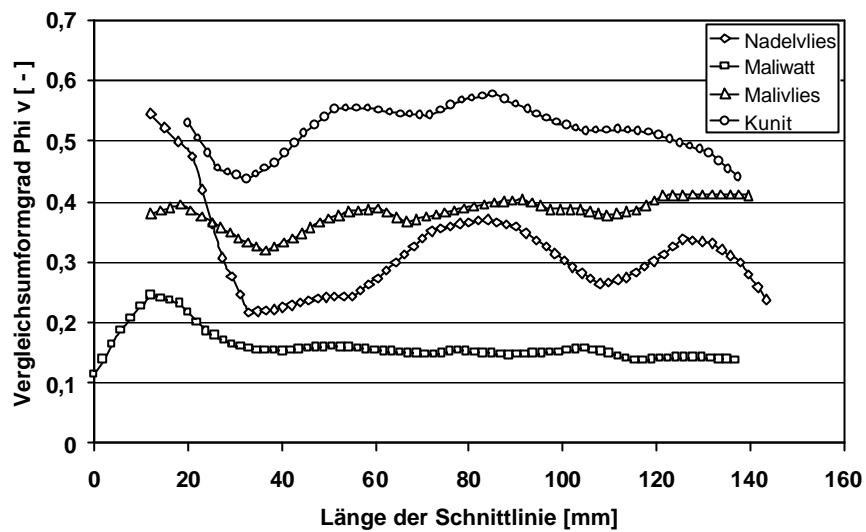


Abb. 63: Einfluss der Verfestigungstechnologie auf den Vergleichsumformgrad

Die erforderliche Umformkraft liegt für Nadelvliesstoffe sowie die Maliwatt- und Malivlieserzeugnisse in vergleichbaren Größenordnungen, während der Kunitvliesstoff in Vergleich lediglich 50 % der Umformkraft benötigt. Diese bestätigt wiederum die hervorragende Eignung dieser Vliesstoffvariante für Bauteile, welche große Umformgrade der Materials erfordern.

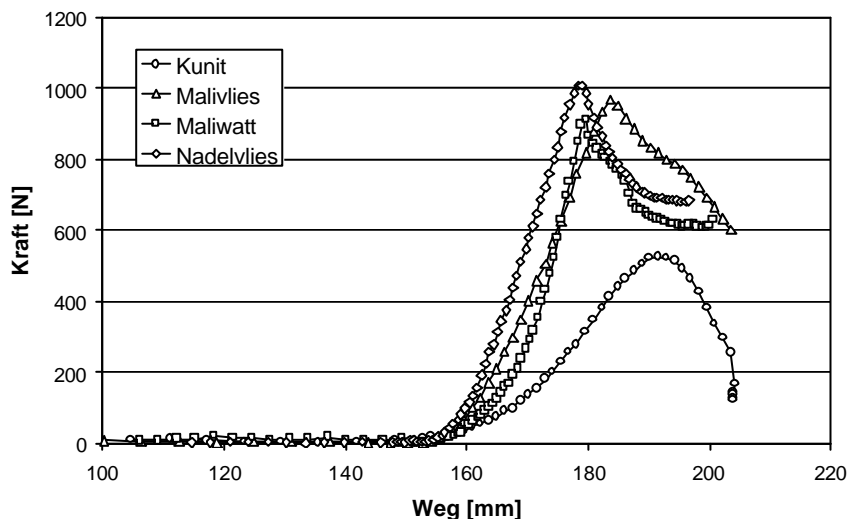


Abb. 64: Einfluss der Verfestigungstechnologie auf die Umformkraft

8.4.5.7 Ergebnis

Die Umformung im oben beschriebenen Napftiefziehversuch stellt ein komplexes dreidimensionales Verformungskollektiv dar. Damit geht diese Versuchsanordnung über den mittels Grauwertkorrelation ermittelten ebenen Verformungszustand hinaus. Die

Möglichkeit der Analyse unabhängig von der Umformeinrichtung ermöglicht optimale Ausrichtung und Beleuchtung der Proben. Damit kann auch bei dreidimensional stark gekrümmten Proben ein großes Dehnungsfeld ausgewertet werden. Zusätzlich können durch die Linienverfolgung neben den qualitativen Aussagen über das gesamte Dehnungsfeld gezielt kritische Bereiche betrachtet und an unterschiedlichen Bauteilen verglichen werden.

Die Ergebnisse zeigen mit steigendem Flachfasergehalt einen abnehmenden Verformungsgrad. Dies bestätigt die Ergebnisse aus der Prüfung der ebenen Bauteile, die mit steigendem Flachfasergehalt eine steigende Werkstoffsteifigkeit ergaben. Die Verfestigungsintensität, also das Zusammenwirken aus Stichdichte und Einstichtiefe, beeinflusst das Verformungsfeld nur gering. Deutlich ist hingegen der Einfluss des Niederhalterdruckes. Das in den Reibungsuntersuchungen ermittelte Werkstoffverhalten des Rückganges der Reibungszahl mit steigender Flächenpressung zeigt sich im Tiefziehversuch ebenso deutlich. Entsprechend dem visko-elastischen Werkstoffverhalten nimmt mit steigender Umformgeschwindigkeit die Rückhaltekraft zu, was wiederum zu größeren Materialdehnungen führt. Ebenso steigen die erforderlichen Umformkräfte mit der Geschwindigkeit an. Abschließend demonstrieren die Ergebnisse des Vergleichs der nach unterschiedlichen Technologien verfestigten Vliesstoffe die Vielseitigkeit dieser Halbzeuggattung. Sowohl die Dehnung wie auch die erforderlichen Umformkräfte zeigen spezifische Besonderheiten der Verfestigungstechnologien und bestätigen die Ergebnisse der Grauwertkorrelationsanalyse im einfachen Streifenzugversuch

9 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass Flachsfasern in speziellen wie Naturfasern im Allgemeinen eine sinnvolle Ergänzung etablierter synthetischer Verstärkungsfasern darstellen. Die Bestimmung der Festigkeit der verwendeten Flachsfasern vor der Verarbeitung ist notwendig, da die Literatur- und Herstellerangaben in bezug auf die Angabe der Prüfbedingungen in der Regel lückenhaft sind. Allein durch die Verkürzung der Einspannlänge der Faserprobe während der Prüfung kann die Festigkeitsangabe verdoppelt werden. Ein weiterer Haupteinflussfaktor auf die Festigkeit der Flachsfaser ist die mechanische Beanspruchung der Faser während der Gewinnung und dem Faseraufschluss. Abschließend macht auch die Tatsache, dass dem Naturprodukt Flachsfaser eine große Streuung der Eigenschaften inhärent ist, die Angabe der Prüfbedingungen bzw. eine eigene Wareneingangsprüfung notwendig. Die Eigenschaften der Flachsfaser, insbesondere die Festigkeit und die Feinheit beeinflussen unmittelbar die Festigkeit und damit das Umformverhalten des Vliesstoffes sowie die Eigenschaften des resultierenden Bauteils. Für eine hohe Vliesfestigkeit sind grobe Fasern mit geringer Schädigung durch den Aufschluss zu wählen, zur Maximierung der Verbundfestigkeit ist ein Kompromiss zwischen Flachsfaserfeinheit und Festigkeit zu finden.

Ziel der Verwendung zweier unterschiedlicher PP-Sorten war die Quantifizierung der Auswirkung von Haftvermittlerzugabe. Messung der Faserfestigkeit sowie rheometrische Untersuchungen führten zu dem Schluss, dass zwei prinzipiell verschiedene Polypropylenarten vorlagen, sodass über den Haftvermittlergehalt hinaus die PP-Fasereigenschaften Feinheit, Festigkeit und Oberflächenbeschaffenheit für die ermittelten Unterschiede der Vliesstoff- und Bauteileigenschaften verantwortlich sind.

Die Auswirkung der Verwendung unterschiedlicher PP-Fasern zeigt sich am deutlichsten bei der Untersuchung der Vliesstoffeigenschaften. Durch die höhere Festigkeit und Beschaffenheit der Faser FV 10 DO besitzen die damit hergestellten Vliesstoffe eine

durchschnittlich fünfundzwanzig Prozent höhere Zugfestigkeit. Die Eigenschaften der PP-Fasern bestimmt damit wesentlich die Verarbeitungs-, nicht jedoch die Verbundeigenschaften.

Die kaum feststellbare Verbesserung der Verbundeigenschaften ist das auf den zu geringen Haftvermittlergehalt zurückzuführen. In [1] wird eine optimale Haftvermittlerkonzentration für den Spritzguss von größer gleich zwei Prozent angegeben. Im Kompoundier- und Spritzgießprozess liegen im Vergleich zu Pressen oder Tiefziehen wesentlich günstigere Bedingungen vor, unter denen der Haftvermittler mit der Flachsfaser reagieren kann. Mit dem Abschluss der Arbeit liegt eine neue Versuchsfasersorte mit zehn Prozent MAH-Gehalt vor, welche den Anforderungen der Presstechnologie erheblich mehr entspricht.

Nach der Auswahl der Fasersorten ist die Art der Verfestigungstechnologie von zentraler Bedeutung. Die Verfahren Kunit, Maliwatt, Malivlies und die Nadeltechnologie führen zu grundsätzlich unterschiedlichen Vliesstoff- und damit Verarbeitungseigenschaften. Die Bauteileigenschaften können von der Verfestigungstechnologie jedoch kaum beeinflusst werden. Dennoch ist die Anwendung einer anderen als der Nadeltechnologie, da diese in bezug auf Vliesfestigkeit und –dehnung in einem sehr breiten Spektrum durch unterschiedliche Herstellungsparameter variiert werden können, so dass nur bei sehr hohen Festigkeitsanforderungen ein Maliwatt-Vliesstoff oder Forderung großer Dehnfähigkeit ein Kunit-Vliesstoff in Betracht gezogen werden sollten. Die Nadeltechnologie ist den anderen Verfahren in den Punkten Produktivität und Prozesssicherheit ebenso voraus, wie bei der Herstellung von Vliesstoffen mit hoher Flächenmasse und hohem Flachsfasergehalt. Aus diesem Grund wurden auch nur für die Vernadelungstechnologie die Auswirkungen verschiedener Prozessparameter untersucht.

Eine Erhöhung der zur Vernadelungsintensität zusammengefassten Parameter Stichdichte und Einstichtiefe führt zu einer verstärkten Umorientierung der Fasern in Dickenrichtung des Vliesstoffes. Daher sinkt die Festigkeit des resultierenden Bauteils. Im Vliesstoff hingegen steigt die Festigkeit mit zunehmender Vernadelungsintensität. Zur Herstellung von Bauteilen mit hohen Anforderungen an Festigkeit und Steifigkeit sollten daher nur gering verfestigte Vliesstoffe eingesetzt werden. Hier sind der mechanischen

Verfestigung Grenzen gesetzt, welche nur durch den Wechsel der Technologie, z.B. zu einer thermischen Verfestigung, umgangen werden kann.

Auf die Festigkeit des Vliesstoffes wirkt sich ein hoher Flachsfasergehalt negativ aus, da die Faser-Faser-Reibung von Flachs geringer ist als die der PP-Fasern. Eventuell auftretende Probleme bei der Umformung durch die geringe Zugfestigkeit der Flachs-PP-Halbzeuge mit hohem Flachsfaseranteil können durch eine intensive Vernadelung ausgeglichen werden.

Für die Einflüsse aller untersuchter Prozessparameter konnten Regressionsgleichungen polynomialer Form aufgestellt werden, welche die erzielten Messwerte repräsentieren. Innerhalb der gewählten Schranken können die Vliesstoff- und Bauteileigenschaften mit sehr guter Näherung berechnet werden. Die Gleichungen sind vergleichsweise einfach handhabbar und die Koeffizienten sind mit Zug- und Biegeversuch bei geringem Probenaufwand auf andere Fasersorten übertragbar. Diese phänomenologische Herangehensweise führt im Vergleich mit Methoden, welche mit den Eigenschaften der Einzelkomponenten arbeiten, mit wesentlich geringerem Aufwand zu differenzierten Ergebnissen. Dem Anwender stehen somit Grundlagen zur Werkstoffauslegung sowohl in Hinblick auf den Verarbeitungsprozess wie auch die geforderten Bauteileigenschaften zur Verfügung.

Die Prozessführung der Verarbeitung von Flachsfaser-Polypropylen-Verbundwerkstoffen muss auf die begrenzte Temperaturfestigkeit der Flachsfaser abgestimmt sein. Die Pressversuche im Ein- und im Zwei-Stufen-Verfahren differenzieren die bereits bei der Untersuchung der thermischen Belastbarkeit der Fasern gewonnenen Ergebnisse. Eine Verarbeitung von Flachs- und PP-Fasern ist auch über die in der TG bestimmten Grenzen hinaus möglich und bis zu einem gewissen Grad den mechanischen Eigenschaften förderlich, wenn kurze Verweilzeiten realisiert werden. Dies ist nur in einem Zwei-Stufen-Prozess möglich, bei dem Erwärmung und Formgebung getrennt erfolgen. Zur Maximierung ist ein gesteuerter Pressablauf notwendig. Die Aufbringung des gewünschten Pressdruckes sollte nicht unmittelbar erfolgen, sondern erst nach dem Aufschmelzen des Matrixmaterials. Damit kann eine Schädigung der Fasern durch hohe Druckspannungen in den Faserberührungspunkten wirksam verhindert werden.

Wenn für den Pressvorgang ein reibungsbasiertes Rückhaltesystem verwendet wird, ist die sich in der Kontaktfläche zwischen temperiertem Werkzeug und aufgeheiztem Vliesstoff einstellende Temperatur der wesentliche Faktor zur Bestimmung der resultierenden Rückhaltekraft. Aus dem sprunghaften Anstieg der Reibung im Temperaturbereich zwischen 120 °C und 130 °C sind zwei Folgerungen möglich. Einerseits ist das Durchfahren dieses Temperaturbereichs während der Umformung zu Vermeiden, da anderenfalls die Rückhaltekräfte nicht definiert aufgebracht werden können. Andererseits ist es im genannten Bereich möglich, mit minimaler Normalkraft eine hohe Rückhaltekraft zu erzielen. Da in diesem Falle aber die Temperatur auf ein Grad genau geregelt werden müsste, ist die Nutzung dieses Effektes in der Praxis kaum durchführbar.

Mit der Grauwertkorrelationsanalyse und der Photogrammetrie wurden zwei Verfahren zur optischen Messung des Verformungsverhaltens von Flachs-PP-Vliesstoffen eingesetzt. Beide Verfahren benötigen spezielle Vorbereitungen, bieten spezifische Vorteile und besitzen klare Einsatzgrenzen. Die Grauwertkorrelation wurde in der Konfiguration als 2D-Messsystem eingesetzt. Für die Analyse komplexer Geometrien stehen auch Systeme zur Analyse dreidimensionaler Körper zur Verfügung. Die Beschaffenheit der untersuchten Vliesstoffe ist ideal für die Grauwertkorrelation geeignet, die Grauwertmustererkennung auch bei großen Verzerrungen ist fehlerarm möglich. Zur Werkstoffcharakterisierung ist dieses Online-Verfahren sehr gut geeignet, da alle Zwischenstufen der Umformung bis zur endgültigen Geometrie in einem einzigen Versuch erfasst werden. Für praktische Anwendungen ist dieses System aus dem gleichen Grunde nicht geeignet, da reale Umformprozesse in der Regel nicht online beobachtet werden können. Die Bestimmung der Querkontraktion von Vliesstoffstreifen im Zugversuch ergab einen quadratischen Anstieg der Kontraktion in Probenquerrichtung während der Längsdehnung. Zur Beschreibung dieses Zusammenhanges wurde die Umformverhältniszahl v_{φ} eingeführt. Die Regressionsanalyse bestätigte die Gültigkeit der Definition der Umformverhältniszahl.

Für die Photogrammetrie ist ein geometrisches Muster auf das Bauteil aufzubringen, welches die Verzerrungen des Materials abbildet. Das Verfahren bildet die optimale Ergänzung zur Grauwertkorrelation, da die Untersuchungen in realen Prozessen erfolgen können und die Auswertung des Dehnungsfeldes nach der Entnahme des Bauteils

aus dem Prozess möglich ist. Damit ist die Photogrammetrie das geeignete Verfahren zur Prozesseinrichtung und zur Durchführung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung.

Beide Messverfahren dokumentieren, dass das Umformverhalten von Flachs-PP-Vliesstoffen nur durch die Wahl unterschiedlicher Verfestigungstechnologien zu beeinflussen ist. Die untersuchten Nadelvliesstoffe zeigten ausschließlich Unterschiede bei den benötigten Umformkräften, nicht jedoch im Verlauf von Längsdehnung und Querkontraktion.

10 Zusammenfassung

Schwerpunkt der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen war die Bestimmung des Einflusses wesentlicher Prozessparameter der Herstellung von Flachs-Polypropylen-Vliesstoffen auf Verarbeitung und Eigenschaften dieser Vliesstoffe und daraus hergestellter Bauteile. Als relevante Einflussgrößen wurden Flachsfasergehalt, Flächenmasse, Stichdichte, Einstichtiefe, Flachsfaserfeinheit, PP-Sorte, Haftvermittlerzugabe und die Technologie der Vliesverfestigung variiert. Die ermittelten Abhängigkeiten wurden statistisch mittels Regressionsanalyse ausgewertet.

Zur Absicherung der Untersuchungen wurden die Eigenschaften der Ausgangswerkstoffe Flachs und Polypropylen bestimmt. Bei der Untersuchung der Eigenschaften der Flachsfaser wurde insbesondere der Einfluss der Einspannlänge bei der Prüfung bestimmt. Aus der Extrapolation der Messwerte kann die theoretische Faserfestigkeit beim Einsatz in einem Verbundwerkstoff ermittelt werden. Die Untersuchung der thermischen Eigenschaften der Fasern diente der Festlegung von Randbedingungen für den Verarbeitungsprozess hinsichtlich Verarbeitungstemperatur und Expositionsdauer. Die Verarbeitungseigenschaften der Polypropylenfasern wurden mittels DSC und Rheometrie charakterisiert.

Die Auswirkungen der Variation der Herstellungsparameter auf den Vliesstoff wurden in einem Streifenzugversuch analysiert. Ein steigender Anteil von Flachsfasern im Vliesstoff führt zu sinkender Festigkeit auf Grund der geringeren Faser-Faser-Reibung zwischen Flachsfasern. Für die Flächenmasse zeigt sich bei 800 g/m² ein Maximum der Reißfestigkeit, welches durch das Zusammenwirken der bei der Vernadelung entstehenden Faserpfropfen und der Dicke des Vliesstoffes hervorgerufen wird. Die Verfestigungsparameter beim Vernadeln, Stichdichte und Einstichtiefe, zeigen eine deutliche Abhängigkeit voneinander. Es zeigt sich, dass bei geringer Stichdichte eine steigende Einstichtiefe die Festigkeit des Vliesstoffes erhöht, bei hoher Stichdichte jedoch festigkeitsmindernd wirkt. Die Feinheit der Flachsfaser wirkt auf die Vliesfestigkeit in zwei

verschiedene Richtungen. Ein sinkender Fasertiter, also dünnere Fasern, steigern die Festigkeit von Vliesstoffen. Da bei Naturfasern feinere Faser aber durch erhöhte mechanischen Beanspruchung im Faseraufschluss erreicht werden, sinkt deren Festigkeit und damit auch die Festigkeit des Vliesstoffes. Zur Bewertung der intensiv untersuchten Nadeltechnologie wurden vergleichende Untersuchungen an Malivlies-, Maliwatt- und Kunit-Vliesstoffen durchgeführt. Diese teilweise grundlegend verschiedenen Vliesstoffkonstruktionen deuten mit ihrem erheblich voneinander abweichenden Kraft-Dehnungsverhalten die große Bandbreite an realisierbaren Eigenschaften an. Die Abbildung der Vliesstoffeigenschaften über ein statistisches Modell mit polynomialen Gleichungsansätzen ergab für die verschiedenen Faktoren eine gute bis befriedigende Übereinstimmung.

Bei der Verarbeitung von naturfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen beeinflussen die Parameter Druck, Temperatur und Expositionszeit die mechanischen Eigenschaften des resultierenden Bauteils. Da sowohl die Naturfaser wie auch die Polypropylenmatrix bei Temperaturen über 200 °C zum oxidativen Abbau neigen, muss bei höheren Verarbeitungstemperaturen eine möglichst kurze Verarbeitungszeit realisiert werden. Der Pressdruck hat zwei gegenläufige Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils: Ein hoher Pressdruck zu Beginn des Aufschmelzvorganges schädigt die Fasern, da es in den Faserberührungspunkten zu Kraftspitzen kommt. Wenn das Matrixmaterial aufgeschmolzen ist, bildet sich ein homogenes Druckfeld über die gesamte Geometrie auf, wodurch die Benetzung der Fasern und damit die mechanischen Eigenschaften verbessert werden. Bei der Verarbeitung ist daher auf ein geeignetes Druckregime zu achten.

Die mechanischen Eigenschaften ebener Platten werden zum Einen von den Herstellungsparametern der Halbzeuge und zum Anderen von den Verfahrensparametern während des Pressprozesses bestimmt. Wie aus der Theorie der Faserverbundwerkstoffe zu erwarten ist, steigt mit zunehmendem Fasergehalt die Steifigkeit des Verbundes an. Im speziellen Fall der untersuchten Flachs-Polypropylen-Vliesstoffe ergab sich eine minimale Festigkeit bei einem Flachsfasergehalt von 50 %. Vergleichsuntersuchungen an Hanf-Polypropylen Vliesstoffen ergab eine stetige Zunahme der Festigkeit bei steigendem Hanffasergehalt. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Zunahme der mecha-

nischen Eigenschaften zwischen 30 % und 70 % linear steigend verläuft, also keine Einschränkungen aus dem hohen Fasergehalt resultieren. Die Vernadelungsparameter, welche im unverfestigten Vliesstoff die mechanischen Eigenschaften noch stark beeinflussen, haben auf die Bauteileigenschaften unter Zug- und Biegebeanspruchung keinen ausgeprägten Einfluss. Es zeigte sich, dass auch der im unverfestigten Vliesstoff sehr starke Einfluss der Verfestigungstechnologie im Bauteil nur noch in geringem Maße auftritt. Malivlies, Maliwatt und Nadelvliesstoff weisen vergleichbare mechanische Kennwerte auf, Kunit zeigt als längsorientierter Vliesstoff in Längsrichtung sehr gute, in Querrichtung die im Vergleich geringsten Werte.

Bei der Herstellung von Bauteilen aus Flachs-Polypropylen-Vliesstoffen im Tiefzieh- oder Pressverfahren mit einem reibungsbasierten Niederhaltersystem spielt die Kenntnis der Einflüsse von Fasergehalt, Kontaktflächentemperatur, Auszugsgeschwindigkeit und Flächenpressung eine wesentliche Rolle. Die Annahme eines visko-elastischen Stoffmodells nach *Maxwell* sowie die Aufteilung der Reibkraft in eine adhäsive und eine deformative Komponente konnte durch die praktischen Versuche bestätigt werden. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Härte der Polypropylenfasern, wodurch der deformative Anteil an der Reibkraft und damit auch der Reibwert sinkt. Der Bereich zwischen 120 °C und 130 °C ist gekennzeichnet durch den sprunghaften Anstieg des Reibwertes in Folge der auftretenden Adhäsion. Die Visko-Elastizität ist die Ursache für die Erhöhung der Reibkraft bzw. des Reibwertes bei einer höheren Auszugsgeschwindigkeit.

Die Charakterisierung des Umformverhaltens erfolgte durch zwei unterschiedliche optische Verfahren zur Dehnungsmessung, die Grauwertkorrelationsanalyse als Verfahren zur 2D-online Betrachtung von Umformvorgängen sowie die Photogrammetrie zur 3D-offline Auswertung des Dehnungsfeldes nach der Verformung. Mittels Grauwertkorrelation kann der Dehnungszustand während jedem Zeitpunkt der Umformung aufgenommen werden. Damit können Steigerungsversuche, die bei Naturmaterialien auf Grund der hohen Streuung der Eigenschaften ungeeignet sind, entfallen. Da aber der Umformvorgang sichtbar sein muss, kann das Verfahren bei realen Umformprozessen selten angewendet werden. Diese Lücke füllt die optische Dehnungsmessung mittels Photogrammetrie. Durch das definierte Ausgangsmuster ist eine Auswertung der Musterverzerrung nach der Umformung möglich, ohne den Umformvorgang an sich beobachtet

zu haben. Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise ist die Möglichkeit zur räumlichen Trennung von Umformversuch und Versuchsauswertung, der Aufbau einer Messeinrichtung an der Umformanlage ist nicht notwendig. Die beschriebenen Eigenschaften der beiden Messverfahren legt den jeweiligen Einsatzfall fest. Die Grauwertkorrelation ist sehr gut einsetzbar bei der Materialcharakterisierung im Labor, die Photogrammetrie bietet sich an zur Analyse und Optimierung realer Umformprozesse. Beide Methoden der Dehnungsanalyse haben sich in der Anwendung mit Flachsfaser-Polypropylen-Vliesstoffen bewährt.

11 Literatur

- 1 Aurich, T.: *Spritzgießen und resultierende Verbundeigenschaften von flachfaserverstärktem Polypropylen*,
Dissertation am IMK, TU Chemnitz, 2001
- 2 Avella M.; Bozzi C.; R dell Erba; Focher B.; Marzetti A.; Martuscelli E.: *Durch den Dampfexplosionsprozess erhaltene Weizenstrohfasern als Verstaerkungsmaterial fuer Verbundwerkstoffe auf Polypropylenbasis Charakterisierung und Eigenschaften*,
Die Angewandte Makromolekulare Chemie, Band 233 (1995), Heft Nov, Seite 149-166
- 3 Banke, K. H.: *Einsatz von Flachs in Technischen Textilien, Teilprojekt 3: Prototypen von mechanisch verfestigten Vliesstoffen aus mechanisch aufbereiteten Flachskurzfasern und deren wirtschaftlich und ökologisch effektiver Einsatz*,
Abschlußbericht Förderprojekt 0310049 A
- 4 Barndt, H. J.: *Effect of needle penetrations on needle punched nonwovens (Phase 2)*,
TAPPI Proceedings, 1991 nonwovens Conference, Marco Island, USA, 12-16 Mai, 1991, Seite 9-18
- 5 Bartsch, C.; Kromer, K.-H., Heier, L.: *Ernte von vorentholztem Leinstroh*,
VDI-MEG Kolloquium Agrartechnik "Erzeugung, Aufbereitung und Verarbeitung von Naturfasern für nichttextile Zwecke", 06./07. August 1997, Bonn
- 6 Biswas, A.: *Gewebeverstärkte Thermoplaste – Simulation des Umformvorganges*,
Tagungsband 17. Kunststofftechnisches Kolloquium des IKV, RWTH Aachen, 2.-4. Mar 1994, S. 330-336
- 7 Bledzki, A. K.; Gassan, J.: *Natürliche Verstärkungsfasern für Kunststoffe*,
Spektrum der Wissenschaft, 1996, Heft 2, Seite 96-98
- 8 Bledzki, A. K.; Reihmane, S.; Gassan, J.: *Properties and Modifikation methods for vegetable Fibers for natural fiber composites*,
Journal of Applied Polymer Science, Band 59 (1996), Heft 8
- 9 Bobeth, W.: *Textile Faserstoffe, Beschaffenheit und Eigenschaften*,
Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1993

- 10 Bohg, B.: *Naturfaserverstärkte Harze für Tür-Innen-Teile in PKWs*, 26. AVK-Tagung Berlin, September 1994, Heft Sept
- 11 Böttcher, P.: *Flachs in Vliesstoffen*, textil praxis international, Juli/August 1993, S. 585-587
- 12 Britton, P. N.; Sampson, A. J.; Elliott, C. F.; Graben, H. W.; Gettys, W. E.: *Computer Simulation of the Mechanical Properties of Nonwoven Fabrics, Part I: The Method*, Textile Research Journal, Band 53 (1983), Heft 6, Seite 363-368
- 13 Britton, P. N.; Sampson, A. J.; Elliott, C. F.; Graben, H. W.; Gettys, W. E.: *Computer Simulation of the Mechanical Properties of Nonwoven Fabrics, Part III: Fabric Failure*, Textile Research Journal, Band 54 (1984), Heft 7, Seite 425-428
- 14 Britton, P. N.; Sampson, A. J.; Gettys, W. E.: *Computer Simulation of the Mechanical Properties of Nonwoven Fabrics, Part II: Bond Braking*, Textile Research Journal, Band 54 (1984), Heft 1, Seite 1-5
- 15 Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH; *Benutzerhandbuch VEDDAC 2.6 für Windows*, Chemnitz 1998
- 16 Colberg, M., Sauerbier, M.: *Spritzgießen naturfaserverstärkter Kunststoffe*. Kunststoffe 87 (1997) 12, S. 1780 – 1782
- 17 Dambroth, M.; Seehuber, R.: *Flachs: Züchtung, Anbau und Verarbeitung*, Eugen Ulmer GmbH & Co., 1988
- 18 Desai, A. N.: *Functional relationships between needle punching parameters and nonwoven Properties*, INDA-TECC 95, St. Petersburg, USA, 18.-20. Sept, 1995, Seite 257-265
- 19 DIN 51006: *Thermische Analyse, Thermogravimetrie*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1990
- 20 DIN 53857/2: *Prüfung von Textilien, Einfacher Streifenzugversuch an textilen Flächengebilden, Vliesstoffe und andere nicht gewebte textile Flächengebilde*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1979
- 21 DIN 54811: *Prüfung von Kunststoffen, Bestimmung des Fließverhaltens von Kunststoffschmelzen mit einem Kapillar-Rheometer*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1984
- 22 DIN EN ISO 1973: *Textilien, Fasern, Bestimmung der Feinheit, Gravimetrische Verfahren und Schwingungsverfahren*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995

- 23 DIN EN ISO 5079: *Textilien, Fasern, Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung an Spinnfasern*,
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1996
- 24 Ehrenstein, G. W.; Riedel, G., Trawiel, P.: *Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen*,
Carl Hanser Verlag München Wien, 1998
- 25 Eichhorn, F.; Zucker, T.; Mennig, G.: *Transferintegralpressen – Ein Verarbeitungsverfahren für langfaserverstärkte Thermoplaste*,
Tangungsumdruck Technomer, 11.-13.09.1999, Chemnitz
- 26 Fölster, T.: *Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung flachfaserverstärkter Thermoplaste*,
Statusseminar Flachs, Leipzig, 15./16.11.1993
- 27 Fölster, T.: *Nachwachsende Rohstoffe in technischen Anwendungen am Beispiel Fasern/Vliese.*,
Textilveredlung, Band 30 (1995) Heft 1/2, Seite 2-8
- 28 Fölster, T.; Michaeli, W.: *Flachs- eine nachwachsende Verstärkungsfasern für Kunststoffe?*,
Kunststoffe, Muenchen, Band 83 (1993) Heft 9, Seite 687-691
- 29 Fuchs, H.; Kittelmann, W.: *Stand und Perspektive der Vliesstoffe, Chemiefasern/Textilindustrie*, Band 44./96. (1994), Heft Nov./Dez.
- 30 Füll, C.; Hempel, H.: *Fasergrobaufschluß bei Hanf*,
VD-MEG Kolloquium Agrartechnik "Erzeugung, Aufbereitung und Verarbeitung von Naturfasern für nichttextile Zwecke", 06./07. August 1997, Bonn
- 31 Gador, W., Heinze, K.: *Die Veränderungen im Vliesstoff durch den Vernadelungsprozeß*,
Technische Textilien, 3/1995, S. 6-7
- 32 Gassan, J.: *Naturfaserverstärkte Kunststoffe – Korrelation zwischen Struktur und Eigenschaften der Fasern und deren Composites*.
Dissertation Universität (Gh) Kassel (1997)
- 33 Gassan, J.; Bledzki, A. K.: *Einfluß der Faserbehandlung auf die Eigenschaften naturfaserverstärkter Duroplaste*,
Tagungsband Techtexilsymposium 1994, Vortrag Nr.: 332, S.1 ff.
- 34 Gassan, J.; Bledzki, A. K.: *Einfluß der Faserstruktur auf die Kennwerte von Naturfasern*,
Tagungsband Techtexilsymposium 1995, Vortrag Nr. 311, S.1-8

- 35 Grindstaff, T. H.; Hansen, S. M.: *Computer Modell for Predicting Point Bonded Nonwoven Fabric Strenth, Part I*,
Textile Research Journal, Band 56 (1986), Heft 6, Seite 383-388
- 36 Hahn, H.G.: *Technische Mechanik fester Körper*,
2.Auflage, 1992, Carl Hanser Verlag München Wien
- 37 Hanselka, H.; Herrmann, A.S.: *Kompostierbare Faserverbund-Bauteile aus nachwachsenden Rohstoffen*,
Konferenz-Einzelbericht: Biorohstoff Hanf, Tech.-Wiss. Symp., Inst. fuer Politische und Oekologische Innovation, (NOVA), Frankfurt/Main, D, 2.-5. Mar, 1995
- 38 Hanselka, H.; Herrmann, A.S.; Prömper, E.: *Automobil-Leichtbau durch den Einsatz von (biologisch abbaubaren) Naturfaser-Verbundwerkstoffen*,
VDI-Berichte Nr.1235 (1995), S.159-185
- 39 Heinemann, O.: *Standröste von Flachs – Innovation in der Flachserntetechnik*,
VDI-MEG Kolloquium Agrartechnik "Erzeugung, Aufbereitung und Verarbeitung von Naturfasern für nichttextile Zwecke", 06./07. August 1997, Bonn
- 40 Herer, J.; Bröckers, M.: *Die Wiederentdeckung der Nutzpflanze Hanf, Cannabis, Marihuana*,
Verlag Zweitausendeins, 1994
- 41 Höck, P.: *Verstärkung von Polypropylen durch Flachsfasern auf Gleichdralldoppelschneckenextrudern*,
Dissertation an der RWTH Aachen, DE, 1994
- 42 Isensee, E.; Ohls, J.; Heinemann, O: *Die Standröste - Ein universelles Verfahren risikoarmer Flachsernte*,
Statusseminar Flachs, Leipzig, 15./16.11.1993
- 43 Jehrke, M.: *Umformen gewebeverstärkter thermoplastischer Prepregs mit Polypropylen- und Polyamid-Matrix im Preßverfahren*,
Aachener Beiträge zur Kunststoffverarbeitung, Augustinus Buchhandlung, Aachen, Band 37, 1995
- 44 Kaiserberger, E.; Knappe, S.; Möhler, H.; Rahner, S.: *TA für die Polymertechnik*,
NETZSCH Jahrbuch für Wissenschaft und Praxis, Band 3, 1994
- 45 Kinast, U.: *Tensid-Aufschluß von Grünflachs*,
Statusseminar Flachs, Bonn, 02./03.05.1991
- 46 Köhler, E., Bergner, A.; Odenwald, S.; Ludwig, T: *Ermittlung herstellungsbedingter Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften konsolidierter Naturfaser-Thermoplast-Hybridvliese*,
Studie IMK, TU Chemnitz, 1997

- 47 Köhler, E.; Nendel, W.; Unger, C.: *Verhalten von Naturfaser-Stoffsystemen*, Studie IMK, TU Chemnitz, 1995
- 48 Köhler, E.; Bergner, A.: *Faserverbundkonstruktion*, Vorlesungsunterlagen Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik, TU Chemnitz, Chemnitz
- 49 Kohler, R.: *Wege zu hochwertigen Flachsfasern für technische Anwendungen*, 5. Reutlinger Flachssymposium, 7.-8.3.1994
- 50 Kohler, R.; Wedler, M.: *Nichttextile Anwendungen von Flachs*, Tagungsband Techtexilsymposium 1994, Vortrags-Nr. 331, S.1-8
- 51 Komori, T.; Makashima, K.: *Numbers of Fiber-to-Fiber-Contacts in General Fiber Assemblies*, Textile Research Journal, Band 47 (1977), Heft 1, Seite 13-17
- 52 Konermann, M.; Vetter, R.: *Prüfung des Anbaus von Kenaf in Baden-Württemberg und der Schweiz*, VDI-MEG Kolloquium Agrartechnik "Erzeugung, Aufbereitung und Verarbeitung von Naturfasern für nichttextile Zwecke", 06./07. August 1997, Bonn
- 53 Krönert, W.; Raith, A.: *Faser-Zugmodul-Meßvorrichtung für Einzelfaseruntersuchungen*, Chemiefasern/Textilindustrie, 40./92. Jahrgang, März 1990
- 54 Lampke, T.: *Beitrag zur Charakterisierung naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe mit hochpolymerer Matrix*, Dissertation am Lehrstuhl für Verbundwerkstoffe, TU Chemnitz, 2001
- 55 Lau, M.: *Ermittlung des Umformgrades mit einem photogrammetrischen Meßsystem*; Diplomarbeit an der Hochschule für Technik und Wirtschaft, Mittweida, 1997
- 56 Lünenschloß, J.; Albrecht, W.: *Vliesstoffe*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1982
- 57 Lützkendorf, R.; Mieck, K.-P.; Reußmann, T.: *Vernadelte Hybridvliese aus Flachs- und PP-Fasern - textile Halbzeuge für die Faserverbundherstellung*, Techtexilsymposium 1995, Vortrag Nr.: 314, S.1-6
- 58 Mayer J., de Haan J., Reber R., Wilde D., Ziegmann G., Wintermantel E.: *Knitted Carbon and Glass Fiber Reinforced Thermoplastics: Potentials and Limitations*, Techtexil ASIA, Osaka, 13.-14.10.1998
- 59 Michaeli, W.; Höck, P.; Kocker, K.: *Einsatzmöglichkeiten von Flachsfasern in Kunststoffen*, Statusseminar Flachs, Leipzig, 15./16.11.1993

- 60 Mieck, K.-P.; Nechwatal, A.; Knobelsdorf, C.: *Faser-Matrix-Haftung in Kunststoffverbunden aus thermoplastischer Matrix und Flachs, 2a. Die Anwendung von funktionalisiertem Polypropylen*, Die Angewandte Makromolekulare Chemie, Band 225 (1995) Heft Feb, Seite 37-49
- 61 Mieck, K.-P.; Nechwatal, A.; Knobelsdorf, C.: *Faser-Matrix-Haftung in Kunststoffverbunden aus thermoplastischer Matrix und Flachs. Silanisierung*, Die Angewandte Makromolekulare Chemie, Band 224 (1995) Heft Jan, Seite 73-88
- 62 Mieck, K.-P.; Reußmann, T.: *Entwicklung und Eigenschaften von Nadelvliesstoffen aus Flachs für Kunststoffverbunde*, Technische Textilien/ Technical Textiles, 38. Jg., Juni 1995
- 63 Moser, K.: *Faser-Kunststoff-Verbunde. Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992
- 64 Müller, G. (Hrsg.): *Bibliothek des Technikers, Lexikon Technologie Metallverarbeitende Industrie*, Verlag Europa-Lehrmittel Haan-Gruiten, 1989, S.616.
- 65 N.N.: *Nähwirkmaschinen Malimo - technische und technologische Möglichkeiten (2), Kunit und Multiknit*, Kettenwirk-Praxis 4/93, S.15-23
- 66 Odenwald, S.: *Umformverhalten naturfaserverstärkter Kunststoffe*, Diplomarbeit, IMK, TU-Chemnitz, 1997
- 67 Pan, N.: *A Modified Analysis of the Microstructural Characteristics of General Fiber Assemblies*, Textile Research Journal, Band 63 (1993), Heft 6, Seite 336-345
- 68 Rakshit, A. K.: *Engineering needle punched nonwovens to meet functional properties*, 30th Technological Conference, Ahmedabad, IND, 03.-04. Feb., 1989, S. 36.1-36.6
- 69 Reinking, J.: *Geodätische Analyse inhomogener Deformationen mit nichtlinearen Transformationsfunktionen*, Deutsche Geodätische Kommission bei der bayrischen Akademie der Wissenschaften, Dissertation, Reihe C, 1994, Heft 412
- 70 Schäfer, K.: *Reibung und Verschleiß thermoplastischer Polymerwerkstoffe*, VDI-Verlag, 1983

- 71 Schneider, C.T.; Reinking, J.: *Photogrammetrische Deformationsanalyse ber der Blechumformung*, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. – Jahrestagung, 1994, S. 103-108
- 72 Skwiercz, M.: *Duroplaste aus nachwachsenden Rohstoffen*, 7. Internationale Tagung stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Chemnitz, 11./12.10.2000
- 73 Voelkner, W.; Feldmann, P.: *Anwendung der Visionplastizität in der Umformtechnik*, Konferenz-Einzelbericht: SFU, Innovationspotential Umformtechnik, 1. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, 1994.
- 74 Voigtländer, G.: *Untersuchungen zum Nadelprozess*, Melliand Textilberichte, Nr. 5, S. 391-396
- 75 Werner, D.; Köhler, E.: *Pflanzenfasern im Verbund – das Beispiel Chinaschilf*, Spektrum der Wissenschaft, Juni 1994, S. 102-105
- 76 Wielage, B.; Köhler, E.; Odenwald, S.; Lampke, T.; Bergner, A.: *Flachsfaserverstärktes PP - Wie Prozeßparameter die Bauteileigenschaften beeinflussen*, Kunststoffe 89 (1998) 8
- 77 Wielage, B.; Lampke, T.; Marx, G.; Nestler, K.; Starke, D., *Thermogravimetric and differential calorimetric analysis of natural fibres and polypropylene*, Thermochemica Acta, 337 (1999), S. 169-177
- 78 Wulfhorst, B.; Hörsting, K.: *Rechnergestützte Simulation der Drapierbarkeit von Geweben aus HL-Fasern für Faserverbundwerkstoffe*, Chemiefasern/Textilindustrie, 42./92. Jahrgang, Juli/August 1990
- 79 Wuttke, B.: *Flachsfaserverstärktes Polypropylen, Mikromechanik und Wasseraufnahmeverhalten*, Dissertation an der TU Berlin, DE, 1996

12 Anhang

12.1 Literaturangaben zu Faserkennwerten

Tabelle 18: Eigenschaften von Naturfasern

Eigenschaft	Flachs	Hanf	Ramie	Jute
Festigkeit Elementar-faser [MPa]	200-900	500-1000	600-1000	300-600
Reißdehnung [%]	1-5	1-5	2,4	1,3-2,4
Faserfeinheit Elementar-faser [tex]	0,1-0,7	0,2-0,6	0,5-1,3	0,2-0,3
Länge Elementar-faser [mm]	20-70	15-55	60-260	1-5
Länge technische Faser [mm]	100-800	600-2500	500-2000	650-3000
Dichte [g/cm ³]	1,2-1,5	1,4-1,5	1,5	1,44

Quelle: [9, 28, 38, 50]

12.2 Übersicht Versuchsvliesstoffe

Vlies-nr.	Flor	theor. Flächenmasse [g/m ²]	reale Flächenmasse [g/m ²]	Verfest. – technologie	Flachfasern	PP-Fasern	Flachfaser-gehalt [%]	Stich-dichte [E/cm ²]	Ein-stich-tiefe [mm]
1	5	400	333	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	30	50	12
2	5	600	562	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	30	50	12
3	5	800	646	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	30	50	12
4	5	1000	866	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	30	50	12
5	1	400	251	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	50	50	12
6	1	600	398	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	50	50	12
7	1	800	574	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	50	50	12
8	1	1000	667	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	50	50	12
9	2	400	276	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	70	50	12
10	2	600	527	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	70	50	12
11	2	800	763	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	70	50	12
12	2	1000	831	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	70	50	12
13	1	800	514	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	50	25	12
14	1	800	525	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	50	100	12
15	2	800	808	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	70	25	12
16	2	800	719	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	70	100	12
17	1	800	570	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	50	50	9
18	1	800	583	Nadelvlies	Reißfasern	FH 1000	50	50	15
19	1	400	415	Maliwatt	Reißfasern	FH 1000	50	-	-
20	1	600	569	Maliwatt	Reißfasern	FH 1000	50	-	-
21	4	800	---	Maliwatt	Reißfasern	FH 1000	50	-	-
22	1	400	452	Malivlies	Reißfasern	FH 1000	50	-	-
23	1	600	486	Malivlies	Reißfasern	FH 1000	50	-	-
24	1	800	654	Malivlies	Reißfasern	FH 1000	50	-	-
25	1	400	270	Kunit	Reißfasern	FH 1000	50	-	-
26	4	600	---	Kunit	Reißfasern	FH 1000	50	-	-
27	4	800	---	Kunit	Reißfasern	FH 1000	50	-	-
28	3.1	800	648	Nadelvlies	San. E0	FV 10 DO	50	50	12
29	3.2	800	695	Nadelvlies	San. 13 GR	FV 10 DO	50	50	12
30	4.1	800	738	Nadelvlies	San. E0	FV 10 DO	70	50	12

31	4.2	800	524	Nadelvlies	San. 13 GR	FV 10 D0	70	50	12
32	6	800	718	Nadelvlies	San. E0	FH 1000	50	50	12
33	7	800	603	Nadelvlies	San. 13 GR	FH 1000	50	50	12
34	8	800	688	Nadelvlies	San. B0	FH 1000	50	50	12
35	9	800	730	Nadelvlies	San. E0	FH 1000	70	50	12
36	10	800	664	Nadelvlies	San. 13 GR	FH 1000	70	50	12
37	11	800	712	Nadelvlies	San. B0	FH 1000	70	50	12
38	12	800	679	Nadelvlies	Reißfasern	FV 10 D0	50	50	12
39	13	800	702	Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	50	50	12
40	14	800	665	Nadelvlies	Reißfasern	FV 10 D0	70	50	12
41	15	800	744	Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	70	50	12
42	16	800		Nadelvlies	Hanf	FH 1000	30	50	12
43	17	800		Nadelvlies	Hanf	FH 1000	50	50	12
44	18	800		Nadelvlies	Hanf	FH 1000	70	50	12
45	19	800		Nadelvlies	Hanf	FV 10 D0	30	50	12
46	20	800		Nadelvlies	Hanf	FV 10 D0	50	50	12
47	21	800		Nadelvlies	Hanf	FV 10 D0	70	50	12
48	22	800		Nadelvlies	Hanf		100	50	12
49	23	800		Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	30	25	12
50	23	800	716	Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	30	25	12
51	23	800	685	Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	30	50	12
52	23	800	809	Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	30	75	12
53	23	800	654	Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	30	100	12
54	23	800	794	Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	30	50	9
55	23	800	794	Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	30	50	15
56	23	800	711	Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	30	100	15
57	23	800	676	Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	30	100	9
58	23	800	717	Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	30	25	15
59	23	800	767	Nadelvlies	San. B0	FV 10 D0	30	25	9
60	24	800		Nadelvlies	San. B0		100	50	12
61	25	800	803	Nadelvlies	DDA-Flachs	FV 10 D0	50	50	12
62	26	800	806	Nadelvlies	US-Flachs	FV 10 D0	50	50	12
63	27	800	855	Nadelvlies	US-Hanf	FV 10 D0	50	50	12

12.3 Versuchsplan Prozessparameter

12.3.1 Nichtisotherme Konsolidierung

Vliesnummer	Haftvermittler	Flächenmasse [g/m ²]	Flachsfasergehalt [%]	Druck Bauteil [bar]	Temperatur [°C]	Trocknung	Haltezeit [min]
7	nein	800	50	25	180	ja	2
7	nein	800	50	10	180	ja	2
7	nein	800	50	40	180	ja	2
7	nein	800	50	25	180	ja	4
7	nein	800	50	40	180	ja	4
7	nein	800	50	25	200	ja	1
7	nein	800	50	25	200	ja	2
7	nein	800	50	25	200	ja	3
7	nein	800	50	25	200	ja	4
7	nein	800	50	25	200	ja	5
7	nein	800	50	25	200	ja	10
7	nein	800	50	25	200	ja	15
7	nein	800	50	25	200	nein	2
61	ja	800	50	25	200	nein	2
62	ja	800	50	25	200	ja	2
62	ja	800	50	25	200	nein	2
63	ja	800	50	25	200	ja	2
63	ja	800	50	25	200	nein	2
43	nein	800	50	25	200	ja	2
43	nein	800	50	25	200	nein	2
46	ja	800	50	25	200	ja	2
46	ja	800	50	25	200	nein	2
7	nein	800	50	10	200	ja	2
7	nein	800	50	40	200	ja	2
7	nein	800	50	55	200	ja	2
7	nein	800	50	70	200	ja	2
7	nein	800	50	85	200	ja	2
7	nein	800	50	100	200	ja	2
7	nein	800	50	25	220	ja	1
7	nein	800	50	25	220	ja	2
7	nein	800	50	25	220	ja	3

7	nein	800	50	25	220	ja	4
7	nein	800	50	25	220	ja	5

12.3.2 Isotherme Konsolidierung

Vlies-nummer	Haftvermittler	Flächenmas- se [g/m ²]	Fasergehalt [%]	Bauteil Druck [bar]	Temperatur [°C]
7	nein	800	50	20	180
7	nein	800	50	50	200
7	nein	800	50	80	220
38	ja	800	50	50	200
6	nein	600	50	50	200
8	nein	1000	50	50	200
3	nein	800	30	50	200
11	nein	800	70	50	200
7	nein	800	50	20	200
7	nein	800	50	20	220
7	nein	800	50	50	180
7	nein	800	50	50	220
7	nein	800	50	80	180
7	nein	800	50	80	200
40	ja	800	70	50	200

12.4 Theoretischer Ansatz zur Vliessimulation von Pan

Pan 67 konnte nachweisen, daß die Ergebnisse von *Komori* und *Makishima* 51 einen Fehler aufweisen, indem die Wahrscheinlichkeit des Kontaktes einer Faser mit allen $N-1$ Fasern gleich hoch angenommen wird. Zur Beschreibung der Systemparameter benutzt *Pan*

V_f Faservolumenfraktion, Anteil Fasern im Modelraum

$\Omega(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ Faserorientierungsdichtefunktion zur Beschreibung der Faserausrichtung im Raum

Für zwei Fasern $A(\theta, \phi)$ und $B(\theta', \phi')$, mit $0 \leq \theta \leq \pi$ und $0 \leq \phi \leq \pi$, kann die Wahrscheinlichkeit einer Berührung wie folgt formuliert werden:

$$\bar{n} = \int_0^p d\mathbf{q} \int_0^p d\mathbf{f} \cdot n(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot \Omega(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot \sin \mathbf{q} = \frac{8 \cdot s \cdot V_f \cdot I}{p + 4 \cdot V_f \cdot y}$$

wobei s die Aspect-ratio der Fasern ist,

$$I = \int_0^p d\mathbf{q} \int_0^p d\mathbf{f} J(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \Omega(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \sin \mathbf{q}$$

ein Faktor für die Faserorientierung ist und

$$\Psi = \int_0^p d\mathbf{q} \int_0^p d\mathbf{f} \cdot J(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot K(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot \Omega(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \cdot \sin \mathbf{q}$$

die Kopplungseffekte zwischen $J(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ und $K(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ beschreibt, wobei

$$K(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \int_0^p d\mathbf{q}' \int_0^p d\mathbf{f}' \cdot \Omega(\mathbf{q}', \mathbf{f}') \times \frac{1}{\sin X(\mathbf{q}, \mathbf{f}, \mathbf{q}', \mathbf{f}')} \cdot \sin \mathbf{q}'$$

die Reduktion der Wahrscheinlichkeit weiterer Faserberührungen beinhaltet und

$$J(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \int_0^p d\mathbf{q}' \int_0^p d\mathbf{f}' \cdot \Omega(\mathbf{q}', \mathbf{f}') \times \sin X(\mathbf{q}, \mathbf{f}, \mathbf{q}', \mathbf{f}') \cdot \sin \mathbf{q}'$$

und

$$\sin X = \left[1 - \left(\cos \mathbf{q} \cdot \cos \mathbf{q}' + \sin \mathbf{q} \cdot \sin \mathbf{q}' \cdot \cos(\mathbf{f} - \mathbf{f}') \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

den Winkel zwischen zwei Fasern beschreiben.

Anwendung auf den 3D-Fall:

Annahme: Die Fasern sind alle homogen im Raum verteilt, ohne Vorzugsrichtung.

Damit ergibt sich

$$\Omega(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \frac{1}{2 \cdot p}$$

$$J(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = J(0,0) = \int_0^p d\mathbf{q}' \int_0^p d\mathbf{f}' \cdot \Omega(\mathbf{q}', \mathbf{f}') \times \sin X(0,0,\mathbf{q}', \mathbf{f}') \cdot \sin \mathbf{q}' = \frac{p}{4}$$

$$I = \int_0^p d\mathbf{q} \int_0^p d\mathbf{f} J(0,0) \Omega(\mathbf{q}, \mathbf{f}) \sin \mathbf{q} = \frac{p}{4}$$

$$K(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = K(0,0) = \int_0^p d\mathbf{q}' \int_0^p d\mathbf{f}' \cdot \Omega(\mathbf{q}', \mathbf{f}') \times \frac{1}{\sin X(0,0,\mathbf{q}', \mathbf{f}')} \cdot \sin \mathbf{q}' = \frac{p}{2}$$

mit diesen Werten ergeben sich folgende Kennwerte:

- mittlere Anzahl Kontakte einer Faser mit einer anderen:

$$\bar{n} = \frac{8 \cdot s \cdot V_f \cdot I}{p + 4 \cdot V_f \cdot \mathbf{y}} = \frac{4 \cdot s \cdot V_f}{2 + p \cdot V_f}$$

- mittlere Anzahl Faser-Faser-Kontakte je Faserlängeneinheit

$$\bar{n}_l = \frac{8 \cdot s \cdot V_f \cdot I}{l_f \cdot (\mathbf{p} + 4 \cdot V_f \cdot \mathbf{y})} = \frac{4 \cdot V_f}{D \cdot (2 + \mathbf{p} \cdot V_f)}$$

- mittlere Länge zwischen zwei Faser-Faser-Kontakten

$$\bar{b} = \frac{l_f \cdot (\mathbf{p} + 4 \cdot V_f \cdot \mathbf{y})}{8 \cdot s \cdot V_f \cdot I} = \frac{D \cdot (2 + \mathbf{p} \cdot V_f)}{4 \cdot V_f}$$

Anwendung auf den 2D-Fall:

Annahme: Die Dicke des Materials beträgt den zweifachen Faserdurchmesser. Es gilt damit $\mathbf{q} = \frac{\mathbf{p}}{2}$. Durch Einsetzen in die Ergebnisse des 3D-Ansatzes ergibt sich

$$\Omega(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \frac{1}{\mathbf{p}}$$

$$J\left(\frac{\mathbf{p}}{2}, \mathbf{f}\right) = J\left(\frac{\mathbf{p}}{2}, 0\right) = \frac{2}{\mathbf{p}}$$

$$I = \frac{2}{\mathbf{p}}$$

Für $K\left(\frac{\mathbf{p}}{2}, \mathbf{f}\right)$ ist $\mathbf{f}' = 0$ eine Singularität. Die Integrationsgrenzen werden daher verschoben zu $\mathbf{f}'_2 > \mathbf{f}' > \mathbf{f}'_1$:

$$K(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = K(0,0) = \frac{1}{\mathbf{p}} \int_{\mathbf{f}'_1}^{\mathbf{f}'_2} d\mathbf{f}' \cdot \frac{1}{\sin \mathbf{f}'} = \frac{\mathbf{p}}{2} = \frac{2}{\mathbf{p}} \cdot A$$

Wobei A eine von der Fasergeometrie abhängige Konstante ist:

$$A = \ln \left[\cot \left(\frac{\arcsin \left(\frac{D}{l_f} \right)}{2} \right) \right]$$

So ergeben sich die folgende Gleichungen

- mittlere Anzahl Kontakte einer Faser mit einer anderen:

$$\bar{n} = \frac{16 \cdot \mathbf{p} \cdot s \cdot V_f}{\mathbf{p}^3 + 16 \cdot A \cdot V_f}$$

- mittlere Anzahl Faser-Faser-Kontakte je Faserlängeneinheit

$$\bar{n}_l = \frac{16 \cdot \mathbf{p} \cdot V_f}{D \cdot (\mathbf{p}^3 + 16 \cdot A \cdot V_f)}$$

- mittlere Länge zwischen zwei Faser-Faser-Kontakten

$$\bar{b} = \frac{D \cdot (\mathbf{p}^3 + 16 \cdot A \cdot V_f)}{16 \cdot \mathbf{p} \cdot V_f}$$

12.5 Ergebnisdiagramme

12.5.1 Vliesstoff - Einfluss von Flachsfasergehalt und Flächenmasse

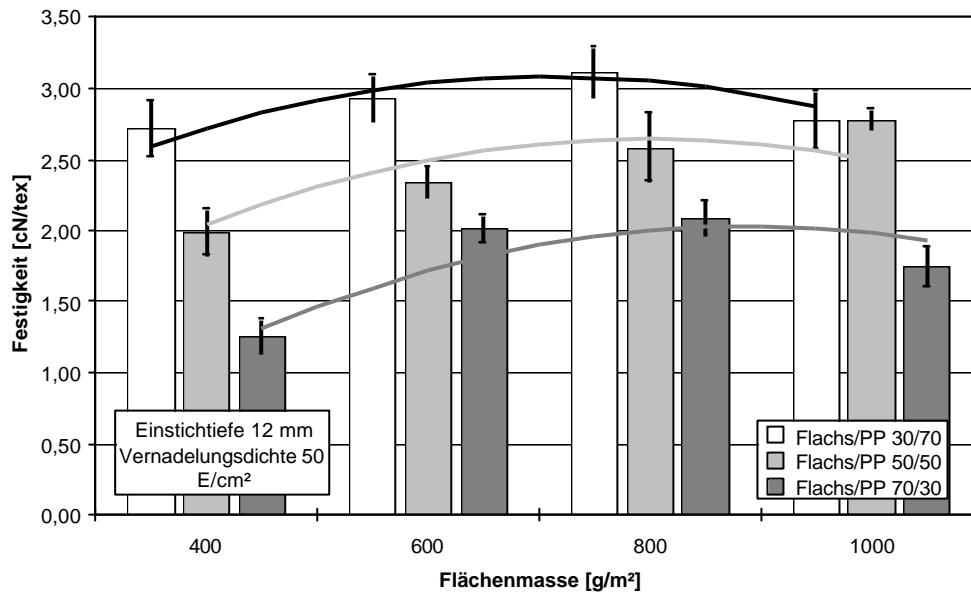


Abb. 65: Einfluss von Flächenmasse und Flachsfasergehalt auf die Reißfestigkeit (quer)

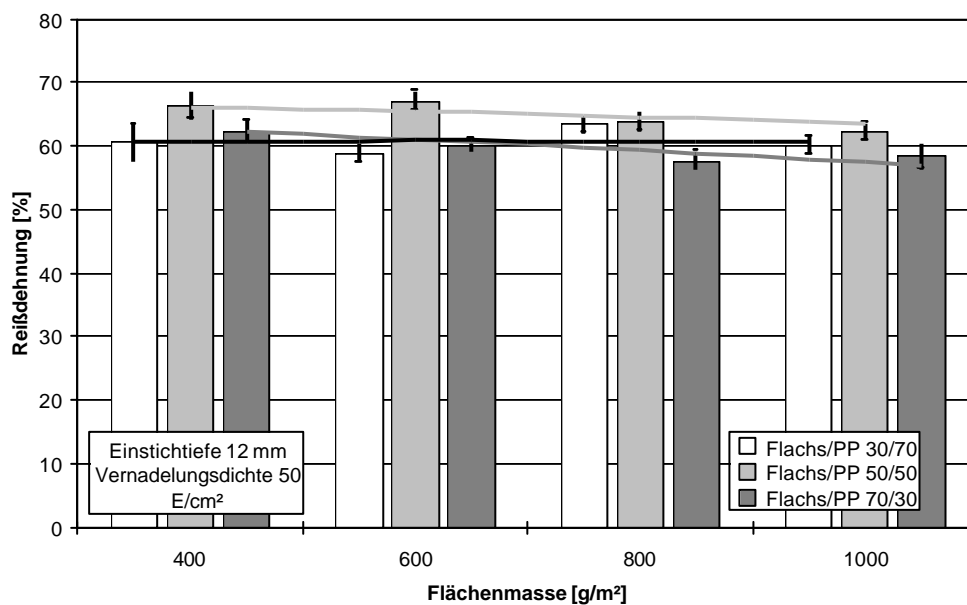


Abb. 66: Einfluss von Flächenmasse und Flachsfasergehalt auf die Reißdehnung (quer)

12.5.2 Vliesstoff - Einfluss von Stichdichte und Einstichtiefe

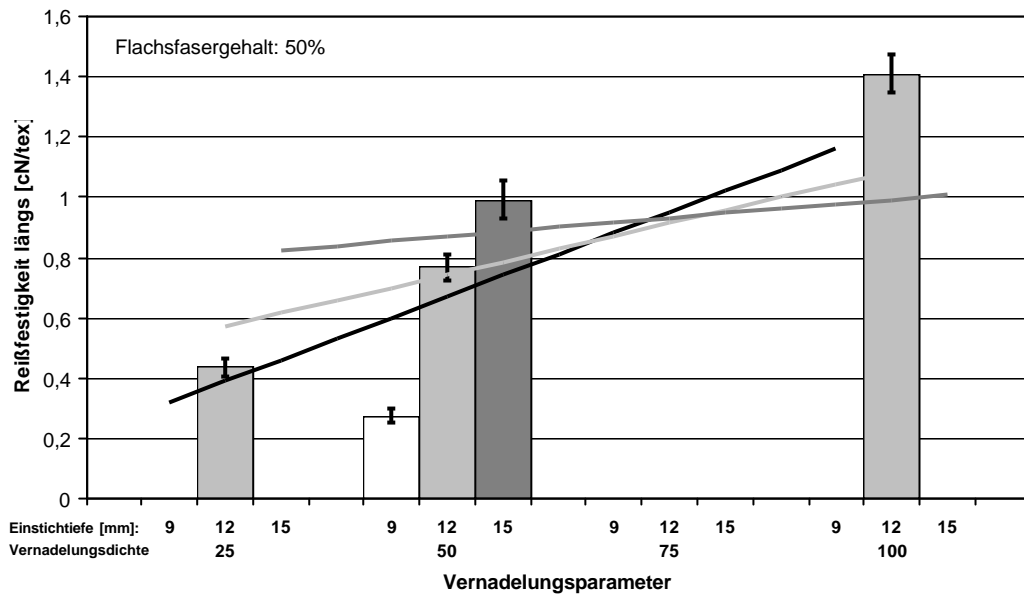


Abb. 67: Einfluss von Flachfasergehalt und Vernadelungsintensität auf die Reißfestigkeit längs (Flachfasergehalt 50%)

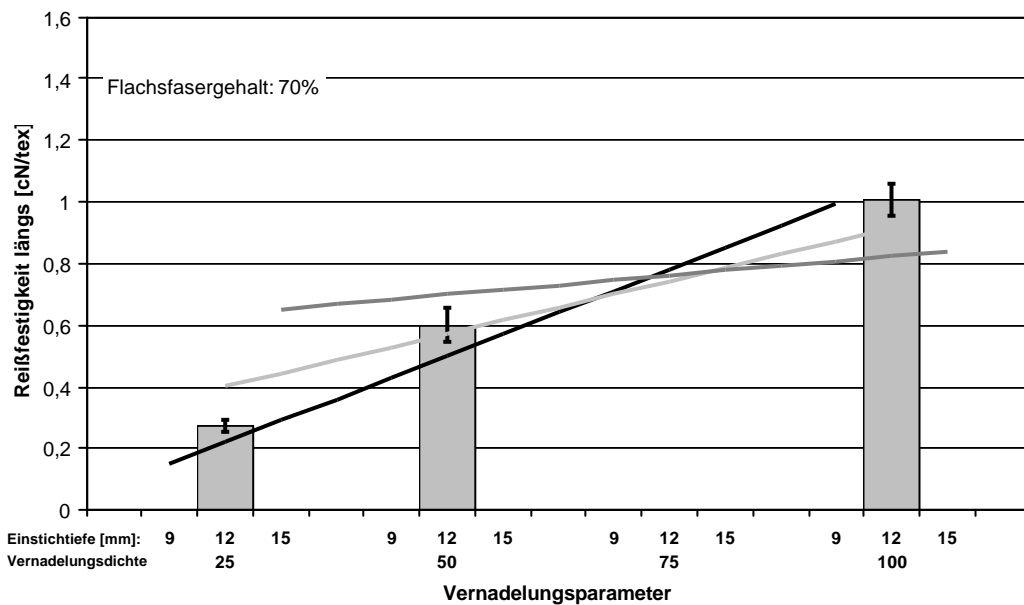


Abb. 68: Einfluss von Flachfasergehalt und Vernadelungsintensität auf die Reißfestigkeit (Flachfasergehalt 70%)

12.5.3 Vliesstoff - Einfluss von Faserart und Haftvermittlerzusatz

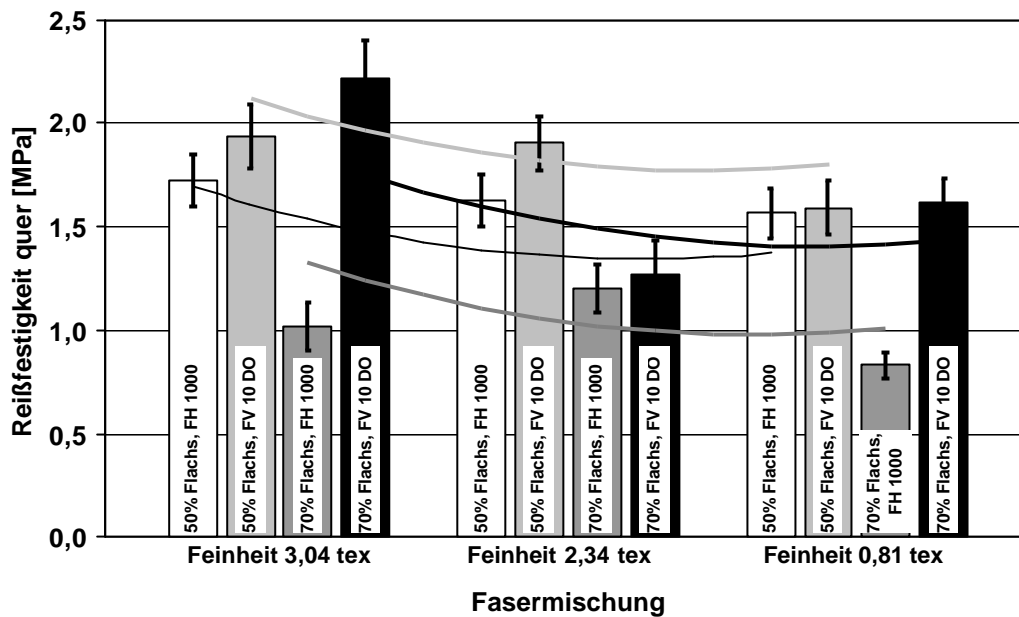


Abb. 69: Einfluss von Faserart und Haftvermittlerzusatz auf die Reißfestigkeit (quer)

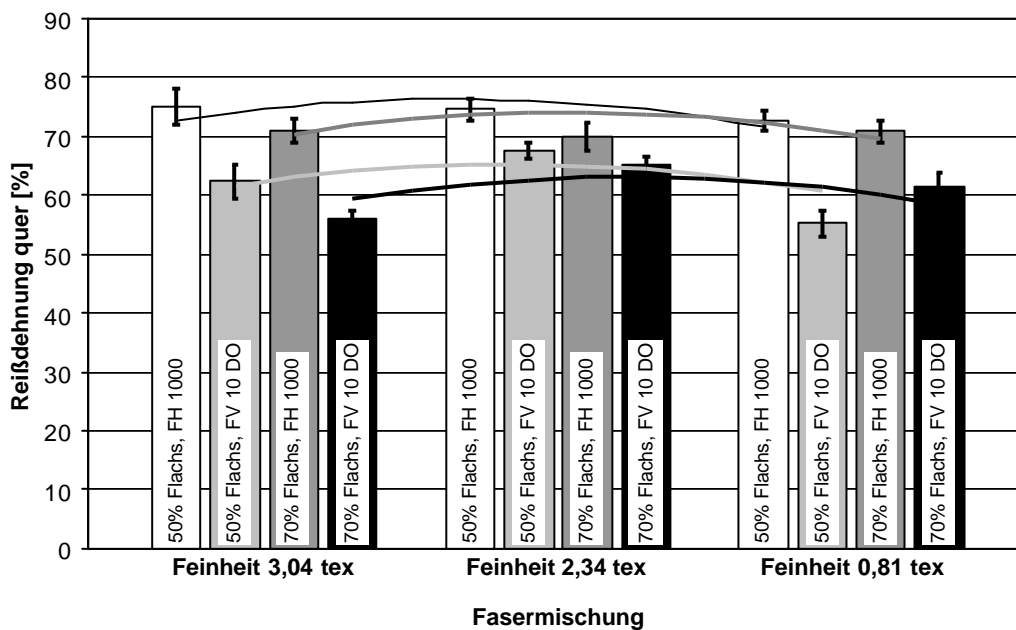


Abb. 70: Einfluss von Faserart und Haftvermittlerzusatz auf die Reißdehnung (quer)

12.5.4 Vliesstoff - Einfluss der Verfestigungstechnologie

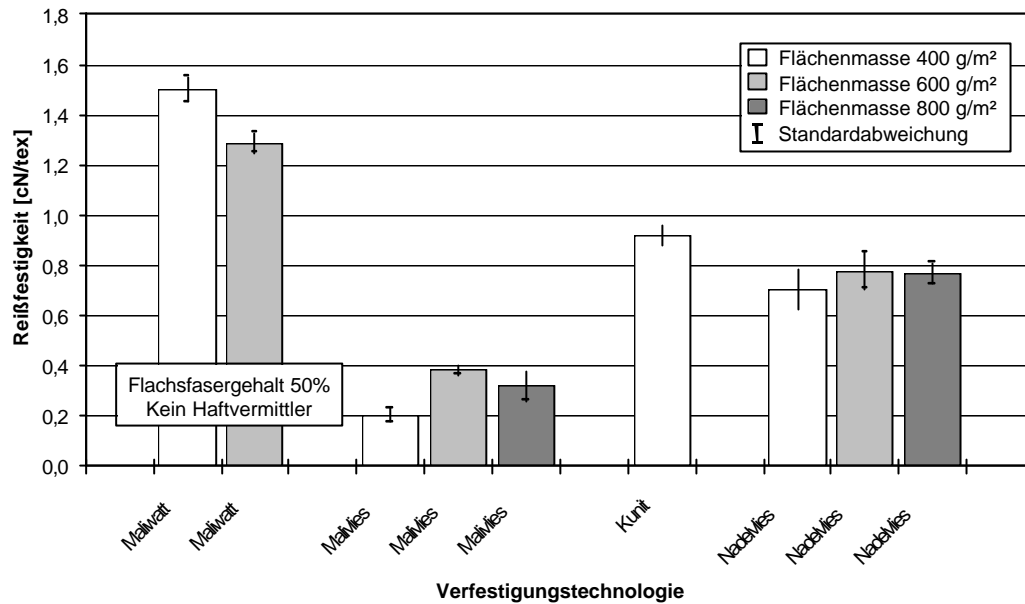


Abb. 71: Einfluss der Verfestigungstechnologie auf die Reißfestigkeit (längs)

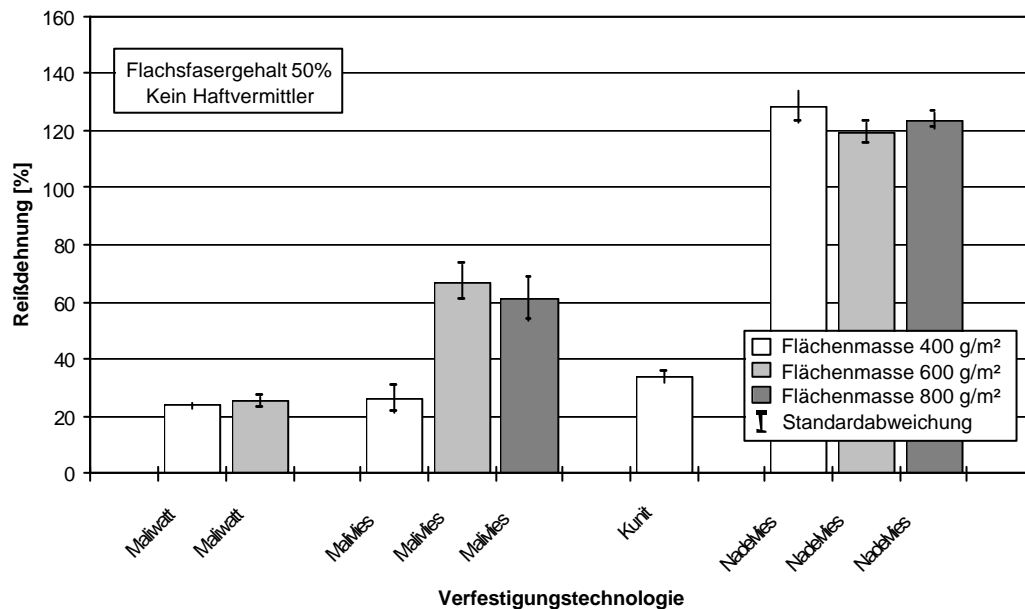


Abb. 72: Einfluss der Verfestigungstechnologie auf die Reißdehnung (längs)

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Stephan Odenwald

Geburtsdatum: 23.02.1972

Geburtsort: Karlsruhe

Familienstand: verheiratet, 2 Kinder

Ausbildung und beruflicher Werdegang

1978 – 1982 Grundschule in Neckargemünd

1982 – 1991 Gymnasium in Neckargemünd

10/1991 – 09/1994 Studium Maschinenbauwesen an der TH Karlsruhe
Abschluss: Vordiplom

10/1994 – 03/1997 Studium Maschinenbau an der TU Chemnitz,
Hauptfach „Konstruktion im Allgemeinen Maschinenbau“
Abschluss: Dipl.-Ing. Maschinenbau

seit 03/1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Chemnitz,
Professur „Konstruktion im Allgemeinen Maschinenbau“