

Roman Rinberg

Technologieentwicklung zur Herstellung
von naturfaserverstärkten Bauteilen in Leichtbauweise
unter Einsatz von Ganzpflanzenrohstoffen

Roman Rinberg

**Technologieentwicklung zur Herstellung
von naturfaserverstärkten Bauteilen in
Leichtbauweise
unter Einsatz von Ganzpflanzenrohstoffen**



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ**

Universitätsverlag Chemnitz

2012

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit wurde von der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur genehmigt.

Tag der Einreichung: 06.07.2011

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Kroll
Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ

Tag der Verteidigung: 22.12.2011

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek
Universitätsverlag Chemnitz
09107 Chemnitz
<http://www.bibliothek.tu-chemnitz.de/UniVerlag/>

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG
Am Hawerkamp 31
48155 Münster
<http://www.mv-verlag.de>

Coverbild BMW Copyright: BMW AG

ISBN 978-3-941003-53-8

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-83282>

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung (SLK) der TU Chemnitz.

Mein herzlicher Dank gilt vor allem Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Kroll, Leiter der Professur SLK und Direktor des Instituts für Strukturleichtbau, für die Betreuung der Arbeit und die stets motivierende Anleitung auf dem Wege meiner wissenschaftlichen Selbstfindung. Seine Anregungen und Hinweise haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Herrn Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ, Leiter der Professur für Holz- und Faserwerkstofftechnik der TU Dresden, danke ich für die Übernahme des Korreferates und die zahlreichen konstruktiven Hinweise.

Bei den Mitarbeitern des Institutes für Strukturleichtbau bedanke ich mich für die kollegiale Zusammenarbeit und die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Mein besonderer Dank gilt den Herren Dipl.-Ing. Sascha Müller, Dipl.-Ing. Martin Kausch und Dipl.-Ing. Sebastian Iwan für ihre entgegenkommende Unterstützung und die hilfreichen Fachgespräche.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Frau für ihre Geduld und Mithilfe in den arbeitsreichen Zeiten und bei meinen Eltern für ihren moralischen Beistand.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
2	Problemstellung und Zielsetzung	13
3	Literaturübersicht.....	15
3.1	Naturfasern und Fasergewinnung.....	15
3.2	Faserhalbzeuge und Verarbeitungstechnologien.....	17
3.3	Naturfaserverstärkte Bauteile in der Technik.....	19
4	Entwurf einer durchgängigen Prozesskette	23
4.1	Rohstoffbereitstellung	23
4.1.1	Varianten von Rohstoffvorlagen	23
4.1.2	Qualitätsmerkmale und erfassbare Parameter	24
4.2	Technologien zur Halbzeugherstellung.....	26
4.2.1	Anforderungen an technische Naturfaserhalbzeuge	26
4.2.2	Verfahrensvarianten zur Halbzeugherstellung	28
4.2.3	Grünflachs als Ganzpflanzenrohstoff für die Halbzeugfertigung.....	32
4.3	Herstellung von Bauteilen	34
4.3.1	Halbzeugimprägnierung mit Matrixharzen	34
4.3.2	Fertigung des Bauteilträgers im Formpressverfahren.....	36
4.3.3	Oberflächenkaschierung und Fertigstellung des Bauteils.....	37
4.4	Neues durchgängiges Fertigungsverfahren	37
5	Validierung der Einzelprozesse	41
5.1	Halbzeugentwicklung und -optimierung.....	41
5.1.1	Ausgangsparameter des pflanzlichen Rohstoffs.....	41
5.1.2	Einflussgrößen bei der Vlieslegung.....	47
5.1.3	Charakterisierung der Halbzeugverfestigung	50
5.2	Spezifikation der Matrixkomponente	56
5.2.1	Vorversuche zur Matrixauswahl.....	56
5.2.2	Viskositätsmessungen.....	58
5.3	Entwicklung und Charakterisierung der Verbundwerkstoffe.....	60
5.3.1	Testmatrix zur Ermittlung grundlegender Werkstoffkennwerte.....	60

5.3.2	Pressversuche mittels ausgewählter Platten- und Formwerkzeuge	62
5.3.3	Auswertung der Prüfergebnisse	65
5.3.4	Mikromechanische Betrachtungen zur Verbundsteifigkeit	77
6	Leichtbau-Konstruktionskonzept für GPR-Pressbauteile	83
6.1	CAD-Flächenmodell und Ableitung des FE-Modells	83
6.2	Definition von Parametern und Randbedingungen.....	85
6.3	Bauteiloptimierung hinsichtlich der Struktursteifigkeit	87
6.4	Ergebnisse der Steifigkeitsoptimierung.....	88
7	Neue Herstellungstechnologie für Verbundbauteile aus Ganzpflanzenrohstoffen	95
8	Zusammenfassung	101
9	Verzeichnisse.....	103
9.1	Literaturverzeichnis	103
9.2	Abbildungsverzeichnis	110
9.3	Tabellenverzeichnis	114
10	Anhang.....	115
10.1	Einfluss des Röstgrades auf die Materialverluste bei Flachsstroh.....	115
10.2	Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Materialverluste beim Grünflachsstroh	116
10.3	Kenngrößen des GPR-Verbundes und dessen Komponenten	118
10.4	Materialdatenmatrix zum Erstellen von Materialsektionen in ANSYS.....	119
10.5	FE-Modell zur Optimierung der Wanddickenverteilung.....	125
10.6	Simulationsergebnisse zur Optimierung der Bauteildickenverteilung	136

Kurzzeichenverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Kurzzeichen	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Querschnittsfläche
E	MPa	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
FG	%	Feuchtigkeitsgehalt
G	MPa	Schubmodul
G'	Pa	Speichermodul
G''	Pa	Verlustmodul
H	mm	y-Koordinate des oberen bzw. unteren Randes des FE-Modells
K	$N \cdot m$	Plattensteifigkeit
L	mm	Länge
m	kg	Masse
Q_{ij}	MPa	reduzierte Steifigkeit ($i, j = 1, 2, \dots, 6$)
S	-	Sicherheitsbeiwert
V	m^3	Volumen
U	MPa	Invariante

Griechische Buchstaben

ε	-	Dehnung
η^*	$Pa \cdot s$	komplexe Viskosität
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ	g/cm^3	Werkstoffdichte
φ	-	Faservolumengehalt

Indices und Koordinatensysteme

f	Faser
h	Harz
l	Luftpore
m	Matrix
max	Maximum
min	Minimum
p	Pore
\perp	senkrecht zur Faser
\parallel	parallel zur Faser
x, y, z	kartesische Koordinaten

Abkürzungen

BMC	Bulk Molding Compound
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
DV	Design Variable
FE	Finite Elemente
FOG	Fogging
GPR	Ganzpflanzenrohstoff
K12	Wirrvlieskarde
LS	Luftpore/Schäbe
NFI	Natural-Fibre-Injection
NFK	Naturfaserverstärkter Kunststoff
OBJ	Objective Funktion
OEM	Original Equipment Manufacturer
PEs	Polyester
PUR	Polyurethan
RSP	Rüttelschachtspeiser
RVE	Repräsentatives Volumenelement
SMC	Sheet Molding Compound
SV	State Variable
UD	Unidirektional
VOC	Volatile Organic Compound
V21/R	Vorvliesbildner
2K	Zwei Komponenten (Harzsystem)

1 Einleitung

Pflanzliche Naturfasern dienen seit Jahrtausenden als Rohstoff zur Herstellung von textilen und nicht-textilen Produkten in den Bereichen Technik und Konsum. In der europäischen Region spielen dabei Hanf und Flachs als Anbaukulturen aus klimatischen und agrartechnischen Gründen eine wesentliche Rolle. Die Technologie zur Flachsfaseraufbereitung ist dank den schriftlichen Überlieferungen der Ägypter seit 2750 v. Chr. bekannt und wurde später durch die Römer etabliert. Vom Mittelalter bis in die Neuzeit kam auch Hanf aufgrund seiner hochfesten und verrottungsbeständigen Fasern bei vielen technischen Anwendungen, wie beispielsweise bei Seilen und Segeltuchen, zum Einsatz. Die rasante Entwicklung von technischen Hochleistungsfasern in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts führte zur Substitution und Verdrängung der Naturfasern als Verstärkungskomponente. Erst in den 90er Jahren konnten die Naturfasern ihre besondere Stellung unter den Verstärkungsfasern zurückgewinnen und in großseriennahen Produktionsprozessen zu Bauteilen verarbeitet werden. Ein entscheidender Marktanteil entfällt dabei auf Interieur-Komponenten im Fahrzeugbau.

Die Verwendung von Naturfasern in der Technik lässt sich durch ihr besonderes Eigenschaftsspektrum in Kombination mit wirtschaftlichen und ökologischen Vorteilen im gesamten Lebenszyklus begründen. Zu den wesentlichen Vorteilen der Naturfasern zählen gute mechanische Eigenschaften, die sich in einer hohen spezifischen Festigkeit und einem hohen spezifischen E-Modul äußern, sowie ihre nahezu unbegrenzte Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit. Zudem besitzen Naturfasern durch ihre CO₂-Neutralität in Verbindung mit einer energiearmen Herstellung über entscheidende ökologische Vorteile im Vergleich zu Synthesefasern. Wirtschaftliche Vorzüge ergeben sich durch niedrige Rohstoffkosten der pflanzlichen Biomasse sowie effiziente Fasergewinnungstechnologien. Gegenüber Glas- und Kohlenstofffasern weisen Naturfasern eine niedrige Dichte und geringe Abrasivität auf. Bei Anwendung von Naturfasern in PKW-Verbundbauteilen verhindert das günstige Crash-Verhalten die Bildung von Splintern und scharfen Bruchkanten. Nachteilig wirken sich bei Naturfasern z. B. Unregelmäßigkeiten in der Faserqualität, hohe Feuchtigkeitsaufnahme und eingeschränkte Temperaturbeständigkeit aus. Insgesamt sind Naturfasern durch ihr vorteilhaftes Eigenschaftsspektrum und vor allem durch ihre Wirtschaftlichkeit für kostenoptimierte und umweltfreundliche Leichtbauanwendungen im Automobilbau prädestiniert.

In den vergangenen Jahren wurden die Technologien zur Verarbeitung von Naturfasern zu Bauteilen kontinuierlich weiterentwickelt, wobei das Hauptaugenmerk auf der Optimierung von Material- und Verfahrensparametern bekannter Technologielösungen lag. Für komplexe Anwendungen im Automobilbau ist allerdings eine ganzheitliche Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette von der Rohstoffbereitstellung über die Halbzeugfertigung bis hin zur Bauteilentwicklung und -herstellung erforderlich. Ein vielversprechender Lösungsansatz stellt hier die Verwendung von neuartigen Faserverstärkungen aus Ganzpflanzenrohstoffen dar. Dadurch können gegenüber den klassisch aufgeschlossenen Naturfasern die Materialverluste reduziert und die Ressourcen- und Kosteneffizienz der verstärkten Kunststoffbauteile deutlich gesteigert werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen dazu die einzelnen Verarbeitungsschritte entlang der neuen Technologiekette analysiert, charakterisiert, simuliert und anhand eines Leichtbaudemonstrators validiert werden.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe haben sich in jüngster Zeit vor allem in der Automobilindustrie bei der Großserienproduktion von Innenraumverkleidungen etabliert. Vornehmlich kommen dabei großflächige Naturfaserbauteile zum Einsatz, die durch verschiedene Bast- und Hartfasern, wie etwa Flachs, Hanf, Jute, Sisal und Abaca, verstärkt werden. Bei diesen Anwendungen dominieren die Flachsfasern mit einem Anteil von mehr als 60%. Derzeit werden unter Verwendung von Naturfaserhalbzeugen Bauteile wie z. B. Türverkleidungen, Hutablagen, Sitzrückenlehnen, Kofferraumböden und -auskleidungen sowie komplette Instrumententafeln mit der Formpresstechnik in Großserie gefertigt.

Die Herstellung von Naturfaserhalbzeugen ist bisher auf die Gewinnung technischer Einzelfasern angewiesen. Der Ertrag an Einzelfasern bei der Aufbereitung der Flachspflanze liegt aufgrund der Pflanzenmorphologie höchstens bei 40% und in der Regel bei ca. 25% der Pflanzenmasse. Für die anfallenden Reststoffe, sog. Schäben, ist die technische Nutzung derzeit kaum zugänglich. Durch neue Verfahren der Ganzpflanzenverwertung können in technischen Anwendungen sowohl die Fasern als auch die Schäben zur Bauteilverstärkung genutzt werden, was nicht nur eine Ressourcenschonung, sondern auch eine Verkürzung der Prozesskette zur Folge hat. Derartige Technologien zur Herstellung von preisgünstigen Ganzpflanzenrohstoffen befinden sich erst am Anfang des Entwicklungsstadiums, stellen aber ein erhebliches Kosteneinsparungspotenzial für den vermehrten Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in Kunststoffbauteilen dar. Hierfür fehlen allerdings die verketteten Prozessstufen und die zugehörigen Schnittstellen.

Gegenwärtige Bauteilkonzepte für das Fahrzeuginterieur sind durch eine ständig wachsende Konkurrenz zwischen Formpressverfahren mit Naturfasern und moderner Spritzgießtechnologie gekennzeichnet. Während das Spritzgießverfahren aufgrund der In-Line-Oberflächenfinalisierung und In-Line-Inserteinbringung durch hohe Prozessflexibilität und -integrität charakterisiert ist, können durch die Formpresstechnologie im Hinblick auf erhöhte Leichtbauanforderungen deutlich bessere spezifische Werkstoffkennwerte, eine niedrigere Materialdichte, dünnwandige Bauteilstrukturen und eine bessere Schadenstoleranz erreicht werden. Bei der Entwicklung von Formpressbauteilen aus naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK) ist bislang kaum auf die numerischen Simulations- und Optimierungsmethoden der klassischen Faserverbundberechnung zurückgegriffen worden, wodurch das Leichtbaupotenzial derartiger Strukturen nicht vollständig ausgeschöpft werden konnte. In der Regel bleibt in der Konstruktionspraxis die Auslegung der NFK-Formpressteile auf den Aufbau eines Offset-Modells beschränkt. Die strukturellen Vorteile der Werkstoffe werden so unzureichend berücksichtigt. Die Ursachen dieser vereinfachten Herangehensweise liegen einerseits in den Eigenschaftsschwankungen von NFK, die aufgrund der biologischen Herkunft per se vorliegen und die Genauigkeit der Bauteilberechnung in Frage stellen. Andererseits fehlt bisher eine materialspezifische Konstruktionsmethodik, welche die belastungsgerechte Bauteilauslegung auf Basis zuverlässiger Stoffgesetze von presstechnisch hergestellten Naturfaserbauteilen zulässt. Demzufolge besteht derzeit ein Bedarf an grundlegenden Konstruktionsrichtlinien und Auslegungskriterien für Bauteile aus NFK-Werkstoffen. Erst dann lässt sich eine belastungs- und prozessgerechte Bauteilkonstruktion bei voller Ausnutzung der werkstoffimmanenten Leichtbaureserven vornehmen.

Wesentliche Zielstellung der vorliegenden Arbeit ist die Bereitstellung einer Auslegungsstrategie für eine neue durchgängige Prozesskette zur Herstellung von naturfaserverstärkten Bauteilen unter Einsatz von Ganzpflanzenrohstoffen (GPR). Für die Dimensionierung der GPR-Bauteile sind zunächst die Werkstoffkennwerte in Abhängigkeit von den prozessbedingten und geometriespezifischen Parametern zu bestimmen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Ermittlung optimaler Steifigkeiten und Festigkeiten als Funktion der lokalen Bauteildicke, die mit dem Pressdruck und der Materialdichte korrespondiert.

Den Ausgangspunkt der Technologieentwicklung bildet eine neue Rohstoffvorlage auf Basis von nicht entholzten Flachspflanzen, die in ungeröstetem Zustand vom Feld geborgen und zu einem dosierfähigen Ganzpflanzenrohstoff mechanisch aufbereitet werden. Hierauf aufbauend erfolgt die Prozesskonzeption zur Herstellung von flächigen Halbzeugen, wobei die wesentlichen Spezifikationen des Automobilbaus zu berücksichtigen sind. In einem weiteren Schritt sollen die neuartigen Halbzeuge in Verbindung mit duromeren Matrixwerkstoffen mittels Formpresstechnologie bei verschiedenen Prozessparameterkombinationen zu Bauteilen verarbeitet werden. Als technologischer Demonstrator ist eine Türverkleidung des 1er BMW ausgewählt worden, bei dem gegenüber dem klassischen NFK-Bauteilträger von einer Kostenreduktion von über 20% ausgegangen wird (vgl. **Abb. 1**).

Auf Basis umfangreicher experimenteller Untersuchungen sollen die erarbeiteten Verfahren verifiziert und mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen die bestmöglichen Parameterkonstellationen ermittelt werden. Die übergeordnete Zielsetzung beinhaltet die Überführung der Technologielösungen und der Ergebnisse in einen praxisrelevanten Bauteilprototyp, wobei die Gewichtsreduktion stets als wesentliche Leichtbauanforderung bei vorgegebenen Steifigkeits- und Festigkeitsrestriktionen im Vordergrund der Auslegungsstrategie steht.



Abb. 1: Referenzbauteil der entwickelten Türverkleidung aus GPR verstärktem Polyurethan (1er BMW, Quellen: BMW AG, SLK TU Chemnitz)

3 Literaturübersicht

3.1 Naturfasern und Fasergewinnung

Die Varianten zur signifikanten Verbesserung der werkstoff- und strukturmechanischen Eigenschaften von Leichtbauteilen mit Kunststoffmatrix durch eine gezielte Naturfaserverstärkung sind hinreichend bekannt und in zahlreichen Arbeiten wissenschaftlich belegt worden (vgl. z. B. [Med08, Gas97, Ode03, Sed04]). Diese Arbeiten befassen sich größtenteils mit den von natürlichen Begleitstoffen gereinigten Pflanzenfasern, die entweder in den Früchten und Samen oder Blättern und Pflanzenstängeln enthalten und für die technische Anwendung verfügbar sind. Die DIN 60001 definiert die Naturfasern als natürliche, linienförmige Gebilde, die sich in textilen Prozessen verarbeiten lassen, und nimmt eine Aufteilung verschiedener Naturfasern in Gruppen vor, abhängig von ihrer Herkunft oder stofflichen Beschaffenheit. Basierend auf dieser Gruppierung wird bei MÜSSIG [Müs01] eine Naturfasersystematik für technische Naturfasern vorgeschlagen, wobei auch die sehr kurzen, nicht textil-fähigen Naturfasern wie etwa Holzfasern mit berücksichtigt werden. Gemein ist den beiden Klassifizierungen, dass die so definierten Naturfasern als Verstärkungskomponente in Kunststoffbauteilen Anwendung finden können.

Unter den verschiedenen Naturfaserarten sind die Gruppen der Bast- und Hartfasern für automobiler Anwendungen von hohem Stellenwert. Zu den Hartfasern gehören exotische Fasern wie Sisal- und Abacafasern, die für die deutsche Industrie Importprodukte sind. Bei den Bastfasern liegen neben den exotischen auch einheimische Naturfasern aus Hanf- und Flachspflanzen vor, wobei die technischen Flachsfasern als Verstärkung in Kunststoffbauteilen den höchsten Marktanteil von ca. 65% ausmachen (siehe [KOG⁺06]).

Der Aufbau von Bastfaserpflanzen wurde in verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten ausführlich beschrieben (z. B. [Lam01, Fra05]). Die Naturfasern liegen in der relativ dünnen Randschicht der Pflanze in gebündelter Form vor und bewirken somit ein enormes Widerstandsvermögen des Stängels gegen Umwelteinflüsse. Dabei sind die Einzelfasern mittels natürlicher Kittsubstanzen (Lignin und Pektin) fest miteinander und mit anderen Pflanzenkomponenten verklebt und müssen demzufolge für die technische oder textile Nutzung in aufwendigen Aufschlussprozessen (Faseraufschlussverfahren) separiert werden. In der Fachliteratur wird zwischen mechanischen, chemischen, physikalisch-chemischen und mikrobiellen Faseraufschlussverfahren unterschieden (vgl. [MBH96, CGP⁺08, MR95, Sch00, Van00]). Für die kosteneffiziente Herstellung von technischen Naturfasern werden aufgrund einer besseren Wirtschaftlichkeit in der Regel mechanische Aufschlussprozesse eingesetzt. Der Ertrag an nutzbaren Fasern variiert in Abhängigkeit von der Art der Nutzpflanze und dem jeweiligen Aufschlussverfahren zwischen 25% und 40%.

Bei der konventionellen Technologie der Flachsfaserbereitstellung werden die Faserpflanzen mittels spezieller Raufmaschinen geerntet und zur Feldröste in paralleler Stängellage auf dem Feld abgelegt. Anschließend unterliegt das Erntegut bis zu sechs Wochen dem biologischen Einfluss von Feuchtigkeit und Mikroorganismen und wird zur Homogenisierung des Röstprozesses ein- bis zweimal gewendet [DS88]. Derartige Feldröste begünstigt die Trennung der im Stängel enthaltenen festen Fasern von den Schäben, bringt allerdings ein erhöhtes witterungsbedingtes Risiko der Faserqualitätsminderung mit sich

(vgl. [LBK00]). Danach werden die Pflanzen im trockenen Zustand zu Standardrundballen gepresst und eingelagert. Für die Fasergewinnung werden die Rundballen wieder aufgelöst und die Pflanzen einem mehrstufigen Prozess der Faserentholzung zugeführt, wobei die Fasern von den pflanzlichen Begleitstoffen getrennt werden. Die anschließend zu Quaderballen verdichteten Flachsfasern stehen so für die Weiterverarbeitung zu textilen Flächen oder technischen Halbzeugen bereit.

In den letzten 15 Jahren wurden vielfältige Versuche unternommen, den Faserertrag durch die gezielte Weiterentwicklung von Faseraufschlussprozessen zu erhöhen und somit kostengünstigere Naturfasern vor allem mit ausreichenden mechanischen Eigenschaften zu gewinnen. Einige Untersuchungen wurden dahingehend durchgeführt, die Verfahrensschritte der Faserentholzung direkt in den Ernteprozess zu integrieren und durch das Beernten des Pflanzenbestandes im Grünzustand eine witterungsrisikobehaftete Feldröste zu umgehen. Diese Verfahren fokussieren die Gewinnung von entholzten Naturfasern und konnten sich, bedingt durch den Einsatz von Spezialerntemaschinen mit niedriger Durchsatzleistung, aus wirtschaftlichen Gründen nicht durchsetzen. Exemplarisch ist hier ein Verfahren für die Produktion von feldentholztem Leinstroh zur Erzeugung von nichttextilen Industriefasern zu nennen [HBK97].

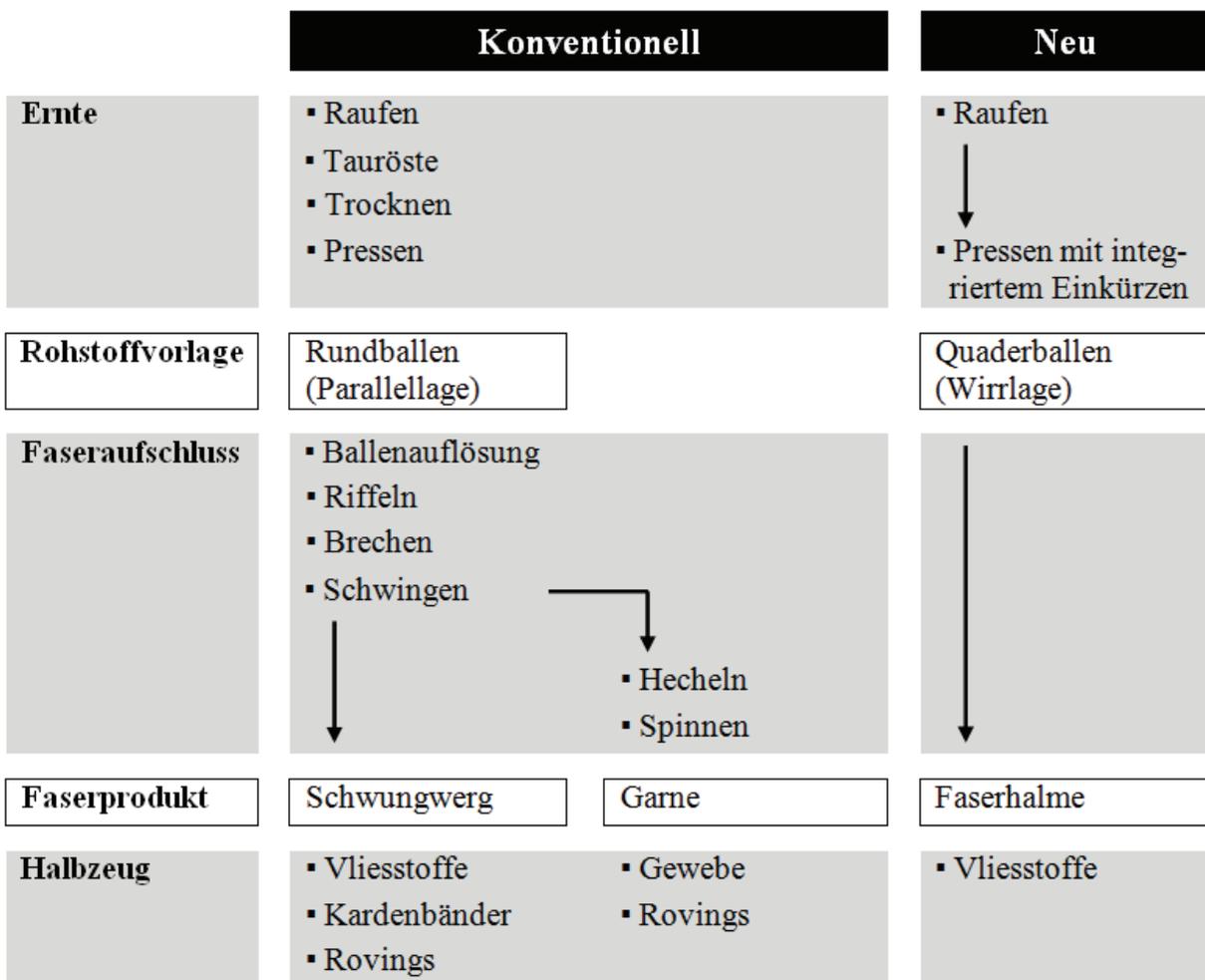


Abb. 2: Konventionelle Flachsfasergewinnung und neues Verfahren der Rohstoffbereitstellung

Basierend auf eigenen Untersuchungen an der Professur SLK der TU Chemnitz ist es erstmalig gelungen, Flachfasern im naturgegebenen Verbund und damit unter Verzicht auf den verlustreichen und aufwendigen Faseraufschluss als Ganzpflanzenrohstoff für die großseriennahe Fertigung technischer Halbzeuge bereitzustellen (**Abb. 2**). Dadurch können entlang der gesamten Wertschöpfungskette die Materialverluste reduziert und die Ressourceneffizienz erheblich erhöht werden (näheres siehe [Got07, RKN⁺07, GWP⁺10]). Die wissenschaftlichen Arbeitsschwerpunkte im Bereich der Rohstoffbereitstellung umfassen dabei die Entwicklung einer verarbeitungsfähigen Rohstoffvorlage mit reproduzierbaren Eigenschaften aus einheimischen Flachspflanzen, die Ermittlung des Einflusses ausgewählter Rohstoffparameter auf die Halbzeug- und Werkstoffeigenschaften sowie den Nachweis verlustarmer Weiterverarbeitung zum konfektionierten Mattenhalbzeug.

3.2 Faserhalbzeuge und Verarbeitungstechnologien

Aus den textilen und technischen Naturfasern lassen sich verschiedene Halbzeuge herstellen, wobei grundsätzlich zwischen reinen Faserhalbzeugen (z. B. Rovings, Geweben und Vliesstoffen) und Verbundhalbzeugen, wie z. B. SMC (Sheet Molding Compound) und BMC (Bulk Molding Compound), unterschieden wird (vgl. [LMR02, HNR97, SKB02, HKA01]; **Abb. 3**). In Kombination mit thermoplastischen oder duromeren Matrixkomponenten werden diese Halbzeuge unter Einsatz formgebender Verfahren zu Bauteilen verarbeitet. Basierend auf diesen naturfaserorientierten Fertigungstechnologien wird insbesondere in [Kno00, LR05, SFZ02, Med08] eine ganzheitliche Optimierung sowohl der Naturfaserhalbzeuge als auch der Verarbeitungsverfahren aufgezeigt.

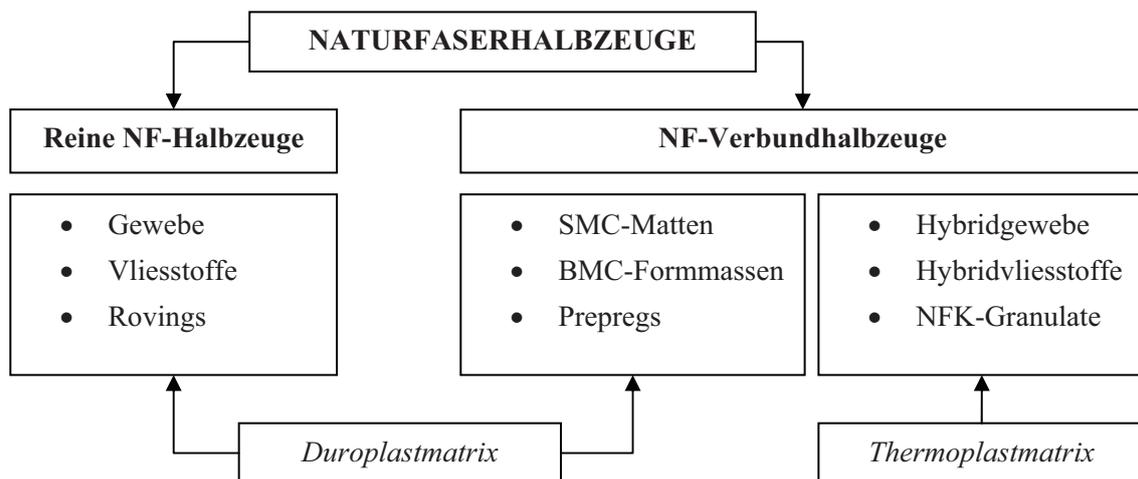


Abb. 3: Klassifizierung der Naturfaserhalbzeuge für technische Anwendungen in Abhängigkeit von Zusammensetzung und Matrixmaterial

Im Automobilbau kommen oft Halbzeuge aus Kurzfasern und Reaktionsharz zum Einsatz (SMC, BMC). Deren Verarbeitung erfolgt im Fließpressverfahren, wobei ein vorgefertigtes Gemisch aus Kurzfasern und Harz in beheizten zweiteiligen Werkzeugen zu Bauteilen geformt wird [DIN EN 14598]. Die SMC-Halbzeuge liegen dabei in einer vorkonsolidierten Form als Harzmatten vor. Im Unterschied dazu

bestehen die BMC-Halbzeuge aus einer hochviskosen fließfähigen Formmasse und werden erst nach der Formfüllung verfestigt. Beide Halbzeugvarianten weisen einen relativ niedrigen Faservolumenanteil auf, der zu entsprechend geringen Festigkeiten im Bauteil führt. Dennoch sind derartige Halbzeuge aus Kostengründen zur Substitution der glasfaserbasierten Materialien für Anwendungsbeispiele wie Karosserieaußenteile und Unterbodenverkleidungen interessant (siehe etwa [MSB⁺07, BMS⁺05]).

Die technischen Textilien in Form von Naturfasergeweben spielen für die Bauteilverstärkung aufgrund des ungünstigen Preis-Leistungs-Verhältnisses eine untergeordnete Rolle (siehe z. B. [SRT⁺11]). Die Herstellung des Naturfasergewebes setzt die Bereitstellung kostenintensiver textiler Langfasern als Garn und Roving mit hoher Qualität voraus. Der damit verbundene erhebliche technologische Aufwand beeinflusst die Produktwirtschaftlichkeit negativ [Lan98]. Gleichzeitig werden die Fasern im textilen Fertigungsprozess durch mechanische und ggf. chemische Belastung derart vorgeschädigt, dass im Bauteil lediglich ein geringer Teil der theoretisch erzielbaren Kennwerte erreicht wird (vgl. [Föl95]).

Aus diesen Gründen finden die Naturfasergewebe in der Regel nur in Demonstrations- und in Designprodukten Anwendung. Ein Beispiel dafür ist die Karosserie des Bioconcept-Cars (**Abb. 4**), wobei hier ein Leinen-Gewebe in Kombination mit einem Matrixharz aus nachwachsenden Rohstoffen zum Einsatz kam. Der mehrschichtige Laminataufbau gewährleistet dabei eine hohe Tragfähigkeit und Formstabilität des Verkleidungsbauteils bei gleichzeitig geringem Gewicht [RLW06].



Abb. 4: Bioconcept-Car (links: NFK-Kotflügel und -Stoßstange; rechts: Testfahrzeug mit NFK-Anbauteilen)

Eine weitere Halbzeugart stellen Naturfaser-Rovings dar, die im sog. Natural-Fibre-Injection-Verfahren (NFI) zu flächigen Bauteilen verarbeitet werden. Die Zuführung der Naturfasern erfolgt in Endlosform, wobei die Rovings für die Weiterverarbeitung von Spulen abgewickelt werden. Im NFI-Verfahren werden die Rovings vor der Tränkung mittels eines Speziälschneidkopfes abgelängt, zusammen mit einem duromeren Bindemittel luftunterstützt in das Formwerkzeug ausgetragen und anschließend im Pressvorgang unter Temperatur und Druck zum Fertigteil geformt [FS04]. Der Faseranteil dieser Bauteile liegt bei ca. 40 Gew.-% und ist im Vergleich zu Herstellungsverfahren, die Naturfasermatten als Halbzeuge nutzen, sehr gering. Anwendungsbeispiele für dieses Verfahren sind u. a. Hutablagen und Türverkleidungen im Fahrzeugbau.

In der Praxis kommen Naturfaserhalbzeuge vorwiegend in Form von Wirrfasermatten zum Einsatz. Derartige Vliesstoffe bestehen aus einer gleichmäßigen Faserschicht aus vornehmlich Flachs-, Hanf- oder Sisalfasern (z. B. [Rie01, Spe02, GKK+04, BK99, ML02]). Unter Einsatz verschiedener Verfestigungsmethoden werden die Naturfaservliese zu einem zusammenhängenden Mattenhalbzeug fixiert, wobei diese Verfahren einen wesentlichen Einfluss auf die technologischen Halbzeugeigenschaften besitzen. Je nach Wirkprinzip erfolgt eine Unterscheidung der Verfestigungsmethoden in thermische (z. B. Thermobonding), chemische (z. B. Dispersionsklebstoffe) und mechanische (z. B. Vernadelung, Maliwat, Malivlies, Wasserstrahlverfestigung) (vgl. [BS92, MSL⁺04, Ode03, Müs99]). Insbesondere dem Vernadeln kommt aufgrund der Prozesseffizienz, -flexibilität und -wirtschaftlichkeit ein hoher Stellenwert zu.

Reine Naturfasermatten werden häufig in Verbindung mit duromeren Matrixharzen presstechnisch weiterverarbeitet [AHS01, Wil02, FM98, PS00, KRL⁺06]. Zudem können Nadelvliese einen definierten Anteil an thermoplastischen Kunstfasern enthalten, die später bei der Konsolidierung zum Bauteil aufgeschmolzen werden und somit die Rolle der Matrix übernehmen [KN97]. Bei den duroplastgebundenen Naturfaservliesen lassen sich im Verbund Naturfaseranteile von über 80 Gew.-% erreichen (z. B. [CGG⁺02, MSL⁺03]). Im Vergleich dazu werden bei Naturfaservliesstoffen mit Thermoplastmatrix (sog. Hybridvliese) in der Regel ca. 50 Gew.-% verwendet, wobei die Steigerung des Naturfaseranteils aufgrund ungenügender Benetzung keine signifikante Erhöhung der mechanischen Eigenschaften zulässt (siehe etwa [RMH⁺08, BKL⁺99]).

Die o. g. Halbzeugvarianten sind hinsichtlich der Herstellung auf die natürliche Einzelfaser als Rohstoff angewiesen. Durch die hohen Materialverluste bei der erforderlichen Fasergewinnung wird die Wirtschaftlichkeit derartiger Naturfaserhalbzeuge erheblich gemindert und die fortschreitende Etablierung dieser Materialien in der Technik gebremst. Demgegenüber bieten die hier betrachteten Ganzpflanzenrohstoffe ein enormes Potenzial im Hinblick auf die erzielbare Material- und Kosteneffizienz der Naturfaserhalbzeuge [RBS⁺10]. Allerdings fehlen hierfür grundlegende Untersuchungen zu Verarbeitungsprozessen und zugehörigen Schnittstellen sowie zur werkstoffmechanischen und strukturellen Eigenschaftscharakteristik in Abhängigkeit von Fertigungsrestriktionen.

3.3 Naturfaserverstärkte Bauteile in der Technik

Zahlreiche Bauteile auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen kommen im automobilen Bereich zum Einsatz. Klassische Anwendungsbeispiele sind hier vor allem die Verkleidungsbauteile des Fahrzeuginterieurs wie Türverkleidungen, Sitzrückenlehnen, Kofferraumauskleidungen und -böden, Hutablagen und komplette Instrumententafeln (siehe etwa [Sch97, KZ02, Fis04, BM01, KS97, PBK04, Wit94]). Dabei werden sowohl duroplastische als auch thermoplastische Matrixmaterialien verwendet. Während duroplastgebundene NFK hohe Struktursteifigkeiten und -festigkeiten aufweisen, bieten die Thermoplastvarianten Vorteile bezüglich One-Step-Kaschierung und Anbringung von Befestigungselementen an das Bauteil (vgl. [Jac06, ML02, Har01, BM01, BGW⁺08]). Derartige naturfaserverstärkte Bauteile werden nicht nur in PKWs, sondern auch in Nutz- und Schienenfahrzeugen eingesetzt.

Zu den ersten naturfaserverstärkten Exterieurbauteilen hoher Qualität zählen Ersatzrad-Muldenabdeckungen, die seit 2004 in einigen Personenfahrzeugen der Marke Mercedes serienmäßig eingebaut werden [Gre06]. Dabei kommt die verrottungsbeständige und reißfeste Abaca-Faser in Verbindung mit Polypropylen-Matrix zum Einsatz. Weitere Anwendungsbeispiele von NFK im Fahrzeugexterieur sind Beplankungen von MAN-Linienbussen [MSB⁺07], Unterbodenverkleidungen der Mercedes A-Klasse und Karosserieteile des Bioconcept-Cars. Das neue Ökomobil "Nios" besteht zu 70% aus regenerativen Materialien und wiegt nur 160 kg.

Im nicht automobilen Bereich sind Einzelanwendungen bei Schienenfahrzeugen (z. B. Luftsäulen- und Sitzkastenverkleidungen), bei Sportgeräten (Fahrradrahmen, Golf-Tees, Griffe etc.) und bei Konsumgütern (Koffer, Geschirr, Gehäuse der Haushaltsgeräte etc.) bekannt (vgl. [Tro01, WL04, Wic03]). Diese Produkte stellen Nischenanwendungen dar, leisten jedoch einen Beitrag zur Erweiterung des Anwendungsspektrums der NFK.

Der Einsatz von Naturfasern zielt bei den meisten dieser Anwendungen auf die Kombination von Leichtbau, Ökologie und Kosteneffizienz (siehe z. B. [EGH⁺01, EG01, BK99, RGK⁺05]). Dank dieser Synergieeffekte konnten sich die NFKs insbesondere gegenüber den herkömmlichen und glasfaserverstärkten Kunststoffen in technischen Anwendungsbereichen durchsetzen. Bisher wurden zur Auslegung derartiger Bauteile in der Regel nur konventionelle Gestaltungsprinzipien angewendet, sodass ein verstärkter Bedarf an grundlegend neuen Konstruktions- und Auslegungsmethoden für diese Werkstoffklasse besteht [BGJ⁺09].

Der Leichtbau ist gegenwärtig ohne computerunterstützte Bauteilentwicklung und numerische Produktsimulation kaum vorstellbar. Hochentwickelte Berechnungsprogramme werden heute bei der Gestaltung und Auslegung komplexer Leichtbaustrukturen mit Hochleistungsfasern wie Glas- und Kohlenstofffasern standardmäßig eingesetzt (vgl. [KBW⁺10, KM10, KU10]). Bei naturfaserverstärkten Kunststoffen sind Streuungen innerhalb der Fasereigenschaften Störfaktoren für eine realitätsnahe Berechnung der späteren Bauteileigenschaften [CO04], was die Ausschöpfung des Festigkeitspotentials für technische Anwendungen stark einschränkt. Außerdem wird der Einfluss der Herstellungsparameter auf die mechanischen Werkstoffkennwerte nur ungenügend berücksichtigt. Insbesondere bei naturfaserverstärkten Formpressbauteilen spielt die Abhängigkeit dieser Kennwerte von der Materialdichte eine wesentliche Rolle für die Ausschöpfung des hohen Leichtbaupotenzials.

Initiiert durch die fortschreitende Entwicklung numerischer Berechnungs- und Simulationsmethoden sind seit 1995 wissenschaftliche Arbeiten bekannt, die die rechengestützte Bauteilauslegung (CAE: Computer Aided Engineering) mit naturfaserverstärkten Kunststoffen umsetzen (vgl. [GCB01, GHP00, LRA03]). Für die spritzgießtechnisch hergestellten Bauteile mit Kurzfaserverstärkung existieren bereits zuverlässige Berechnungsmodelle, die einen durchgängigen Simulationsprozess erlauben [HS04, GBB⁺04]. Bei den Formpressteilen auf Basis von flächigen Naturfaserhalbzeugen gestaltet sich die Simulation komplexer. Die resultierenden Werkstoffkennwerte hängen hierbei nicht nur von den Faser- und Matrixanteilen sowie der Faserausrichtung, sondern auch von der im Fertigungsprozess schwer erfassbaren mehraxialen Halbzeugverformung und Materialverdichtung ab. Zudem wird im Allgemeinen von herkunftsbedingten Qualitätsschwankungen bei Naturfasern ausgegangen, die zu ungenauen Berechnungsergebnissen führen, was allerdings von CHEVALLIER et al. in [CGG⁺02] relativiert wird. Das dort numerisch untersuchte

Umformverhalten basiert bereits auf Erkenntnissen zum anisotropen Deformationsverhalten der Naturfaservliesstoffe unter Einschränkung auf schädigungsfreie Umformgrade. Im Vordergrund der Analyse steht dabei die Entwicklung eines auf dem Krupkowsky-Modell basierten Materialgesetzes für Holzformstoffe „Lignoprop“ und „Lignoflex“, das anschließend für die Simulation mittels PAM-Form (ESI Group) Verwendung findet. Der funktionale Zusammenhang zwischen den lokalen mechanischen Werkstoffkennwerten und der lokalen Materialdichte bleibt hierbei unberücksichtigt.

Die Untersuchung der Abhängigkeit der Werkstoffkennwerte von der Materialdichte erfolgte in ersten Ansätzen durch WUZELLA [Wuz06] für konventionelle Kenaf-, Flachs- und Hanffaser als Verstärkungsfasern. Hierfür wurden Biegefestigkeit und Biegemodul als Funktion der Bauteildichte ermittelt und in Diagrammform analysiert. In [GCS⁺08] ist darüber hinaus die Dickenabnahme von Formpressbauteilen infolge der lokalen Halbzeugausdünnung im Umformprozess unter Einsatz moderner Messsysteme untersucht worden. Hierauf aufbauend wurden konstruktive Hinweise für Pressspaltanpassung zur Umsetzung einer homogenen Halbzeugkomprimierung abgeleitet, wobei wichtige Aussagen zur belastungsgerechten Bauteilauslegung unter Berücksichtigung der Korrelation von Bauteilkennwerten und Materialdichten fehlen.

Die bisher gesammelten Erkenntnisse und Erfahrungen bei der Entwicklung von NFK-Bauteilen finden ihren Niederschlag in Konstruktionskatalogen für naturfaserverstärkte Kunststoffe [BGJ⁺09, BBD⁺10]. Diese Gestaltungsrichtlinien fokussieren schwerpunktmäßig das Umformverhalten von Naturfaserhalbzeugen und die zugehörigen Verfahrensrestriktionen. Für die Gestaltung von Formpressteilen werden – unter Beachtung der praktischen Erfahrungen der OEMs (Original Equipment Manufacturer) – gleichmäßige Wanddicken gefordert und Empfehlungen zum Vermeiden von Wanddickenunterschieden im Bauteil abgeleitet. Die Forderung nach gleichmäßigen Wanddicken widerspricht dem eigentlichen Leichtbauprinzip, bei dem eine Konturveränderung über die Dicke in der Regel eine masseffiziente Bauteilkonstruktion zur Folge hat. Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen der Arbeit der Ansatz verfolgt werden, die materialspezifische Abhängigkeit der mechanischen Werkstoffkennwerte von der lokalen Bauteildichte für die belastungsgerechte Bauteilauslegung in Leichtbauweise gezielt anzuwenden.

4 Entwurf einer durchgängigen Prozesskette

4.1 Rohstoffbereitstellung

Die Fasergewinnungsverfahren fokussieren vor allem die Flachs- und Hanf-Langfaserproduktion für textile Anwendung, wobei die technischen Bastfasern als Nebenprodukt anfallen. Die Fasergewinnungslinien sowie Verarbeitungsanlagen für technische Naturfasern werden entsprechend den branchenspezifischen textilen Prozessen ausgelegt, sodass eine starke Abhängigkeit zwischen Rohstoffbereitstellung und Halbzeugherstellung vorliegt.

Als Folge der Verlagerung der westeuropäischen Spinnereikapazitäten vorwiegend nach Asien und der Trendabhängigkeiten im Textilsektor entstehen Nachfragemonopole, die sich auf das Nebenprodukt Flachswerg als einer der Hauptrohstoffe für technische Anwendungen mengen- und kostenmäßig auswirken. Die fallende Nachfrage nach Bekleidungstextilien und die damit verbundene Reduzierung der Anbauflächen ziehen zudem eine Verringerung der verfügbaren technischen Bastfaserkapazitäten nach sich. Ferner spielt bei der Rohstoffbereitstellung das witterungs- und klimabedingte Risiko aufgrund des fortschreitenden Klimawandels eine zunehmend wichtige Rolle, da die Umgebungsbedingungen im Erntefenster nur noch schwer einzuschätzen sind. Daraus folgt, dass in der Zukunft für die technisch verwertbaren Pflanzen Flachs oder Hanf die Erntetechnologien mit einer verminderten Witterungsabhängigkeit immer mehr an Bedeutung gewinnen werden.

Bei der Verwendung der neuen Ganzpflanzenrohstoffe ist die Abhängigkeit von der Textilbranche nicht mehr vorhanden, da die gesamte Pflanze zum technischen Halbzeug weiterverarbeitet wird. Damit kann die Bereitstellungstechnologie gezielt für die technische Anwendung optimiert werden. Weiterhin entfallen lange Feldliegezeiten, wodurch das Witterungsrisiko drastisch reduziert wird. Die Etablierung derartiger Naturfaserrohstoffe in der Technik setzt allerdings die Entwicklung durchgängiger Prozessketten von der Pflanze bis zum Bauteil voraus. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll repräsentativ für den Ganzpflanzenrohstoff Grünflachs eine derartige Prozesskette entwickelt und validiert werden, wobei ein besonderes Augenmerk auf die Halbzeugherstellung, Bauteilauslegung und -fertigung gelegt wird.

4.1.1 Varianten von Rohstoffvorlagen

Ganzpflanzenrohstoffe sind naturfaserhaltige Materialien, die unter Umgehung des Faseraufschlussprozesses aus Komplettpflanzen gewonnen werden und dementsprechend ihre naturgegebene Zusammensetzung aus Pflanzenfasern und -reststoffen (wie Schäben und Kittsubstanzen) während der Halbzeug- und Bauteilherstellung beibehalten. Diese neuen Naturfaserrohstoffe weisen demnach im Vergleich zu klassischen Naturfasern eine höhere Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit auf.

Die Bereitstellung des landwirtschaftlichen Ganzpflanzenrohstoffs hoher Qualität in industrierelevanten Mengen kann in Form eines Rundballens oder eines Quaderballens erfolgen. Im Rundballen liegen die gerauften Pflanzenhalme herstellungsbedingt annähernd kollinear zur Ballenachse, wobei die aufgewickelten Einzelschichten zur besseren Ballenauflösung bei der Weiterverarbeitung jeweils durch zwei Bindegarne voneinander getrennt sind (vgl. **Abb. 5**). Der Quaderballen weist hingegen eine

regellose Anordnung der Pflanzenstängel auf und ist in der Regel für Transport und Handhabung mit einem umlaufenden Stahldraht verfestigt (siehe **Abb. 5**).

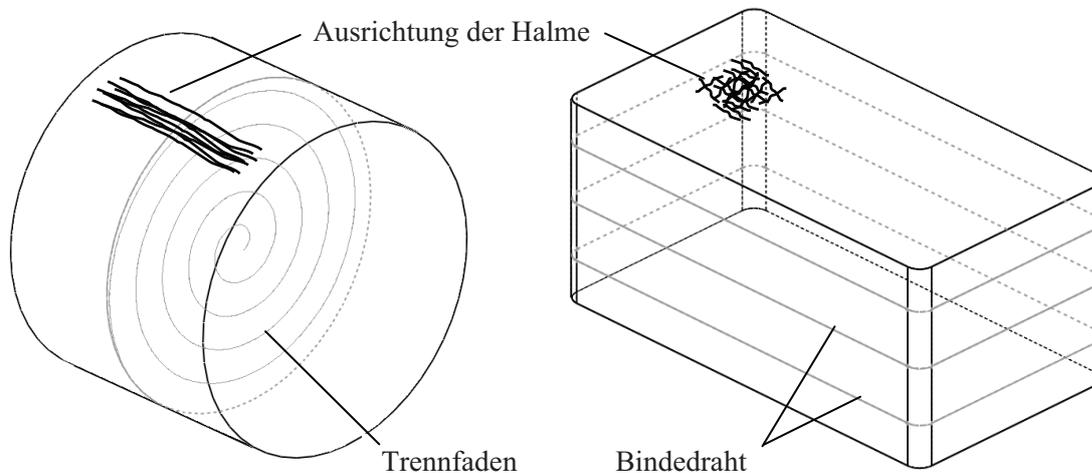


Abb. 5: Schematische Darstellung eines Rundballens und eines Quaderballens

Traditionell wird das felderöstete Flachstroh in Rundballen für die Langfasergewinnung bereitgestellt, da zur optimalen Faserentholzung die Parallellage der Pflanzenhalme erforderlich ist (vgl. **Abb. 2**). Eine derartige strukturelle Ballenausführung ist allerdings aufgrund eines erheblichen Aufbereitungsaufwands für den hier betrachteten neuen Prozess zur Herstellung von GPR-Bauteilen ungeeignet. Im Unterschied dazu bringt die Halmanordnung des Quaderballens folgende Vorteile mit sich:

- Geringer Transportaufwand und höherer Lagernutzungsgrad
- Hohe Effizienz der Erntemaschinen und -ausrüstungen zum Pressen
- Durchführung erster Schritte der Rohstoffaufbereitung direkt auf dem Feld
- Weiterverarbeitung auf Standard-Ballenauflösern industrieller Vliesanlagen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass für die angestrebte Technologieentwicklung der Quaderballen als Rohstoffvorlage besonders prädestiniert ist.

4.1.2 Qualitätsmerkmale und erfassbare Parameter

Der GPR Grünflachs ist ein landwirtschaftlicher Rohstoff, der in der Regel starke Eigenschaftsstreuung aufweist. Eine Verarbeitung dieses Rohstoffes auf Standardvliesanlagen zu einem industriellen flächigen Halbzeug mit reproduzierbaren Eigenschaften erfordert die Einhaltung prozessspezifischer Qualitätskriterien. Die Anforderungen an das Pflanzenmaterial können anhand der Vorgaben zu Pflanzenreife, Röstgrad, Lagerfähigkeit, Dosierung bei der Vlieslegung und Emissionsprofil ausreichend genau definiert werden. Die aufgezählten Qualitätsmerkmale der Pflanzenbiomasse lassen sich in Form der in **Tabelle 1** dargestellten Parameter erfassen.

Die Pflanzenreife hat einen bedeutenden Einfluss auf die Festigkeit sowohl der Elementarfasern (Fibrillen) als auch der Bastbündel, in denen die Fibrillen verklebt mit natürlichen Kittsubstanzen (z. B. Lignin und Pektin) vorliegen. Das Entwicklungsstadium der Pflanzen kann in der Regel an der Farbe des

Flachsstrohs erkannt und ein optimaler Erntezeitpunkt bestimmt werden. Nach DAMBROTH [DS88] wird zwischen Grün-, Gelb-, Voll- und Überreife unterschieden. Für die GPR-Verwertung muss das Faserstroh vorzugsweise in der Phase der Gelbreife – gelbgrüner Farbton – geerntet werden. Zu diesem Zeitpunkt erzielen die Bastfasern ihre nahezu maximale Festigkeit und der Komponentenzusammenhalt ist durch eine hohe Adhäsionskraft gekennzeichnet.

Tabelle 1: Qualitätsmerkmale und Messgrößen des Pflanzenrohstoffs

Qualitätsmerkmale des GPR	Messgrößen
Pflanzenreife und Röstgrad	Farbton
Lagerfähigkeit	Restfeuchtegehalt
Dosierung bei der Vlieslegung	Mittlere Stapellänge, Längenverteilung
Emissionsprofil	Geruchsnote

Bei ungünstigen Witterungsbedingungen kann während der Feldtrocknung des Erntegutes unter Einwirkung von Bakterien und Pilzen ein Gärungsprozess, das sog. Anrösten der Pflanzenstängel, eingeleitet werden. Der Fortschritt des Röstprozesses (Röstgrad) wird in der Praxis ebenfalls anhand der Farbtonveränderung des Pflanzenmaterials von gelbbraun bis grauschwarz bestimmt. Die Mikroorganismen lösen das Pektin der Mittellamellen auf und legen die Bastfasern frei. Dadurch kann der Zusammenhalt der Stängelbestandteile essentiell beeinträchtigt werden, was bei industrieller Weiterverarbeitung als Ganzpflanzenrohstoff zu hohen Materialverlusten führt. Somit lässt sich als wesentliche Forderung die Unterbindung von Röstprozessen und die Herstellung von Grünflachsstroh (ungeröstetes Flachsstroh) ableiten.

Dem Pressen des Quaderballens kann der Aufbereitungsschritt des Pflanzenhalmzuschnittes vorgeschaltet werden, um so dosierfähiges Stängelmateriale für eine spätere Vlieslegung direkt auf dem Feld wirtschaftlich zu erzeugen. Das Ergebnis wird durch mittlere Stapellänge und Längenverteilung nach Auswertung einer Stichprobe charakterisiert. Die Überlängen können bei der Dosierung mittels Dosierwalzen mit scharfen Garnituren unerwünschte Wicklungen verursachen, die den Dauerbetrieb der Verarbeitungslinie behindern. Die Stängelabschnitte mit einer unterkritischen Länge führen zu erhöhten Materialverlusten an den Übergabestellen der Vliesanlage. Die tolerierbaren Unter- und Obergrenzen für die Längenverteilung der Stängelstücke sind maschinenabhängig und können erst bei der Halbzeugfertigung auf einer konkreten Vliesanlage ermittelt werden.

Der Quaderballen als Rohstoffvorlage unterliegt bei der Qualitätssicherung hinsichtlich Verarbeitung und Handhabung der Kontrolle des Ballengewichts, der Ballengröße und des Fremdkörperanteils (siehe **Tabelle 2**). In der Regel liegt das Ballengewicht im Bereich von 300 bis 350 kg bei Abmessungen von ca. 0,8 m x 1,2 m x 2,5 m. Fremdkörpereinschlüsse sind ertetechnisch bedingt und kommen in Form von Steinen, Kunststofffolien, Blechdosen, Metalldrähten usw. vor. Derartige Fremdkörper führen zu Problemen bei der industriellen Halbzeugherstellung und müssen durch entsprechende Qualitätsmaßnahmen nahezu eliminiert werden.

Tabelle 2: Qualitätsmerkmale und Messgrößen der Rohstoffvorlage (Quaderballen)

Qualitätsmerkmale der Rohstoffvorlage	Messgrößen
Ballengewicht	Masse
Ballengröße	Abmessungen
Fremdkörperanteil	Art, Größe, Anzahl der Fremdkörper

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Bereitstellung des neuartigen Naturfaserrohstoffes Grün-flachs für die Verwertung in technischen Halbzeugen entsprechend den definierten Kriterien grundsätzlich praktikabel ist. Je nach Anforderung muss dieser Prozess hinsichtlich Schnittlänge und Ballengröße detailliert auf die Halbzeugfertigung abgestimmt werden.

4.2 Technologien zur Halbzeugherstellung

4.2.1 Anforderungen an technische Naturfaserhalbzeuge

An die technischen Naturfaservliesstoffe für Automobilanwendungen werden im Allgemeinen Anforderungen hinsichtlich der Materialzusammensetzung, des Flächengewichtes, des Feuchtegehaltes, der Oberflächenausrüstung, Lieferform, Verpackung und Haltbarkeit gestellt. Die Einhaltung von vorgegebenen Grenzwerten bei der Halbzeugherstellung soll reproduzierbare Produkteigenschaften sicherstellen und eine zehn- bis zwanzigjährige Funktionstüchtigkeit der Formteile garantieren.

Das detaillierte Anforderungsprofil für ein Naturfaserhalbzeug wird in Abhängigkeit von der geplanten Anwendung, den wirkenden Belastungen und der ausgewählten Technologie zur Bauteilherstellung spezifiziert. Als Grundlage für die Erarbeitung des Lastenheftes für den betrachteten Naturfaservliesstoff dienen oftmals die Liefervorschriften des OEM, anhand derer der Zulieferer einen eigenen Anforderungskatalog erstellt und an den Halbzeughersteller weiterleitet. Dieser Hersteller ermittelt ein geeignetes Prozessfenster für die vorhandene Anlagentechnik. In mehreren iterativen Schritten werden die Prozessparameter optimiert mit dem Ziel, eine robuste, reproduzierbare Fertigungskette für Halbzeuge hoher Qualität aufzubauen. Für das in dieser Arbeit ausgewählte repräsentative Bauteil einer Türverkleidung mit Duroplastmatrix sind die Bauteil- und Halbzeuganforderungen gemäß der o. g. Vorgehensweise in **Tabelle 3** dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass bei der Spezifikation des Anforderungsprofils für das Naturfaserhalbzeug im Vergleich zu NFK-Strukturbauteilen einige Prüfmerkmale verschärft werden. Dazu zählen etwa die zulässigen Schwankungen des Flächengewichtes und der maximale Feuchtigkeitsgehalt des Pressbauteils. Dennoch bietet der gezeigte Anforderungskatalog dem Halbzeughersteller eine hohe Flexibilität bei der Gestaltung der Vliesstofffertigung. So werden die wesentlichen Maschineneinstellungen bei der Vlieslegung und bei der Vliesverfestigung basierend auf Erfahrungen des Halbzeugproduzenten definiert und anschließend über die Abmusterung in Formwerkzeugen des Kunden validiert. Anhand der auf Basis dieser Fertigungsstudie gewonnenen Erkenntnisse wird das Prozessfenster für eine wirtschaftliche und ressourceneffiziente Serienfertigung angepasst.

Tabelle 3: Bauteil- und Halbzeuganforderungen für den Bauteiltyp „Türverkleidung“ anhand der verfügbaren Liefervorschriften

BAUTEIL-ANFORDERUNGEN				
Größe	Einheit	Norm	OEM 1	OEM 2
Dicke	mm	DIN EN 325	1,55...2,2	2,0...2,4
Dichte	g/cm ³	DIN EN 323	0,6...1,2	0,7...1,0
Harzanteil	%	keine	35...50	35...50
Flächengewicht	g/m ²	DIN EN 323	1300...1800	1550...1850
Zugfestigkeit	MPa	EN ISO 527-4	≥ 20...35	keine Vorgaben
Bruchdehnung	%	EN ISO 527-4	≥ 1,0	keine Vorgaben
Biegemodul	MPa	EN ISO 14125, DIN EN 310	≥ 3000...4000	≥ 3000
Biegefestigkeit	MPa	EN ISO 14125, DIN EN 310	≥ 40...80	≥ 50...80
Höchstbiegekraft	N	DIN EN 310	keine Vorgaben	≥ 180
Schlagzähigkeit	kJ/m ²	EN ISO 179	≥ 5...12	≥ 8...12
Wasseraufnahme	%	DIN EN 322	≤ 40	≤ 40...60
Dickenquellung	%	DIN EN 322	≤ 10...25	≤ 15...20
Feuchtigkeitsgehalt	%	DIN 52351	keine Vorgaben	≤ 3...6
Fogging	mg	DIN 75201	≤ 1,5	≤ 1,0
VOC-Wert	ppm	VDA 278	≤ 100	≤ 100
FOG-Wert	ppm	VDA 278	≤ 250	≤ 250
Geruchstest	keine	VDA 270	≤ 3	≤ 3
HALBZEUG-ANFORDERUNGEN				
Prüfmerkmal		Norm	Sollvorgabe	Toleranz
Material		keine	Vorgaben OEM: z. B. Flachs 55% / Sisal 45%	keine Vorgaben
Flächengewicht, g/m ²		DIN 29073	1000	± 5%
Feuchte bei Verpackung		DIN 52351	≤ 6%	keine Vorgaben
Feuchtigkeitsgehalt Pressteil		DIN 52351	≤ 3%	keine Vorgaben
Länge/Breite, mm		keine	Vorgaben OEM	± 10 mm
Inhaltsstoffe in Zukaufteilen		keine	Vorgaben OEM	keine Vorgaben
Haltbarkeit		keine	z. B. 5 Monate	keine Vorgaben

Die in **Tabelle 3** angegebenen Bauteilkennwerte können durch Einsatz von verschiedenen Naturfasern erzielt werden. Oft wird die Auswahl der geeigneten Faserart dem zuständigen Zulieferer überlassen, sodass dieser ausgehend vom eigenen Technologiestand die konkrete Faserzusammensetzung definiert und an den beauftragten Halbzeugproduzenten weiterleitet. Bei der Festlegung geeigneter Naturfasern gelten nach BECKMANN [BK99] folgende Kernaussagen:

- Hohe mechanische Bauteil-Eigenschaften → feinere und längere Fasern hoher Festigkeit

- Splitterverhalten gering → biegeelastische Fasern
- Bauteil-Fogging gering → Faser-Fogging gering
- Bauteil-Geruch gering → Faser-Geruch gering
- Klima-Beständigkeit der Bauteile → Klima-Beständigkeit der Fasern.

Gegenüber den klassischen Naturfasern weist der hier betrachtete GPR Grünflachs deutliche Vorteile hinsichtlich der Faserfestigkeit und des Emissionsverhaltens auf. Für die kosteneffiziente Halbzeugherstellung sind jedoch die technologischen Eigenschaften wie eine reproduzierbare Faserlängenverteilung im Ballen, eine gute Dosierbarkeit auf Standard-Dosiereinrichtungen und ein geringer Materialverlust von hohem Stellenwert.

4.2.2 Verfahrensvarianten zur Halbzeugherstellung

Der Herstellungsprozess von technischen Vliesstoffen lässt sich grundsätzlich in folgende Schritte unterteilen: Rohstoffaufbereitung, Vliesbildung, Vliesverfestigung und optional Vliesstoffveredelung. Nach der Systematik gemäß [Lei00] können die Herstellungsmethoden für Vliesstoffe in Trocken-, Naß- und Extrusionsverfahren gegliedert werden, wobei die Verarbeitung von technischen Naturfasern vorzugsweise im Trockenprozess erfolgt. Im Trockenverfahren können Parallel-, Kreuzlagen- und Wirrvliese gebildet und anschließend mechanisch, thermisch oder chemisch zu einem stabilen Halbzeug verfestigt werden. Für die Interieur-Verkleidungsbauteile im Automobilbau sind, bedingt durch die umformtechnische Weiterverarbeitung, reißfeste Faserhalbzeuge mit einer homogenen Flächengewichtsverteilung und isotropen Eigenschaften von besonderem Interesse. Ein derartiges Eigenschaftsspektrum kann speziell mit Wirrfaservliesstoffen, sog. Naturfasermatten, erreicht werden.

Die detaillierten Prozessschritte und zugehörigen Verarbeitungsanlagen sollen am Beispiel der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Technologie zur Herstellung von naturfaserverstärkten Bauteilen in Leichtbauweise unter Einsatz von Ganzpflanzenrohstoffen dargestellt werden.

Die Aufbereitung des Faserrohstoffes im ersten Schritt der Vliesherstellung erfolgt unter der Maßgabe der Auflockerung der im Quaderballen in verdichteter Form vorliegenden Fasern und der Schaffung von gleichmäßigen Faserflocken zur Sicherstellung eines kontinuierlichen Materialflusses. Dazu werden die hochverdichteten Faserballen von den Bindedrähten befreit und mechanischen Ballenöffnern zugeführt. Im Ballenöffner unterliegt die Rohstoffvorlage der Einwirkung der Zug-, Druck- und Scherkräfte durch die mechanischen Arbeitsorgane der Verarbeitungsmaschine, wodurch die räumliche Packungsdichte der Fasern für einen kontinuierlichen Transport mit vorgegebener Durchsatzleistung verringert wird. Durch den Einsatz von mehreren Ballenöffnern kann eine zeitgleiche Verarbeitung verschiedenartiger Fasern und darüber hinaus eine Einstellung des vorgewählten Mischungsverhältnisses vorgenommen werden. Eine typische Variante des Ballenöffners ist in **Abb. 6** dargestellt. Der Rohstoff **1** wird einem horizontal angeordneten Förderband **2** zugeführt und zum Steigband **3** transportiert. Das mit speziellen Mitnahmelementen bestückte Steigband fördert das Fasermaterial nach oben, wo die Rückschlagwalze **4** überschüssige Fasern zurückführt, sodass durch die entsprechende Spalteinstellung eine definierte Materialmenge je Zeiteinheit mittels der Abstreifwalze **5** dem Steigband entnommen und durch die Fliehkraft an eine Wiegeeinrichtung **6** (Bandwaage) übergeben wird. Die Bandwaage steuert die konstante Materialzufuhr zu einem weiteren horizontalen Förderband **7** mit einem integrierten Streuwalzensystem **8**, mit

dem die entstandene Faserschicht anschließend auf ein Querförderband **9** gestreut wird. Nach einer In-Line-Fremdkörperkontrolle wird das Fasermaterial für die Weiterverarbeitung zu flächigen Halbzeugen freigegeben.

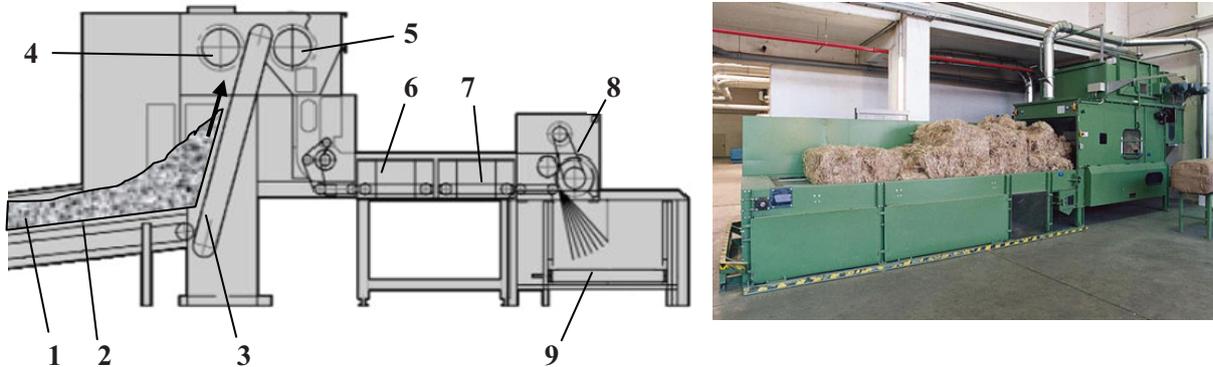


Abb. 6: Aufbau eines Universal-Ballenöffners (Quelle: Temafa, Isowood)

Die mit Hilfe des Ballenöffners vorbehandelten Fasern werden zwecks Aufschlusses und Vergleichmäßigung einem sog. Faseröffner zugeführt (siehe **Abb. 7**). Der Faseröffner verfügt über einen Füllschacht **1** mit Speisewalzen **2**, ein Förderband **3**, eine Einzugswalze **4** mit Muldenabdeckung **5**, eine Hauptwalze **6**, die mit aggressiven Sägezahnarnituren ausgerüstet ist, und einem aerodynamischen Faserabzug **7**.

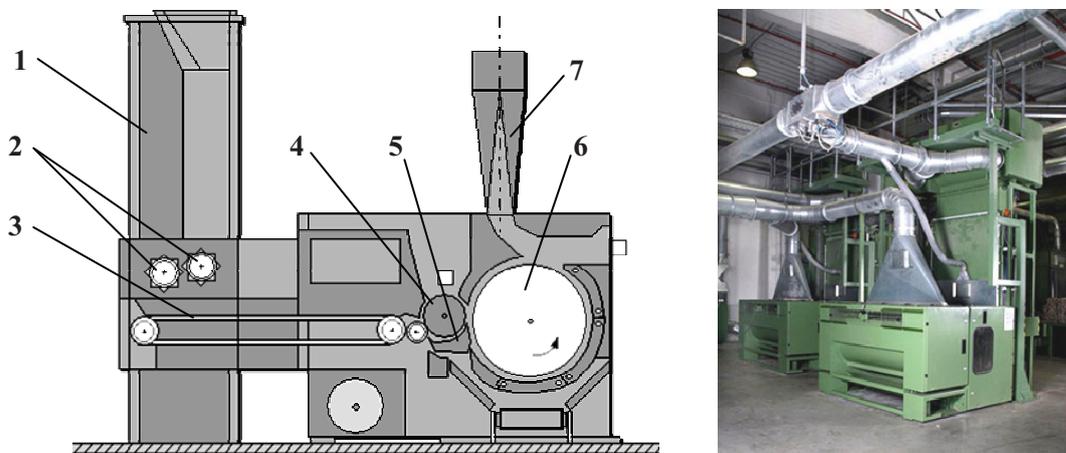


Abb. 7: Faseröffner (Quelle: Isowood)

Durch die starke mechanische Belastung des Fasermaterials im Spalt zwischen der Hauptwalze und der Muldenabdeckung erfolgt die erste Faserentwerrung und -vereinzelnung, die bei der späteren Vlieslegung durch die Krepelprozesse nochmals verbessert wird. Als Nebeneffekt tritt dabei die Verkürzung der Faserlänge ein. Das Ziel des Aufschlussprozesses mittels der Faseröffneranlage ist es, die Flockenmasse zu reduzieren, sodass eine nachgeschaltete Homogenisierung der Fasermischung in einer Mischkammer bzw. eine günstige Prozessführung auf der Vliesanlage erreicht wird. Ist der Einsatz der Mischkammer aufgrund gleichartiger Fasern oder ausreichender Faserhomogenisierung im Faseröffner nicht erforderlich, werden die Faserflocken pneumatisch in die Speisekammer der Vliesanlage befördert.

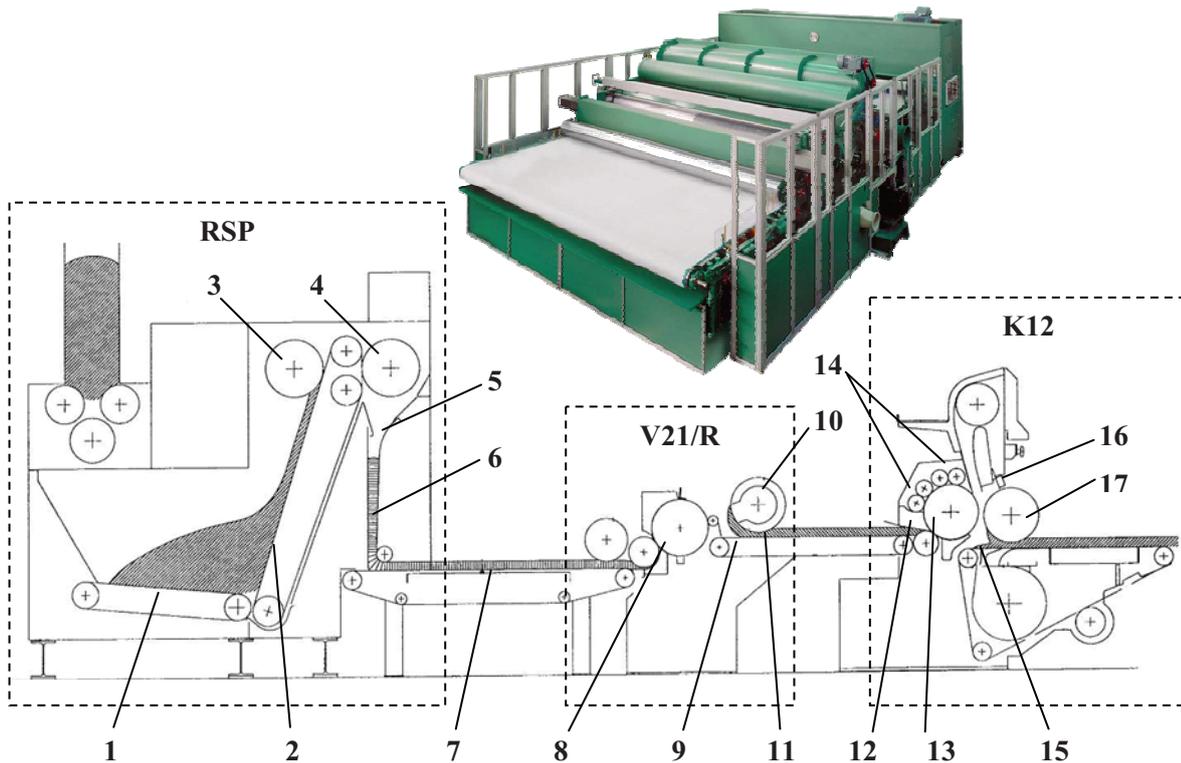


Abb. 8: Aufbau einer aerodynamischen Vliesanlage nach dem Airlay-Prinzip und zugehöriger Materialfluss (Quelle: Fehrer AG); RSP: Rüttelschachtspeiser, V21/R: Vorvliesbildner, K12: Wirrvlieskarte

Der Aufbau einer aerodynamischen Vliesanlage ist in **Abb. 8** dargestellt. Die Beschickung des Rüttelschachtspeisers (**RSP**) der Vliesanlage erfolgt durch einen Kondensator, der sich z. B. quer zur Maschinenlaufrichtung wiederholt bewegt und einen gleichmäßigen Füllstand über die gesamte Arbeitsbreite der Anlage gewährleistet. Im Kondensator werden die Trennung der Faserflocken von der Förderluft und das Abscheiden der Fasern unter der Schwerkraft vorgenommen. Im Weiteren gelangen die Fasern über ein Dosiersystem, bestehend aus Zuführband **1**, Steigband **2**, Rückschlagwalze **3** und Abstreifwalze **4**, in einen vertikalen Regulierschacht **5**, in dem das Fördergut zu einer gleichmäßigen Schichtvorlage **6** vorverdichtet wird. Nach der Umlenkung in die waagerechte Position verfährt diese Vorlage zwecks der Flächengewichtskontrolle über eine kontinuierliche Wiegeeinrichtung **7**. Eine Unter- oder Überdosierung in diesem Prozessabschnitt kann zu maßgeblichen Störungen des Gesamtprozesses führen. Die Verarbeitung untypischer Fasermaterialien mit hoher Biegesteifigkeit führt gelegentlich zur Eigenstützwirkung der gebildeten Schicht, sodass eine Korrelation der tatsächlichen Flächenmasse mit dem Anzeigewert der Wiegeeinrichtung zwingend erforderlich ist.

Im nächsten Schritt wird die definierte Schicht der bereits grob aufgeschlossenen Fasern einem Vorvliesbildner **V21/R** zugeteilt. Hier werden die Fasern im zugehörigen Öffneraggregat **8** feiner aufgelöst, auf einem mit Unterdruck beaufschlagten Siebband **9** abgelegt und mittels einer Andruckwalze **10** komprimiert. Dabei kann durch die entsprechende Einstellung der Siebbandgeschwindigkeit das Flächengewicht des gebildeten Vorvlieses **11** beeinflusst werden. Die Vliesbildung bei der Herstellung von Naturfasermatten setzt aerodynamische oder kardiertechnische Legeprozesse voraus. Für isotrope

Vliesstrukturen kommt insbesondere aerodynamische Vliesbildung zum Einsatz. Der Aufschlussgrad der Fasern spielt bei den aerodynamischen Legeverfahren eine wichtige Rolle und übt direkten Einfluss auf die Vliesqualität aus. Daher wird oft unmittelbar vor der eigentlichen Vliesbildung ein intensiver Faseraufschluss durchgeführt. In der aufgeführten Vliesanlage (**Abb. 8**) ist dies durch eine Wirrvlieskarde **K12** gelöst.

Das Fasermaterial wird in der Wirrvlieskarde mittels einer Einlasswalze mit Muldenabdeckung **12** der Hauptwalze **13** zugeleitet und durch zwei nacheinander angeordnete Arbeiter-Wender-Walzenpaare **14** fein aufgeschlossen, umorientiert und auf der Hauptwalze wieder abgelegt. Anschließend werden die durch die Fliehkraft vom Tambour abgelösten Fasern mit Hilfe eines laminaren Luftstroms zum besaugten Siebband **15** transportiert. Aufgrund stark unterschiedlicher physikalischer Fasereigenschaften kann in diesem Bereich gelegentlich ein Entmischungseffekt auftreten. Zur Vermeidung dieses Effektes wird der Deflektorschild **16** eingesetzt, der je nach Einstellung die Flugbahnen der Fasern umlenkt. Durch den Unterdruck wird ferner die noch lockere Faserschicht auf dem Siebband fixiert und zur Vliesbildewalze **17** gefördert. Die Vliesbildewalze verdichtet die abgelegte Faserschicht, wodurch der kohäsive Zusammenhalt innerhalb des Vlieses wesentlich erhöht wird.

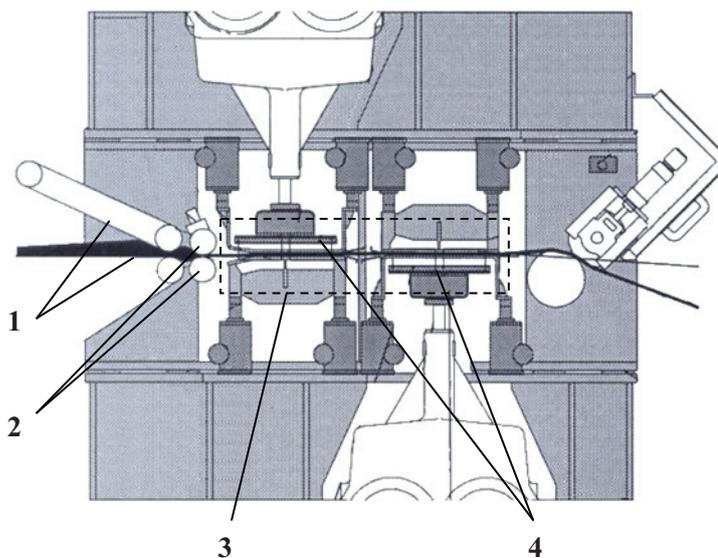


Abb. 9: Nadelmaschine mit Vliesstoffabzug (Quelle: Isowood)

Im nächsten Verarbeitungsschritt erfolgt die mechanische Verfestigung des gebildeten Faservlieses zu einem Vliesstoff mit definierten Eigenschaften. Dafür wird das Faservlies (siehe **Abb. 9**) mit Förderbändern **1** komprimiert und den Einzugswalzen **2** der Nadelmaschine zugeführt. Beim Durchlaufen der Verfestigungszone **3** wird die Vliesvorlage mittels der mit speziellen Filznadeln bestückten Nadelbretter **4** mehrfach durchstochen, wobei ein Teil der im Vlies horizontal vorliegenden Fasern umorientiert wird. Diese bilden senkrecht zur Vliesebene zahlreiche verdichtete Faserschlingen mit einem hohen Reibschluss der Fasern, wodurch eine mechanische Verfestigung erreicht wird. Anschließend sorgen die Abzugswalzen für einen kontinuierlichen Vliesstofftransport. In der Regel wird vor dem Aufwickeln auf Rolle oder vor der Konfektionierung der In-Line-Randbeschnitt durchgeführt.

Die Eigenschaften des Faservliesstoffs werden neben der Faserfestigkeit und -elastizität durch Nadeltyp und Vernadelungsparameter wie Vernadelungsdichte und Stichtiefe wesentlich beeinflusst. Die Vernadelungsdichte wird als Anzahl der Nadeleinstiche auf 1 cm² Vliesstofffläche definiert. Mit steigender Vernadelungsdichte erhöht sich vorerst die Zugfestigkeit des Vliesstoffs bis zum Erreichen der maximalen Verfilzung. Bei weiterer Erhöhung der Vernadelungsdichte nimmt die Zugfestigkeit aufgrund der fortschreitenden Faserschädigung wieder ab. Die Stichtiefe ist das Maß für die Durchdringung der Filznadel und ergibt sich als Abstand von der Nadelspitze bis zur Vliesoberfläche. Durch die Einstellung der Stichtiefe kann die Anzahl der den Vliesquerschnitt durchdringenden Nadelkerben und somit die Menge der mitgenommenen Fasern sowie deren maximale Verschiebung im Vlies beeinflusst werden. Die Verschiebung und Verkrümmung der Fasern im Vlies während der Vernadelung führt zu Geometrieänderungen des Vliesstoffes (sog. Vliesverzug), die sich auf das Flächengewicht des Halbzeugs auswirken.

4.2.3 Grünflachs als Ganzpflanzenrohstoff für die Halbzeugfertigung

Der GPR Grünflachs unterscheidet sich hinsichtlich der Verarbeitung von den klassischen Naturfasern grundsätzlich dadurch, dass der neuartige Rohstoff aus kompletten Pflanzenteilen besteht. Diese stellen einen festen und biegesteifen Verbund aus Fasern und Schäben dar. In der Folge weist der GPR Grünflachs im Vergleich zum klassischen Naturfaserrohstoff ein anderes Verhalten bei der Dosierung und Handhabung im Verarbeitungsprozess auf. Die Pflanzenteile sind dabei deutlich schwerer und besitzen eine glatte Oberfläche mit geringem Reibungskoeffizient, was die Ausbildung des kohäsiven Zusammenhalts des Materials und damit dessen Nachfließen behindert. Der Rohstoff verhält sich bei Schnittlängen unter 50 mm weitgehend als klassisches Schüttgut und erzielt eine relativ hohe Schüttdichte, was an den Anlagenmodulen, die für die Verarbeitung feiner Naturfasern mit guten kohäsiven Eigenschaften ausgelegt sind, oft zur Überdosierung oder zu einem diskontinuierlichen Materialfluss führt. So konnte beispielsweise das auf die Länge von ca. 40 mm gekürzte Pflanzengut aufgrund des Durchrieselns durch die Arbeitselemente des Steigbandes des Ballenöffners kaum prozesssicher transportiert werden. Zur besseren Verarbeitung ist einem auf einheitliche Stapelfaserlänge geschnittenen Rohstoff die Variante mit einer breiten Längenverteilung zwischen 60 und 100 mm zu bevorzugen. In diesem Fall gestaltet sich der Materialfluss entlang der Prozesskette wesentlich günstiger. Ferner übt der Feuchtegehalt im Rohstoff einen erheblichen Einfluss auf den herstellungsbedingten Schäbenverlust und die aerodynamische Vlieslegung nach dem Airlay-Prinzip aus. Eine niedrige Materialfeuchtigkeit z. B. von unter ca. 10 Gew.-% hat eine intensive Faserentholzung in jedem Arbeitsschritt der Faseröffnung zur Folge. Daher ist vor der Halbzeugfertigung eine Kontrolle des Feuchtigkeitsgehaltes im Rohstoff zwingend erforderlich.

Bei der Materialaufgabe im Faseröffner ist eine homogene Beschickung des Füllschachtes zur Unterbindung der Inselbildung im Einzug zu beachten. Zur Vermeidung der Überdosierung ist die Reduzierung des Schachtvolumens vorzunehmen. Beim Überschreiten einer Material-Mindestgrenze auf der Einzugswalze werden die Pflanzenteile vom Tambour kontinuierlich aufgenommen, aufgeschlossen und einem pneumatischen Fördersystem zugeführt. In diesem Prozessabschnitt erfolgt die erste intensive Faseröffnung und Reduzierung der Faserlänge, wobei diese grob aufgeschlossenen Fasern über das Rohrleitungssystem in den Füllschacht des Wanderkondensers gelangen und mit Bürstenwalzen gleichmäßig in den Rüttelschachtspeiser der Vliesanlage gestreut werden. Eine entsprechend gesteuerte Linearbewegung des Kondensers gewährleistet eine einheitliche Materialvorlage über die gesamte Arbeitsbreite

des RSP. Eine effiziente Regelung der Belegung des Regulierschachtes und damit der integrierten Bandwaage erfordert im Vergleich zur konventionellen Prozessgestaltung die Anpassungen der Verstelltiefe der Rüttelwand und des Bürstensatzes der Rückschlagwalze (vgl. auch **Abb. 8**).



Abb. 10: Materialablieferung vom Rüttelschachtspeiser zur Bandwaage (links) und Materialzuführung zum Vorvliesbildner V21/R (rechts)

Bei einer entsprechend der Zielvorgabe für das Flächengewicht eingestellten Vordosierung im RSP lässt sich eine definierte Zuführung zum Vorvliesbildner V21/R erzielen (**Abb. 10**). Dennoch führt der am Siebband vorhandene Unterdruck bei der Vorvliesbildung zum Verhaken der Pflanzenstängel in den Maschen des Siebbandes und damit zu unerwünschten Materialverlusten (**Abb. 11**). Durch die Gestaltung der Vorvliesbildung nach rein mechanischem Prinzip – Nutzung der Fliehkraft des Fasermaterials – konnten sowohl die Qualität der gebildeten Faserschicht entscheidend verbessert als auch der Materialverlust deutlich reduziert werden.



Abb. 11: Materialverluste bei der Ablieferung vom Vorvliesbildner V21/R zur Wirrvlieskarde K12 (links) und gleichmäßiges Faservlies vor der Vernadelung (rechts)

Infolge einer zunehmenden Faserauflösung und -vergleichmäßigung im Kardierprozess wird eine homogene Querverteilung des Fasermaterials erzielt. Die anschließende aerodynamische Vlieslegung

gewährleistet eine einheitliche Vliesqualität mit geringen Langzeitschwankungen der Flächengewichtsverteilung (siehe **Abb. 11** rechts). An der Zuführung zur Wirrvlieskarde K12 kommt es jedoch zu einem erheblichen Materialverlust. Dies ist vor allem in einer starken mechanischen Belastung des Fasermaterials im Vorvliesbildner begründet, welche die Ablösung zahlreicher Schäben aus dem natürlichen Faser-Schäben-Verbund hervorruft. Die rieselfähigen Schäben können ohne wirksame Hilfsmaßnahmen nicht zielkonform weitertransportiert werden und scheiden aus dem gebildeten Vorvlies aus. Die in diesem Bereich anfallenden Reststoffe lassen sich mit Hilfe einer zusätzlichen Abfangeinrichtung (z. B. pneumatisch) nach der Wirrvlieskarde in den Prozess zurückführen.

Der o. g. Unterschied des GPR Grünflachs zu den klassischen Naturfasern erfordert eine Neudefinition der Maschineneinstellungen der Wirrvlieskarde K12. Bei der Vlieslegung ist der Entmischungseffekt festzustellen, der mit dem Deflektorschild teilweise kompensiert werden kann. Allerdings muss unmittelbar vor der Vlieslegung aufgrund einer beträchtlichen Menge rieselfähiger Schäben ein spezielles Hilfsmittel – etwa ein leichter Unterlegvliesstoff aus Kunstfasern – eingesetzt werden. Dieses verhindert das Durchrieseln loser Vliesbestandteile durch die Maschen des Ablieferungsbandes und sichert den zuverlässigen Vliestransport zur Nadelmaschine. Am Einzug in die Nadelmaschine wird ein weiterer Kunstfaservliesstoff als Abdeckware zugeführt. Der Einsatz derartiger Hilfsvliesstoffe führt zu einer besseren Halbzeugverfestigung beim Vernadeln, da die langen Kunstfasern in den Verfilzungsprozess mit einbezogen werden. Zudem lassen sich dadurch die losen Partikel innerhalb des Mattenhalbzeugs fixieren. Darüber hinaus begünstigen derartige Abdeckmaterialien eine spätere Handhabung und Konfektionierung der Halbzeuge.

Die Verfestigung durch das Vernadeln erfolgte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen beidseitig unter Variation der Vernadelungsdichte, der Stichtiefe und der Vorschubgeschwindigkeit. So konnte eine maximale Produktionsleistung von ca. 860 kg/h bei einer Arbeitsbreite von 3 m erreicht werden. Die eingesetzten Abdeckvliesstoffe in den Großversuchen dienen der Verringerung des Durchlaufwiderstandes in der Verfestigungszone, indem das Fasermaterial vor den geometrischen Hindernissen – Durchgangsöffnungen der Lochplatte – isoliert bleibt. Der geringere Abzugswiderstand wirkt sich positiv auf die Vliesverformung insbesondere im Randbereich beim Aufwickeln auf Rolle aus.

4.3 Herstellung von Bauteilen

4.3.1 Halbzeugimprägnierung mit Matrixharzen

Für duroplastische Matrixmaterialien (Harze) ist eine chemische Vernetzungsreaktion charakteristisch, die diese Materialgruppe von Thermoplastsystemen grundsätzlich unterscheidet. Infolge dieser Vernetzung entsteht ein festes Molekülnetzwerk, das aufgrund der thermisch unlösbaren Bindungen nicht schmelzfähig ist. Durch Temperaturerhöhung kann die Vernetzungsreaktion in der Regel deutlich beschleunigt werden, wobei die Vernetzungskinetik für eine effiziente Fertigung von NFK-Formteilen von großer Bedeutung ist. Obere Temperaturgrenzen sind hierbei durch die thermische Beständigkeit der Verstärkungsfasern gesetzt.

Für die Halbzeugimprägnierung mit Matrixharzen wurden in der jüngsten Zeit verschiedene Techniken entwickelt wie z. B. Gieß- und Sprühverfahren, Lösungsmittel- und Schmelzharzimprägnierung. Warmhärtende Einkomponenten-Matrixsysteme wie etwa Acrylat-Harze erlauben die Halbzeugimprägnierung im Foulardierverfahren. Das Halbzeug in Form einer Endlosbahn wird dabei durch ein Tauchbad mit verdünnter Matrixkomponente geführt. Das überflüssige Harz wird anschließend mittels Abquetschwalzen dem imprägnierten Halbzeug entzogen und in den Foulard zurückgeführt. Eine nachgeschaltete Trocknungsstrecke dient der Entfernung des Lösungsmittels aus dem Prepreg, wodurch die geforderte Haltbarkeit gewährleistet wird.

Beim Einsatz von Zwei- und Mehrkomponenten-Matrixsystemen werden hochreaktive Komponenten aufgrund einer oft sehr kurzen Gelierzeit unmittelbar vor der Halbzeugimprägnierung vermischt. Für die Verarbeitung derartiger Matrixmaterialien kommt meistens das Sprühverfahren zur Anwendung, das die Verfahrensvarianten der Niederdruck- und Hochdrucktechnik aufweist. Die Naturfaserhalbzeuge werden mit einer definierten Menge des fertig vermischten flüssigen Harzsystems versehen und anschließend in aufgeheizten Formwerkzeugen unter Druck konsolidiert.

Vor dem Harzauftrag müssen die Naturfaserhalbzeuge oft vorgetrocknet werden. Diese Forderung ergibt sich aufgrund der Neigung der Naturfasern zu einer schnellen Feuchtigkeitsaufnahme aus der Umgebungsluft. Ein erhöhter Feuchtigkeitsgehalt kann zu verschiedenen Prozessstörungen wie z. B. Blasenbildung beim Pressen oder vorzeitiges Angelierren der Matrix bei Polyurethan-Systemen führen. Nach dem Vortrocknen werden die Halbzeuge zunächst bei Raumtemperatur konditioniert und anschließend dem Vorgang des Harzauftrages zugeführt (siehe **Abb. 12**). Für die Verarbeitung von schnell reagierenden Matrixsystemen ist das Hochdruckverfahren prädestiniert, das sich durch hohe Flexibilität hinsichtlich der Prozessführung insbesondere bei gering zu dosierenden Harzmengen auszeichnet. Die dafür relevanten Mischköpfe sind selbstreinigend und somit nach jedem Zyklus sofort wieder einsatzbereit. Ein derartiger Mischkopf kann von einem computergesteuerten Roboter über das Mattenhalbzeug geführt werden. Dabei lässt sich der Harzanteil über die Regelung der Durchflussmenge und der Verfahrensgeschwindigkeit bis auf ca. 1 Gew.-% genau dosieren. Zur Verbesserung der Oberflächenqualität von Formpressteilen und zur Reduzierung des Harzanteils sowie der erforderlichen Fließwege erfolgt der Harzauftrag oftmals beidseitig, wofür die konfektionierten Halbzeugzuschnitte gewendet werden. Dadurch lässt sich zudem, verglichen mit dem einseitigen Aufsprühen, eine optimale Harzverteilung im Bauteilquerschnitt erzielen.

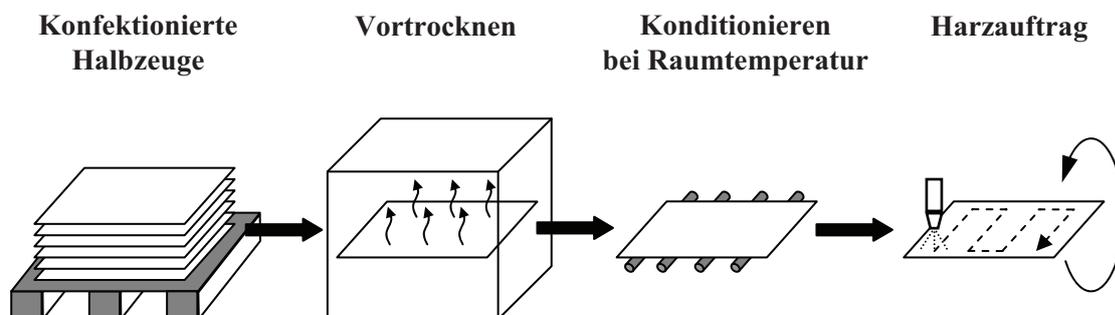


Abb. 12: Harzimprägnierung im Sprühverfahren

4.3.2 Fertigung des Bauteilträgers im Formpressverfahren

Die Formgebung der imprägnierten Halbzeuge findet in beheizten Presswerkzeugen statt. Das Halbzeug wird dafür in die ca. 120–180°C heiße Werkzeugkavität eingelegt und durch den Aufwärtshub des Stempels gepresst. Standardmäßig wird die Kavität nach dem Aufbau der Schließkraft und einer kurzen Verweilzeit unter Druck für ca. zwei Sekunden geöffnet, damit der im Halbzeug entstandene Wasserdampf entweichen kann (Werkzeugentlüftung), wodurch die Blasenbildung im Bauteil wirkungsvoll unterbunden wird.

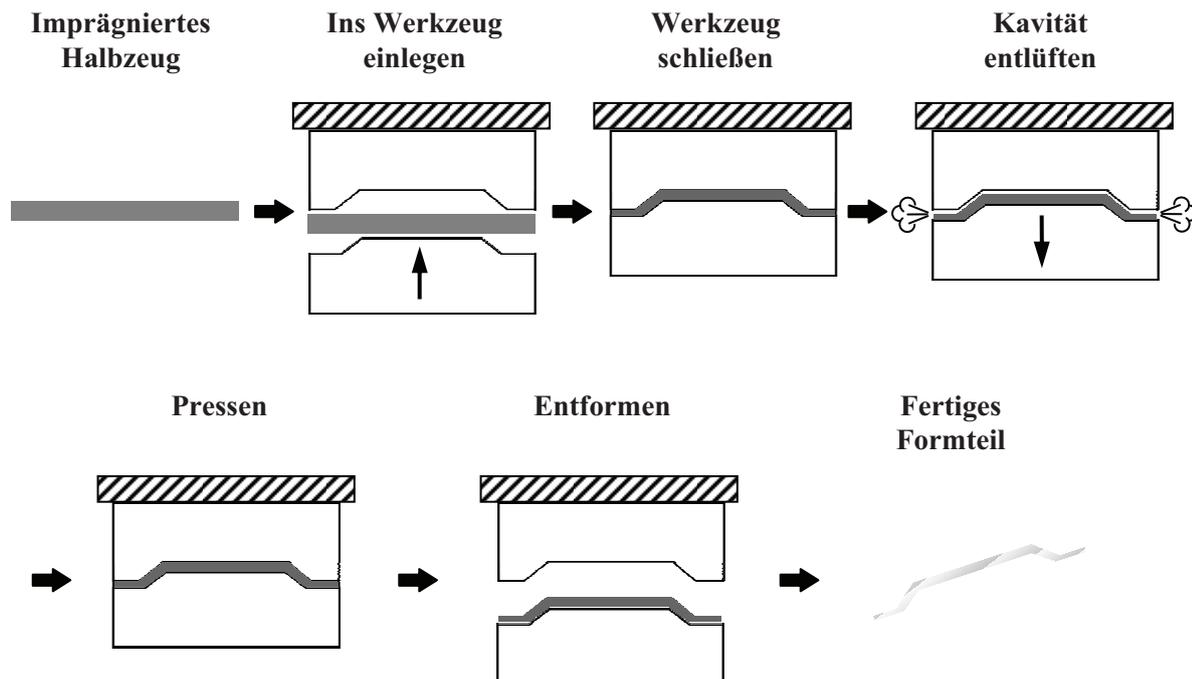


Abb. 13: Verfahrensablauf beim Formpressen von GPR-Halbzeugen

Danach wird das Werkzeug wieder geschlossen und die Matrixkomponente unter Druck und Temperatur vollständig konsolidiert. Anschließend kann der fertige Rohträger dem Presswerkzeug entnommen werden und steht für Oberflächenkaschierung und Komplettierung mit Anbauteilen bereit. **Abb. 13** zeigt den zugehörigen Verfahrensablauf, der beim Formpressen der Halbzeuge aus GPR Grünflachs Anwendung findet.

Ausschlaggebend für die Gestaltung des Pressprozesses ist die Kinetik der Vernetzungsreaktion des jeweiligen Matrixsystems in Abhängigkeit von der Werkzeugtemperatur, was in der Praxis oft anhand der Viskositätsänderung des Harzes analysiert wird. Das temperaturabhängige rheologische Verhalten kann z. B. mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters genau ermittelt werden. Der Ablauf der Bauteilfertigung wird so eingestellt, dass der Gelzustand der Matrix erst einige Sekunden nach der Werkzeugentlüftung eintritt. Im Laufe der Kompressionsphase verteilt sich das Matrixmaterial gleichmäßig in der Verbundstruktur und vernetzt zu einem Festkörper. Bei der Auswahl der Prozesstemperatur ist zu beachten, dass aufgrund der eingeschränkten thermischen Stabilität von Naturfasern die Hochtemperaturverarbeitung zur Intensivierung der Bauteilemissionen und darüber hinaus zu ungünstigen Fogging-Eigenschaften führt.

4.3.3 Oberflächenkaschierung und Fertigstellung des Bauteils

Die im Pressverfahren hergestellten Bauteil-Rohträger können mittels verschiedener Kaschiertechniken mit einer vorgegebenen Dekor-Oberfläche versehen werden. Dadurch werden dem Bauteil entsprechende optische und haptische Eigenschaften verliehen. Je nach Anforderung finden dabei regulär das Vakuum- und Presskaschieren oder das Hinterschäumen Anwendung. Beim Vakuumkaschieren wird der NFK-Bauteilträger auf der Unterseite mit Vakuum beaufschlagt. Das vorher temperierte Dekor wird auf das Formteil aufgelegt und durch den entstandenen Unterdruck konturkonform kaschiert. Durch die Aktivierung des auf den NFK-Bauteilträger oder auf das Dekor aufgetragenen Klebstoffs wird im Weiteren eine kraftschlüssige Verbindung beider Komponenten erzielt. Dekormaterialien mit einer hohen Luftdurchlässigkeit (z. B. Textilien) oder mit einer geringen Dehnfähigkeit (etwa Leder) lassen sich nicht nach diesem Verfahren verarbeiten und werden mittels Presskaschierens auf die Formteileroberfläche appliziert. Beim Presskaschieren werden das NFK-Formteil mit aufgetragener Klebeschicht und das Oberflächenmaterial im Werkzeug positioniert und mit Hilfe von zwei harten Werkzeughälften verpresst. Dadurch entsteht eine dauerhafte Klebeverbindung. Das Verfahren des Hinterschäumens wird vorzugsweise zur Erzeugung von kaschierten Bauteiloberflächen mit Soft-Touch-Effekt eingesetzt. Dafür sind Zweischalengeräte erforderlich, in denen das freie Volumen zwischen der vorgeformten Außenhaut und dem Trägerteil mit Weichkomponente ausgeschäumt wird. In diesem Schäumprozess werden das Dekor und der Rohträger fest miteinander verklebt. Nach dem Kaschieren erfolgt die Fertigstellung des Bauteils, indem das Umbiegen der Abschlusskanten, das Einbringen der Befestigungselemente und die Montage der Anbauteile durchgeführt werden. Die Standardprozesse der Bauteilkaschierung und -fertigstellung können bei den neuen Formteilen aus dem GPR-Grünflachs ohne aufwändige Modifizierungen zur Anwendung kommen.

4.4 Neues durchgängiges Fertigungsverfahren

Die einzelnen Verfahrenskonzepte bilden die Basis zur Technologieentwicklung für die Herstellung von naturfaserverstärkten Bauteilen in Leichtbauweise unter Einsatz von Ganzpflanzenrohstoffen. Die im Rahmen der Arbeit betrachtete Prozesskette mit den zugehörigen Schnittstellen ist schematisch in **Abb. 14** und **Abb. 15** dargestellt. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Anpassung der Hauptprozesse **Rohstoffbereitstellung**, **Halbzeugfertigung** und **Bauteilherstellung** sowie auf der Verkürzung der gesamten Prozesskette von der Pflanze bis zum NFK-Bauteil.

Gemäß **Abb. 14** wird das Pflanzenmaterial **1** mittels schlagkräftiger Erntetechnik zu einem dosierfähigen Ganzpflanzenrohstoff in Quaderballenform **2** verarbeitet. Der GPR Grünflachs wird auf einer aerodynamischen Standard-Vliesanlage **3** zu einem homogenen Vlies gelegt, wobei auf dessen Unter- und Oberseite leichte Kunstfaser-Abdeckvliesstoffe **4** zur Anwendung kommen. Mit Hilfe des Vernadelungsverfahrens **5** wird das gebildete Vlies aus GPR Grünflachs zu einem stabilen flächigen Halbzeug **6** verfestigt. Im nächsten Arbeitsschritt erfolgt die Konfektionierung **7** zu einem fertigen Zuschnitt. Nach einer prozessgerechten Vortrocknung **8** wird das konfektionierte Halbzeug in einer Hochdruck-Sprüheinrichtung **9** mit Matrixkomponente versehen und anschließend in einem temperierten Form-

werkzeug **10** zum Bauteil-Rohträger verpresst. Zur Fertigstellung des Bauteils wird auf den hergestellten Rohträger mittels geeigneter Kaschiertechnik **11** eine entsprechende Oberflächenkomponente appliziert und die Montage der Anbauteile sowie Befestigungselemente **12** durchgeführt.

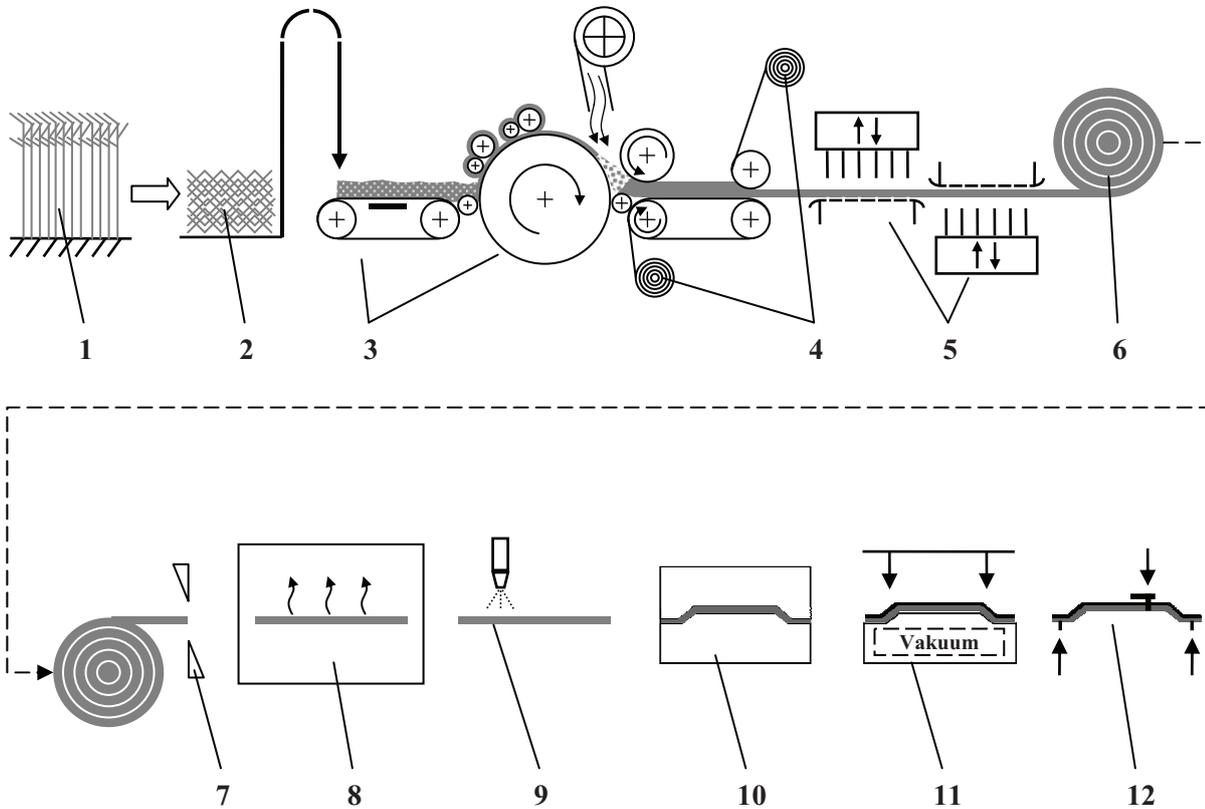


Abb. 14: Neue durchgängige Prozesskette für NFK-Formpressbauteile aus GPR Grünflachs

Die wesentlichen Schnittstellen innerhalb der vorgestellten Prozesskette sind in **Abb. 15** angegeben. Die erste Schnittstelle ist die Verknüpfung von Rohstoffbereitstellung und Halbzeugfertigung. Dabei wird das Schnittstellenprodukt 1 „Ballen“ für die Verarbeitung zum Halbzeug vorgelegt. Die für die beiden Hauptprozesse ausschlaggebenden Merkmale sind Längenverteilung im Ballen, Feuchtigkeitsgehalt und Röstgrad des Pflanzenmaterials. Die zweite Schnittstelle verbindet die Halbzeugfertigung mit der Bauteilherstellung. Das Schnittstellenprodukt 2 „Matte“ weist die zugehörigen Merkmale wie Flächen-gewichtsverteilung, Festigkeitscharakteristik (Reißfestigkeit und -dehnung) und Halbzeuganisotropie auf. Diese Merkmale sind für die Optimierung der Halbzeugfertigung und Bauteilherstellung von besonderer Bedeutung.

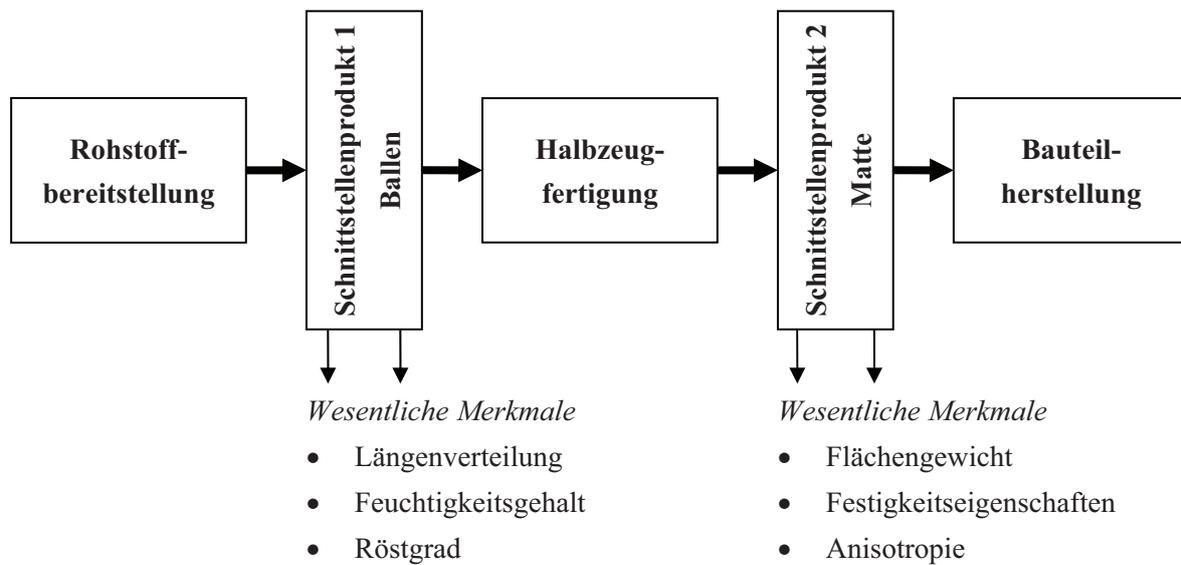


Abb. 15: Wesentliche Schnittstellen der neuen Prozesskette

Im Rahmen der weiterführenden Untersuchungen wurden ausgewählte Prozesse der Rohstoffbereitstellung, Halbzeugfertigung und Bauteilherstellung validiert sowie relevante Einflussgrößen identifiziert und charakterisiert. Basierend auf den erzielten Ergebnissen ist ein neues leichtbauorientiertes Auslegungskonzept für NFK-Formpressteile erstellt und unter Einsatz von numerischen Simulationen analysiert worden.

5 Validierung der Einzelprozesse

5.1 Halbzeugentwicklung und -optimierung

Der GPR Grünflachs als Naturfaserrohstoff für technische Vliesstoffe erfordert im Vergleich zu klassischen Bastfasern die Entwicklung einer geeigneten Halbzeugkonfiguration, welche die prozessbezogenen Materialbeschaffenheiten berücksichtigt. So ist beispielsweise für eine verlustarme und prozesssichere Verarbeitung auf industriellen Vliesanlagen der Einsatz von leichten Abdecklagen z. B. aus Kunstfaser-vliesstoff notwendig (vgl. Kap. 4.2.3). Das Naturfasermaterial wird zwischen den Abdecklagen positioniert und durch die Nadeleinstiche derart miteinander verbunden, dass infolge Verfilzung und Komprimierung eine hohe Verbundfestigkeit vorliegt. Der prinzipielle Halbzeugaufbau ist in **Abb. 16** dargestellt. Als helle Striche sind hier die Kanäle mit den umorientierten Fasern erkennbar. Die dunklen Punkte zeigen schematisch die zugehörigen Oberflächenmarkierungen, die durch die Verfestigungsnadeln verursacht worden sind.

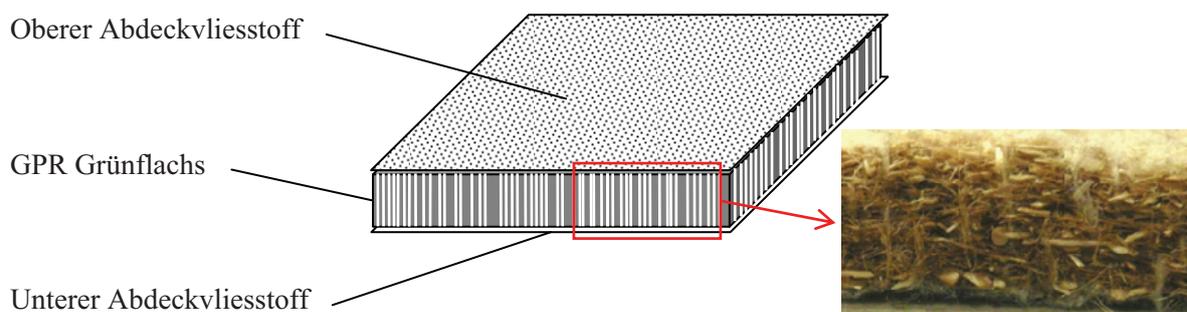


Abb. 16: Struktur des vernadelten Vliesstoffes aus GPR-Grünflachs

Die Auswahl geeigneter Materialien für den Einsatz als Abdeckware bei der Vlieslegung wurde aufgrund der Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit bei der Formteilherstellung, die Stabilität bei der Vernadelung und die wirtschaftlichen Aspekte vorgenommen. Dafür wurden kommerziell verfügbare Polyester(PES)-Faser-Vliesstoffe mit Flächengewichten von ca. 10, 20 und 35 g/m² getestet, deren Schmelzpunkt über 180°C liegt. Die untersuchten Vliesstoffvarianten mit 10 und 20 g/m² wurden aufgrund einer unzureichenden Reißfestigkeit, die einer kontinuierlichen Prozessführung entgegen steht, als ungeeignet eingestuft. Der PES-Nadelvliesstoff mit 35 g/m² wies dagegen eine hohe Festigkeit auf, allerdings bei deutlich höheren Anschaffungskosten. Der 35 g/m²-Spinnvliesstoff zeigte im Unterschied zu den o. g. Varianten ein optimales Preis-Leistungs-Verhältnis und wurde daher für weitere Fertigungsversuche herangezogen.

5.1.1 Ausgangsparameter des pflanzlichen Rohstoffs

Der Zustand des Ganzpflanzenrohstoffs im Ballen beeinflusst wesentlich die nachgeschalteten Prozesse der Faserdosierung und der Vlieslegung. Im Hinblick auf die Verarbeitung zum technischen Vliesstoff-Halbzeug sind folgende Parameter untersucht worden:

- Längenverteilung der Pflanzenteile in der Rohstoffvorlage
- Röstgrad des Pflanzenmaterials
- Feuchtigkeitsgehalt des Flachsstrohs

Die Längenverteilung ist für einen kontinuierlichen Materialfluss vom Ballenöffner bis zur Wirrvlieskarde K12 bestimmend, wobei die mittlere Schnittlänge lediglich einen Anhaltswert darstellt. Die reproduzierbare Verarbeitung auf der Standard-Vliesanlage lässt definierte Abweichungen vom Mittelwert ohne Anpassung der Maschineneinstellungen zu. Bei den mittleren Schnittlängen unter 50 mm konnten Restriktionen durch hohe Materialverluste an den mechanischen Übergabestellen, Unterbrechungen des kontinuierlichen Massestromes und eine kaum kontrollierbare Überdosierung bei der Zuführung zum Vorvliesbildner V21/R festgestellt werden. Die Schnittlängen über 150 mm hatten vor allem aufgrund der Wickelbildung an den Einzugswalzen des Faseröffners und des Vorvliesbildners einen diskontinuierlichen Materialfluss zur Folge. Für die Faserlängen im Bereich von 50 mm bis 100 mm wurde eine kontinuierliche Halbzeugfertigung mit einem Stundendurchsatz bis zu 860 kg/h bezogen auf die Arbeitsbreite von ca. 3 m erzielt. Eine starke mechanische Belastung des Ganzpflanzenrohstoffes durch die scharfen Arbeitsgarnituren führt bereits bei der ersten Faseröffnung zur starken Längenverkürzung und zur Erhöhung der adhäsiven Eigenschaften des Fasermaterials. Ein weiterer Faseraufschluss insbesondere bei der Vorvliesbildung im V21/R und beim anschließenden Kardieren auf der Wirrvlieskarde K12 hat die Vereinheitlichung des Fasermaterials im Vlies zur Folge (siehe Kap. 5.1.2).

Mit Hilfe der vorhandenen apparativen Ausstattung konnte bei der Herstellung der Rohstoffvorlage eine reproduzierbare Längenverteilung erzielt werden. **Abb. 17** zeigt zwei typische Beispiele für Längenverteilungen in unterschiedlichen Ballen für die mittleren Faserlängen im Bereich zwischen 50 mm und 100 mm. Die dargestellte Längenverteilung des Ausgangsmaterials erlaubt eine zuverlässige Materialzuführung zum Faseröffner sowie einen kontinuierlichen und reproduzierbaren Betrieb der Vliesanlage.

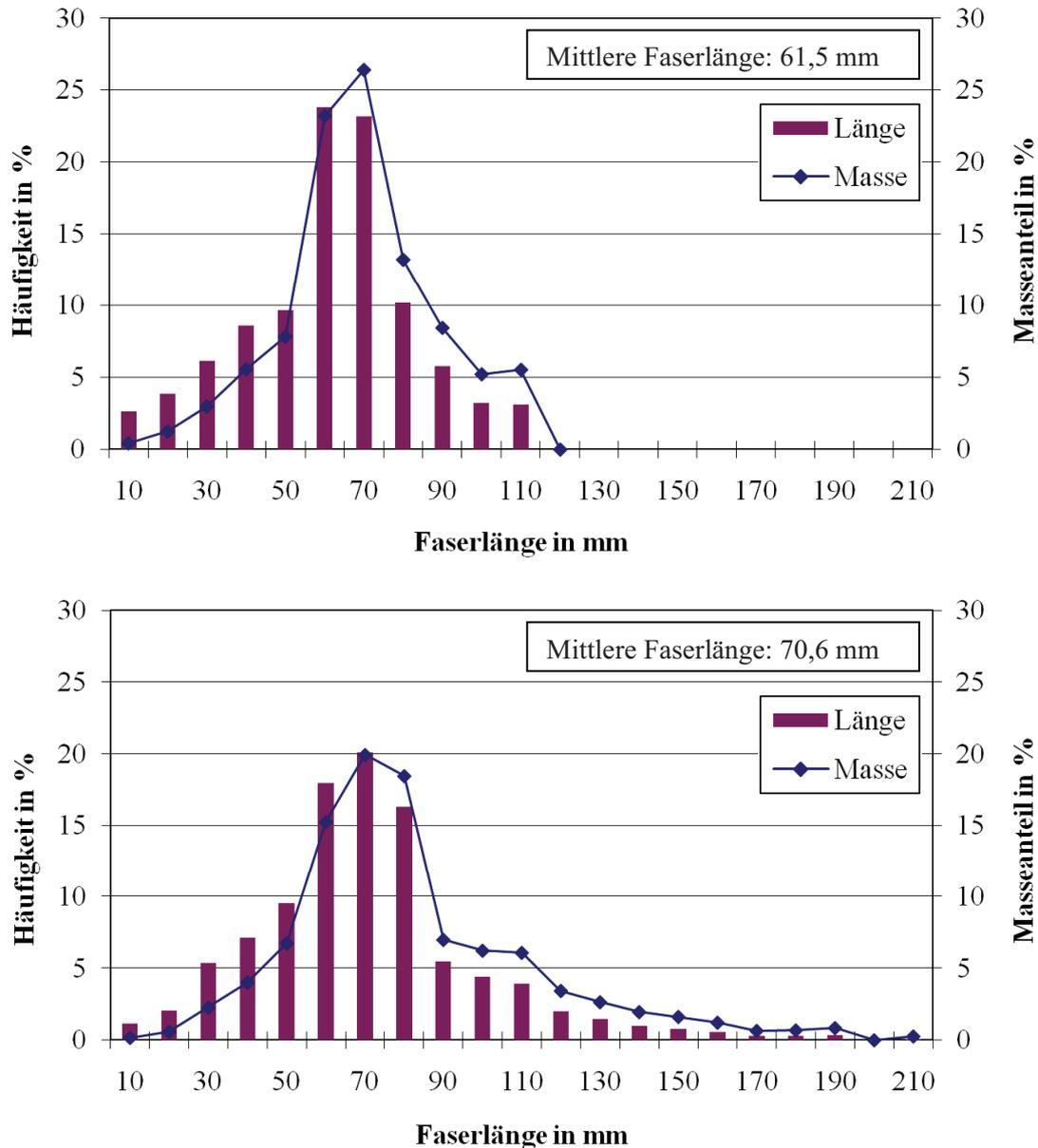


Abb. 17: Typische Längenverteilungen in unterschiedlichen GPR-Ballen

Der Einfluss vom Röstgrad auf die Materialverluste wurde anhand drei unterschiedlich gerösteter Materialproben untersucht. **Abb. 18** stellt stark geröstetes (Charge 1), leicht angeröstetes (Charge 2) und nicht geröstetes (Charge 3) Flachsstroh dar. Die Proben wurden demselben Flachsbestand entnommen, sodass die Anbaubedingungen, die Standortfaktoren und die Flachssorte identisch sind.



Abb. 18: Flachsstroh mit unterschiedlichem Röstgrad

Die Entholzungsversuche sind mit Hilfe eines Laborentholzers Flakxy[®] der Fa. Bahmer Maschinenbau durchgeführt worden (siehe **Abb. 19**). Der Laborentholzer besitzt vier nacheinander geschaltete Walzenpaare, die jeweils aus einer Stahl- und einer Kunststoffwalze mit paarweise gleichem Arbeitsprofil bestehen. Während die Stahlwalzen mit dem Geräterahmen starr verbunden sind, ist jede Kunststoffwalze federnd gelagert. Die Federkräfte der integrierten Spiralfedern sind einzeln einstellbar, sodass der Laborentholzer auf das jeweilige Versuchsmaterial gezielt angepasst werden kann. Für die Entholzungsversuche an den o. g. Proben wurde nach mehreren Tests eine einheitliche Federkraft von 40 N für jedes Walzenpaar gewählt. An den Stahlwalzen sind seitlich Zahnräder mit einem vordefinierten Übersetzungsverhältnis befestigt, die mit Hilfe einer Antriebskette mit dem Motor und untereinander verbunden sind. Das Übersetzungsverhältnis ist vom Gerätehersteller so gewählt, dass das dritte und das vierte Walzenpaar aufgrund einer abnehmenden Profiltiefe progressive Umdrehungsfrequenzen aufweisen, wodurch der unerwünschte Materialstau vermieden wird. Die Drehzahl des Motors kann stufenlos eingestellt werden, wobei für die durchgeführten Entholzungsversuche folgende Einstellungen verwendet wurden:

1. Walzenpaar: 80 U/min,
2. Walzenpaar: 80 U/min,
3. Walzenpaar: 96 U/min,
4. Walzenpaar: 110 U/min.

Die Proben – fünf je Charge – wurden mit jeweils drei Wiederholungen im Laborentholzer Flakxy[®] prozesskonform entholzt (vgl. **Abb. 19**). Zunächst wurde die genaue Ausgangsmasse jeder Materialprobe ermittelt. Nach jedem Durchlauf wurden lose Schäben vom zusammenhängenden Faserstroh getrennt und die Materialprobe erneut gewogen. Die jeweiligen Gewichtsunterschiede wurden auf die Ausgangsmasse der Proben bezogen und in Form von Prozentzahlen dokumentiert.



Abb. 19: Verwendeter Laborentholzer Flaksy[®] der Fa. Bahmer Maschinenbau

Die Ergebnisse der Entholungsversuche stellt **Abb. 20** dar (detaillierte Angaben siehe Anhang 10.1). Hier ist ersichtlich, dass die Charge 1 – das stark geröstete Flachsstroh – bereits nach dem ersten Durchlauf einen erheblichen Anteil an losen Schäben und insgesamt die höchsten Masseverluste von ca. 49 Gew.-% aufweist. Der Grund hierfür liegt sinngemäß in der Auflösung des Faser-Schäben-Verbundes im Stängel der Pflanze durch Mikroorganismen, die pflanzliche Kittsubstanzen abbauen. Dagegen ist bei den anderen Chargen nach dem ersten Durchlauf ein gleich geringer Masseverlust festzustellen. Ein deutlicher Unterschied zwischen der Charge 2 – leicht angeröstetes Flachsstroh – und der Charge 3 – nicht geröstetes Flachsstroh – ist erst nach dem zweiten und insbesondere nach dem dritten Durchlauf erkennbar und beträgt ca. 19 Gew.-%.

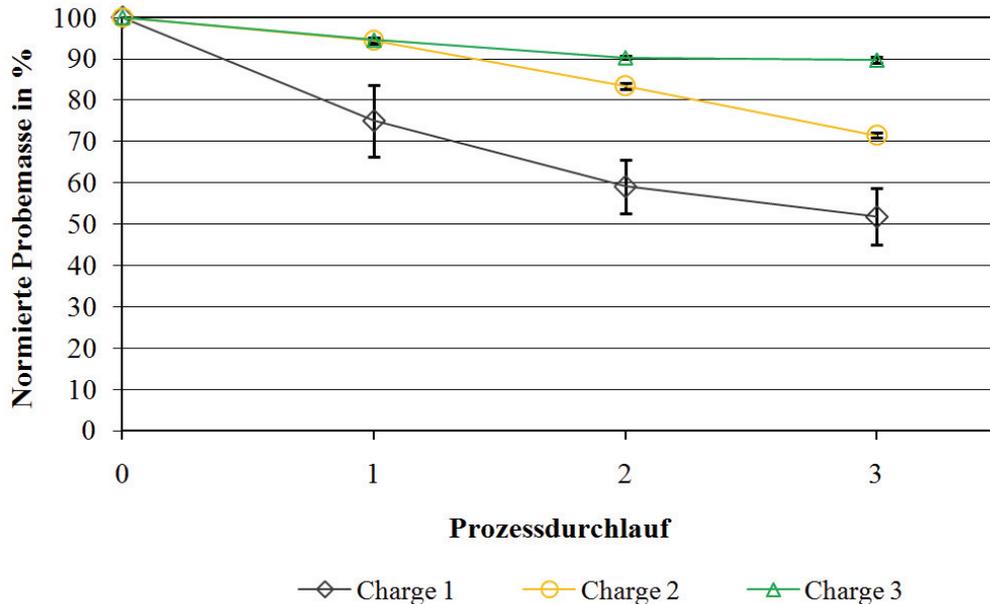


Abb. 20: Masseverlust bei der Faserentholung in Abhängigkeit von Röstgrad und Anzahl Prozessdurchläufe

Tendenziell stagnieren die Werte der Charge 3 beim Erreichen der Prozentgrenze von ca. 10 Gew.-%, was auf eine hohe Verbundfestigkeit im Stängel zurückzuführen ist. Das leicht angeröstete Flachsstroh (Charge 2) weist nach dem dritten Verarbeitungsvorgang eine Entholungsrate von ca. 29 Gew.-% auf.

Schlussfolgernd lässt sich feststellen, dass nicht geröstetes Flachsstroh im Hinblick auf eine verlustarme Verarbeitung zu GPR-Halbzeugen prädestiniert ist.

Der Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes im Rohstoff auf die Materialverluste wurde ebenfalls mit Hilfe des Laborentholzers untersucht. Dafür sind acht Materialchargen des trockenen Grünflachsstrohs innerhalb von ca. 24 h bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen konditioniert worden, wodurch Feuchtigkeitsgehalte im Bereich von 2 bis 53 Gew.-% erzielt werden konnten. Der tatsächliche Feuchtigkeitsgehalt der Materialproben wurde nach der Materialkonditionierung mit einem Feuchtigkeitsmessgerät (Sartorius MA 30) ermittelt. Die derart vorbehandelten Flachsstroh-Proben – fünf je Materialcharge – wurden anschließend dem Laborentholzer zugeführt. Nach zwei Prozessdurchläufen erfolgte die Trocknung der Materialproben in einem Umlufttrockner innerhalb von 2 h bei 105°C. Im Weiteren wurden die losen Schäben ausgesondert und das Gewicht jeder Probe bestimmt. Die auf die gesamte Probemasse bezogene Gewichts-differenz ergab den jeweiligen prozentualen Masseverlust.

Die Versuchsergebnisse sind in **Abb. 21** dargestellt (siehe auch Anhang 10.2). Ein niedriger Feuchtigkeitsgehalt unter 12 Gew.-% (Bereich **I**) hat aufgrund steigender Bruchanfälligkeit der Flachsschäben einen erhöhten Materialverlust von 17 Gew.-% bis 51 Gew.-% bei sehr trockenem Material zur Folge. Mit zunehmender Feuchtigkeitsaufnahme sinkt der Prozentanteil loser Schäben im untersuchten Material bis zum Erreichen eines Minimums, das tendenziell zwischen 20 und 30 Gew.-% des Feuchtigkeitsgehaltes vorliegt. Eine weitere Erhöhung der Materialfeuchtigkeit führt zu einem allmählichen Anstieg des Anteils abgelöster Schäben (Bereich **III**). Die festgestellte Abhängigkeit kann auf die zunehmende feuchtigkeitsbedingte Reduzierung der Bindekräfte im Faser-Schäben-Verbund zurückgeführt werden.

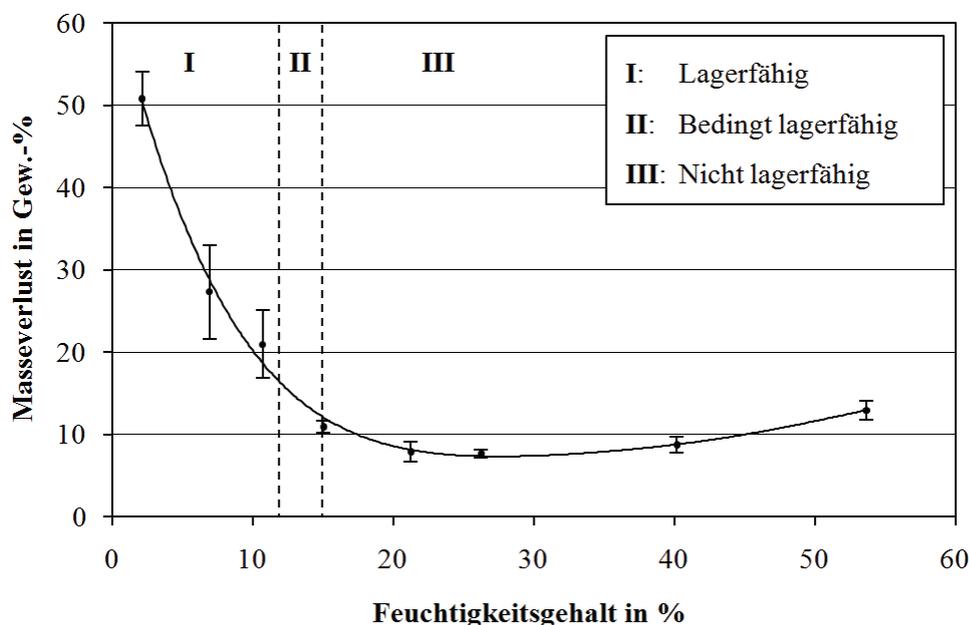


Abb. 21: Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Materialverluste; Fehlerbalken entspricht der Standardabweichung

Die Übertragung dieser Erkenntnisse auf einen industriellen Prozess der Halbzeugfertigung ist nur bedingt möglich, da das Materialgut in einer Vliesanlage gegenüber dem Laborbrecher andere

Belastungen erfährt. Außerdem setzt ein höherer Feuchtigkeitsgehalt des GPR anschließende Trocknung der Halbzeuge zur Sicherstellung deren Lagerfähigkeit voraus, wodurch die Wirtschaftlichkeit negativ beeinflusst wird. Für eine kosteneffiziente und zugleich materialgerechte Verarbeitung ist daher ein mittlerer Feuchtigkeitsgehalt zwischen 12 und 15 Gew.-% (Bereich **II**) zu bevorzugen, wobei die Untergrenze bei ca. 10 Gew.-% liegt.

Die wesentlichen technologischen Anforderungen an den Rohstoff – Faserlängenverteilung und Feuchtigkeitsgehalt – sind schematisch in Form eines Verarbeitungsfensters für die Fertigung einer prozessgerechten Rohstoffvorlage dargestellt (**Abb. 22**). Die Grenzen verdeutlichen die ermittelten Verfahrensrestriktionen für den anschließenden Prozess der Halbzeugfertigung. Ein erhöhter Anteil von Faserlängen unter der L_{\min} -Grenze (< 50 mm) führt zu erheblichen Materialverlusten und Überdosierung, während ein hoher Anteil der Faserlängen über der L_{\max} -Grenze (> 150 mm) zunehmende Wickelbildung und einen inhomogenen Materialfluss zur Folge hat. Ein sehr niedriger Rohstoff-Feuchtigkeitsgehalt $FG_{\min} < 10$ Gew.-% führt bei der Vliesfertigung ebenfalls zu hohen Materialverlusten. Demgegenüber wirkt sich eine zu hohe Materialfeuchtigkeit (Gehalt $FG_{\max} > 15$ Gew.-%) infolge des notwendigen Trocknungsaufwandes nachteilig auf die Produktkosten aus. Das optimale Prozessfenster lässt sich daher im Hinblick auf die Faserlänge durch eine Mindestgrenze von ca. 60 mm und eine Höchstgrenze von ca. 100 mm sowie bezüglich des Feuchtigkeitsgehaltes zwischen 12 und 15 Gew.-% festlegen.

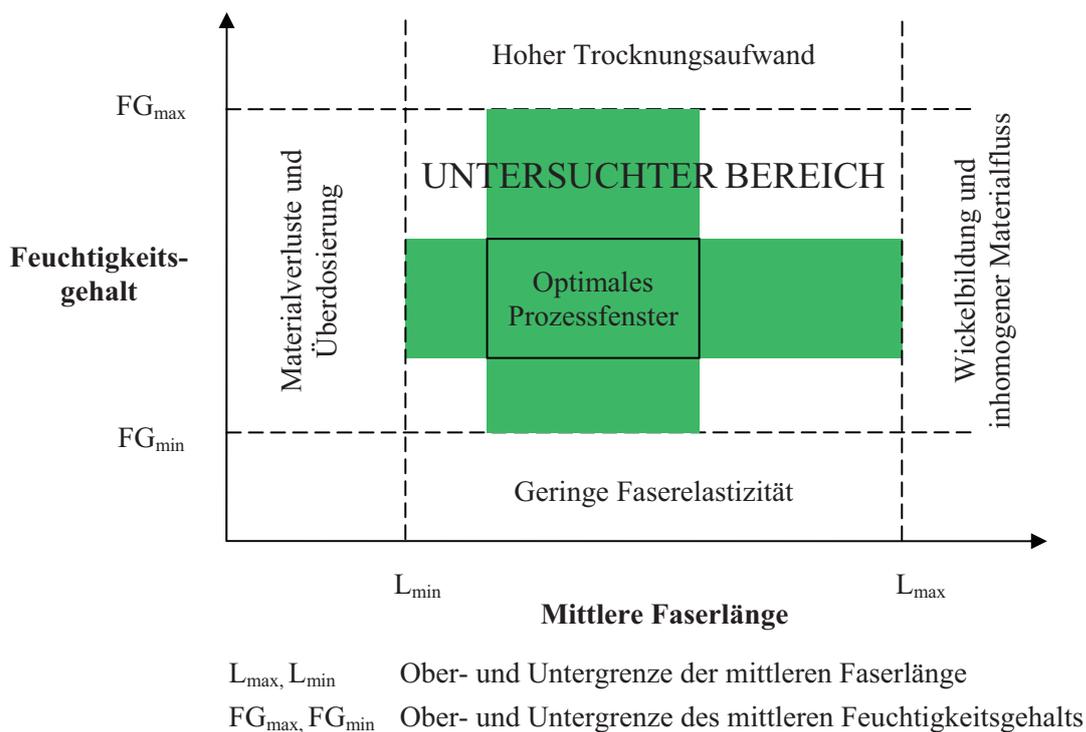


Abb. 22: Verarbeitungsfenster für die Fertigung einer prozessgerechten Rohstoffvorlage aus GPR Grünflachs

5.1.2 Einflussgrößen bei der Vlieslegung

Das wesentliche Ziel der Vlieslegung besteht in der Bildung einer Faserschicht mit einem vorgegebenen konstanten Flächengewicht, die auch hinsichtlich der Faserausrichtung im Flor, des Faseraufschlusses und

der Faserhomogenisierung über die gesamte Produktionsbreite gleichbleibende Eigenschaften aufweist. Oft wird außerdem die Forderung nach Minimierung des Entmischungseffektes unterschiedlicher Materialkomponenten im Vlies gestellt, der durch entsprechende Einstellung des Deflektorschildes beeinflusst werden kann. Bei der Verarbeitung des GPR Grünflachs ist eine gleichmäßige Verteilung loser, zur Entmischung neigender Flachsschäben in der Mattenstruktur anzustreben.

Die Bildung einer derartigen Faserschicht nach dem Airlay-Prinzip erfordert die Hauptschritte der Vorvliesbildung und der Vlieslegung. Bei der Vorvliesbildung im V21/R wird die Faseröffnung intensiviert, das Flächengewicht des Vorvlieses festgelegt und eine gleichmäßige Querverteilung des Fasermaterials auf dem Ablieferungsband zur Wirrvlieskarde K12 erreicht. Für eine reproduzierbare Prozessführung ist eine konstante und zuverlässige Vordosierung ausschlaggebend. Diese wird durch einen kontinuierlichen, geregelten Materialfluss durch den Rüttelschachtspeiser und eine Massekontrolle mittels der integrierten Wiegeeinrichtung erzielt (vgl. auch **Abb. 8**). Die Einstellung der Flächenmasse des Vorvlieses erfolgt durch die Regelung der Differenz zwischen der Geschwindigkeit des Ablieferungsbandes des RSP und des Ablieferungsbandes des V21/R. Im nächsten Prozessschritt erfolgt die Kardierung des Fasermaterials, die in die eigentliche Vlieslegung mündet. Dabei wird die Qualität der Faserverteilung in Maschinenquerrichtung nochmals verbessert. Als primäre Ziele der Kardierung werden meist eine bestmögliche Homogenisierung des Fasermaterials (Entwerrung der Faserbündel und Vergleichmäßigung der Faserlängenverteilung) und ein optimaler Faseraufschluss (im Idealfall bis zur Einzelfaser) angestrebt. Für eine reproduzierbare und qualitativ hochwertige Aufbereitung ist in diesem Zusammenhang von entscheidender Bedeutung, die Zustandsänderung des GPR-Materials entlang der gesamten Prozesskette zu charakterisieren.

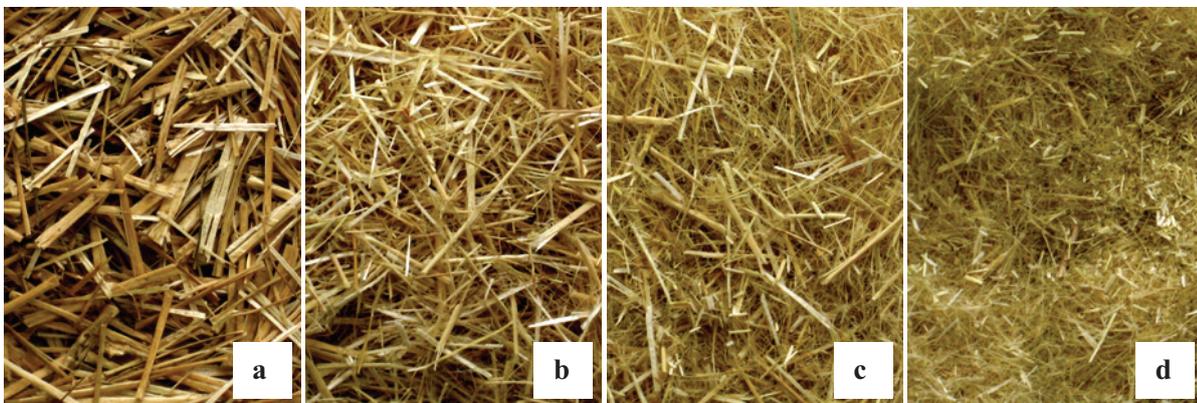


Abb. 23: Morphologieänderung des GPR Grünflachs im Verarbeitungsprozess:

- a. Pflanzenrohstoff im Ausgangszustand
- b. nach der Faseröffnung im Lin-Öffner
- c. nach der Faseröffnung im Vorvliesbildner V21/R und in der Wirrvlieskarde K12
- d. nach der Vernadelung zum Vliesstoff

Die Morphologie des GPR Grünflachs wurde anhand der Faserlängenmessungen an mehreren Materialproben untersucht. Als Ausgangsmaterial kam der GPR mit einer mittleren Ausgangsfaserlänge von ca. 70 mm zum Einsatz (vgl. **Abb. 17**). Dafür wurden jeweils Materialproben nach der Faseröffnung im Lin-Öffner, im Vorvliesbildner und in der Wirrvlieskarde sowie nach der Vernadelung entnommen, hinsichtlich der Faserlängenverteilung analysiert und mit dem Ausgangsmaterial verglichen (**Abb. 23**).

Die durchgeführte Faserlängenanalyse zeigt, dass bereits nach der ersten Faseröffnung im Lin-Öffner ca. 80% der Fasern die Länge von 10 bis 40 mm aufweisen (siehe „Faserlängenverteilung nach Lin-Öffner“ in **Abb. 24**). Im Weiteren ist eine geringfügige Änderung der Prozentanteile bei Faserlängen zwischen 10 und 20 mm sowie 20 und 30 mm mit der fortschreitenden Faseraufbereitung festzustellen (vgl. Varianten „Faserlängenverteilung nach Lin-Öffner“ und „Faserlängenverteilung nach V21/R und K12“ in **Abb. 24**). Dagegen nimmt der Prozentanteil der Faserlängen unter 10 mm mit jedem weiteren Verarbeitungsschritt deutlich zu, was auf eine intensive Faserentholzung zurückzuführen ist. Diese 10er-Fraktion besteht vorwiegend aus Flachsschäben. Faserlängen von über 60 mm sind nach der letzten Faseröffnung in der Wirtvliesskarde K12 kaum vorhanden (siehe „Faserlängenverteilung nach V21/R und K12“ in **Abb. 24**). Die Faserfeinheit steigt im Laufe der Verarbeitung stetig an, was auch am optischen Erscheinungsbild der untersuchten Proben zu erkennen ist (vgl. **Abb. 23**). Eine enge Faserlängenverteilung im Flor deutet im Allgemeinen auf eine gute Materialhomogenisierung hin.

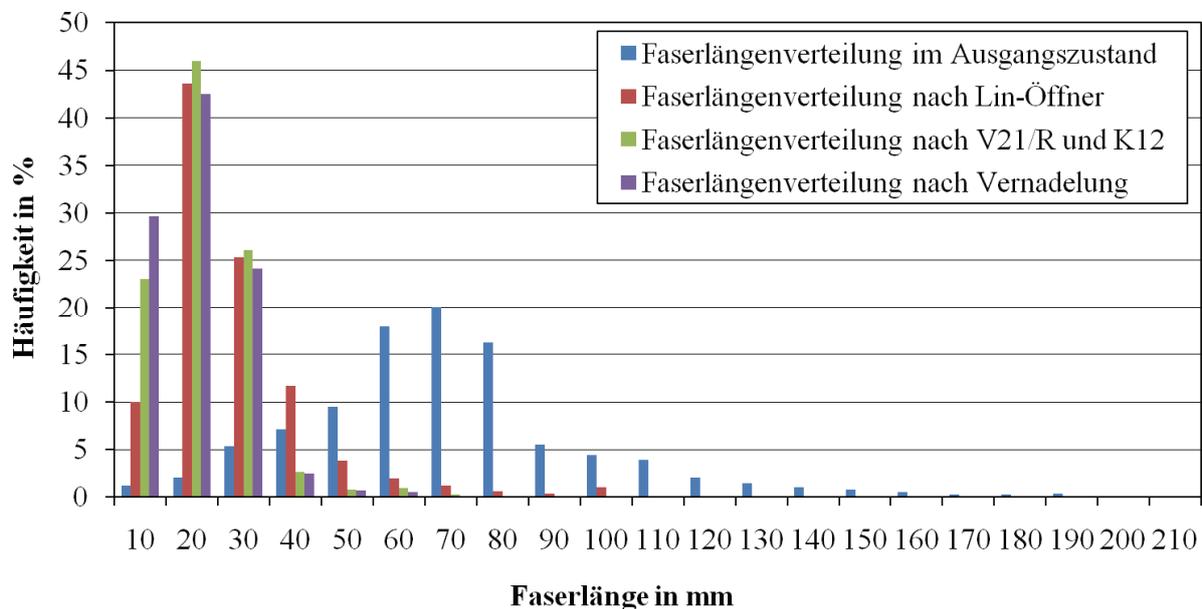


Abb. 24: Ergebnisse der Faserlängenanalyse

Die Faserorientierung im Flor kann in klassischem Krempelprozess durch Einstellung der Umdrehungsfrequenzen des Tambours und der Arbeiter-Wender-Walzenpaare in der Regel von „vorzugsweise quer“ über „isotrop“ bis hin zu „vorzugsweise längs“ bezogen auf Maschinenlaufrichtung variieren. Bei der aerodynamischen Vlieslegung nehmen die Fasern im Vlies infolge des Airlay-Prinzips eine Vorzugsanordnung in Maschinenlaufrichtung ein. Die Faserorientierung übt einen wesentlichen Einfluss vor allem auf den Vliesverzug im Verfestigungsprozess aus. Beim Vlies aus GPR Grünflachs ist eine geringe Breitenänderung der Halbzeugbahn beim Vernadeln vorteilhaft, wobei die Kompensation der resultierenden Volumenänderungen des Vlieses in Produktionsrichtung erfolgt. Ein Unterlegvliesstoff aus PE-Fasern verhindert das Verhaken der Fasern im Siebband und dient gleichzeitig als Filtermedium für feinere Fasern und Schäbenfraktionen, sodass deren Verluste infolge der Absaugung des Ablieferungsbandes minimiert werden. Durch eine entsprechende Einstellung des Deflektorschildes wurden im Rahmen der durchgeführten Arbeiten die Entmischung loser Flachsschäben und deren Ansammlung auf der Vlies-

unterseite weitgehend unterbunden. Den Nachweis dafür liefert die visuelle Analyse der Pressbauteile, die exemplarisch in **Abb. 25** dargestellt ist. Hier ist ein nahezu gleicher Schäbenanteil (helle längliche Partikeln) auf der Bauteilober- und -unterseite zu beobachten.

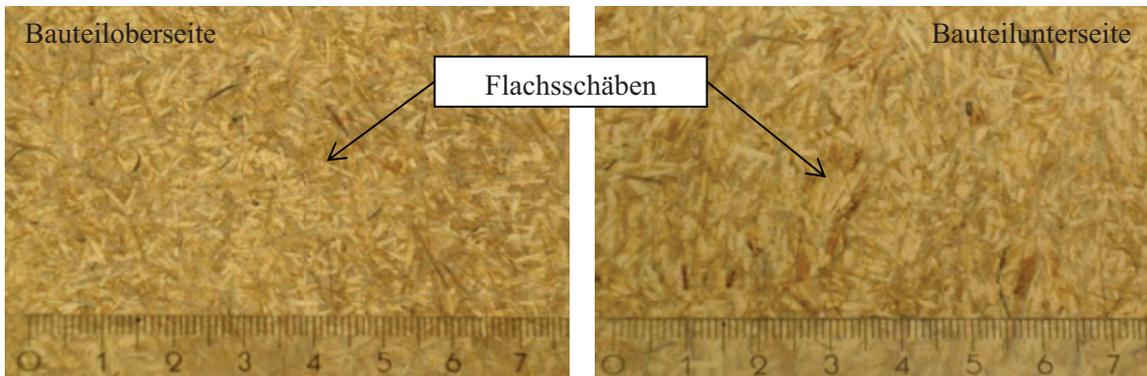


Abb. 25: Ober- und Unterseite eines Formpressbauteils aus GPR-Vliesstoff mit Polyurethan-Matrix

Für die untersuchten GPR-Vliese mit Flächengewichten von ca. 800 bis 1200 g/m² wurde unter Maßgabe maximaler Materialeffizienz jeweils eine Prozessführung erzielt, die eine reproduzierbare Qualität der Vliesbildung gewährleistet. Die Produktionsgeschwindigkeit lag beim mittleren Flächengewichte mit ca. 700 m²/h bereits innerhalb des wirtschaftlichen Bereichs, der sich an die Halbzeugherstellung aus konventionellen Naturfasern orientiert. Die in den Versuchen ermittelte Produktionsleistung in Abhängigkeit vom Halbzeugflächengewicht stellt **Tabelle 4** dar. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Fertigungslinie von GPR-Halbzeugen über ein weiteres Optimierungspotenzial zur Produktivitätssteigerung verfügt, das allerdings nur im Langzeitbetrieb voll ausgeschöpft werden kann.

Tabelle 4: Produktionsleistung in Abhängigkeit vom Halbzeugflächengewicht

Halbzeugflächengewicht in g/m ²	Maximale Produktionsleistung in kg/h
800	ca. 550
900	ca. 630
1000	ca. 700
1100	ca. 780
1200	ca. 860

5.1.3 Charakterisierung der Halbzeugverfestigung

Die Verfestigungstechnologie des Naturfaservlieses besitzt einen entscheidenden Einfluss auf die Halbzeugeigenschaften, wobei für das Vernadeln die Nadelcharakteristik, die Vernadelungsart und Vernadelungsdichte sowie die Stichtiefe ausschlaggebend sind. Die funktionellen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Verfahrensparametern und den resultierenden Eigenschaftsänderungen des Vliesstoffs sind sehr komplexer Natur und können oft nur empirisch in aufwendigen Versuchsreihen untersucht werden. Dadurch wird vor allem die Extrapolation der Eigenschaftswerte über das betrachtete Prozessfenster stark erschwert. Für die Fertigungsversuche von GPR-Vliesstoffen konnten dennoch beruhend auf

den gesammelten Erfahrungen der Vernadelung von konventionellen Naturfaservliesen Festlegungen bezüglich der wichtigsten Einflussgrößen der Vliesverfestigung getroffen werden.

Nadeltyp

Für eine effiziente Vernadelung grobfaseriger Vliese werden konische Verfestigungsnadeln mit reduziertem Schaft bevorzugt, die durch ihre erhöhte Stabilität deutlich längere Standzeiten gewährleisten. Derartige Verfestigungsnadeln – insbesondere mit Dreikantarbeitsteil – sind in der Praxis der Naturfaserverarbeitung sehr verbreitet. Jede Kante des Arbeitsbereiches besitzt in der Regel zwei bis drei Kerben (Widerhaken), die beim Durchstechen des Vlieses die Fasern erfassen und durch ihre Linearbewegung im Halbzeug entsprechend umorientieren, sodass ein hoher Verfilzungsgrad erreicht wird. Die einzelnen Kerben sind im Arbeitsbereich stets mit einem Abstand zueinander angeordnet, wodurch immer nur eine Kerbe in der jeweiligen Schnittebene vorliegt. Für die Vernadelung neuartiger GPR-Vliese wurde in Abstimmung mit dem Nadelhersteller Fa. Groz-Beckert der Nadeltyp gemäß **Abb. 26** ausgewählt. Diese 90,7 mm lange Nadel mit einem 1,5 mm starken Arbeitsschaft besitzt einen konischen Dreikantarbeitsteil und weist aufgrund einer schlanken Nadelspitze ein günstiges Eindringverhalten auf. Die Kerbform mit einem ausgeprägten Kerbgrund, einer abgerundeten Kerbbrust und einer Kerbtiefe von 0,15 mm gewährleistet einen hohen und zugleich schonenden Fasertransport während der Vernadelung des GPR-Vlieses.

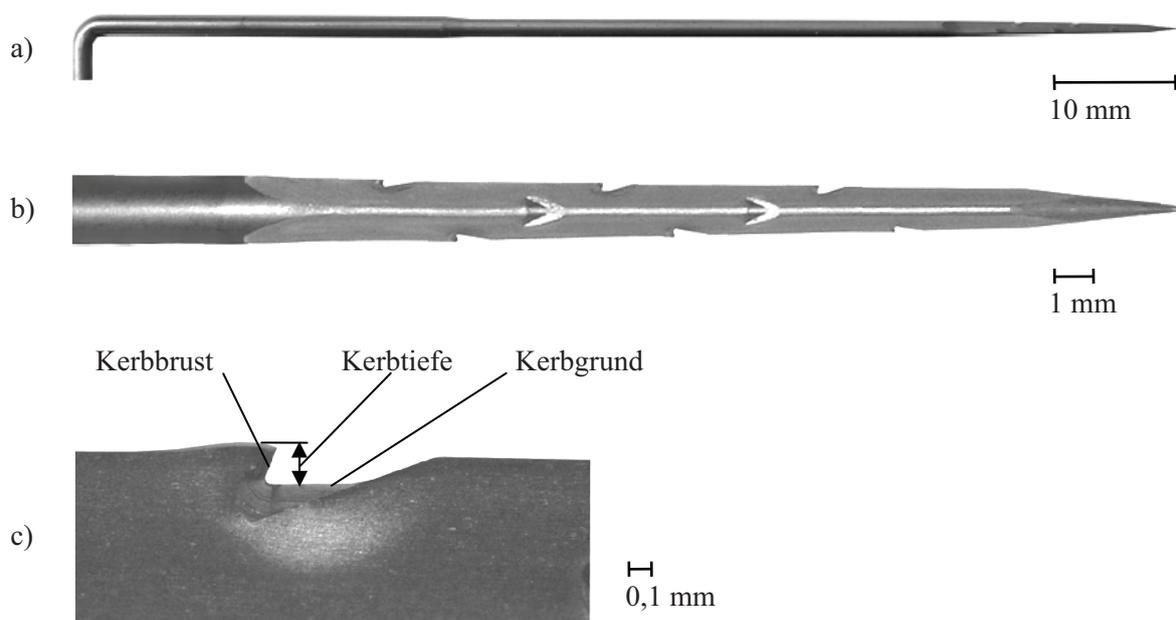


Abb. 26: a) Ausgewählte Verfestigungsnadel (Typ: 15 x 16 x 25 x 3 1/2 M332 G 53017, Fa. Groz-Beckert), b) Arbeitsbereich und c) Kerbengeometrie

Vernadelungsart

Die Vernadelung des Faservlieses kann je nach Maschinenausführung und Anforderung an die Halbzeugoberfläche entweder ein- oder beidseitig erfolgen. Im Allgemeinen führt die beidseitige Vernadelung zu einer geringeren Faserbelastung und -schädigung, da die Wahrscheinlichkeit des Wiederhol-einstichs bei derselben Faser im Vlies deutlich reduziert wird. Darüber hinaus kann eine hohe Faser-

verfilzung bereits bei einer geringen Einstichtiefe erzielt werden, wodurch dem Faserbruch effektiv entgegengewirkt wird. Die im Halbzeug beidseitig entstehenden Kanäle begünstigen außerdem die Durchtränkung des Vliesstoffs mit der reaktiven Matrixkomponente bei der Formteilmfertigung. Zur Verfestigung der untersuchten GPR-Halbzeuge kam die beidseitige Vernadelung zum Einsatz.

Vernadelungsdichte

Die Vernadelungs- oder Einstichdichte wird als Anzahl der Nadeleinstiche je Quadratzentimeter der Halbzeugoberfläche definiert. Die durch die Nadelbewegung hervorgerufene Faserverschiebung und -umorientierung im Vlies nehmen mit steigender Vernadelungsdichte zu, was einerseits zur Erhöhung des Verfestigungsgrades und andererseits oft zur Verringerung des Flächengewichts des Vliesstoffs und zur fortschreitenden Faserschädigung führt. Für die konventionellen technischen Naturfaservliesstoffe ist die Einstichdichte im Bereich von ca. 80 bis 200 Einstiche pro cm^2 ($1/\text{cm}^2$) üblich. Die Einstichdichte von unter $80 1/\text{cm}^2$ resultiert in der Regel in einer unzureichenden Halbzeugstabilität, die das Umformverhalten des Vliesstoffs bei der Formteilmfertigung beeinträchtigt und oft zu Verarbeitungsfehlern führt. Eine im Vergleich zu konventionellen Naturfasern gröbere Faserstruktur des GPR-Vlieses erfordert eine höhere Vernadelungsdichte. Daher wurde für die Versuchszwecke das Prozessfenster hinsichtlich der Einstichdichte von 100 bis $200 1/\text{cm}^2$ festgelegt.

Stichtiefe

Die Stichtiefe ist als Abstand von der Nadelspitze der durchgedrungenen Verfestigungsnadel bis zur Nadelaustrittseite des Vlieses definiert. Die Stichtiefe beeinflusst neben der Einstichdichte die Vliesvolumenänderung und bestimmt die maximal mögliche Faserverschiebung im Vlies je Maschinenhub sowie die Anzahl der Nadelkerben, die den Vliesquerschnitt durchdringen. Die ausgewählte Verfestigungsnadel von Groz-Beckert erlaubt bei der eingesetzten Maschinenkonfiguration grundsätzlich Stichtiefen von bis zu 37 mm. In der Praxis der Naturfaserverarbeitung wird allerdings zur Minimierung der Faserschädigung und des Nadelverschleißes sowie zur Produktivitätssteigerung eine deutlich kleinere Einstichtiefe eingestellt. Für die Vernadelung der untersuchten GPR-Vliese mit der mittleren Faserlänge von ca. 20 bis 25 mm wurde die Einstichtiefe von 11 mm gewählt, die näherungsweise einer halben mittleren Faserlänge entspricht. Die Untersuchung der Halbzeugverfestigung der GPR-Vliese in Abhängigkeit von der Stichtiefe würde eine Variation dieses Verfahrensparameters zwischen 9 mm und 14 mm in 1mm-Schritten erfordern, was allerdings mit einem sehr hohen maschinen- und materialtechnischen Fertigungsaufwand einhergeht.

Experimentelle Untersuchungen zur Sensitivitätsanalyse

Die experimentellen Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen den Verfestigungsparametern und den mechanischen Vliesstoffeigenschaften wurden an einem repräsentativen Beispiel eines GPR-Vlieses mit dem Flächengewicht von ca. 1300 g/m^2 vorgenommen, dessen Vernadelung bei einer konstanten Stichtiefe von 11 mm unter Variation der Einstichdichte zwischen 100 und $200 1/\text{cm}^2$ erfolgte. Den hergestellten Vliesstoffvarianten wurden in Längs- und Querrichtung jeweils zwölf streifenförmige Proben von ca. $50 \times 300 \text{ mm}$ entnommen und zur Ermittlung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung in einem Zugversuch nach ISO 9073-3 mit einer Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min bei einer

Einspannlänge von 200 mm getestet. Das Flächengewicht des Vliesstoffs wurde anhand der Probenmasse und -fläche berechnet und mit der Einstichdichte in Zusammenhang gebracht.

Die Abhängigkeit der gemessenen Höchstzugkraft von der Vernadelungsdichte ist in **Abb. 27** dargestellt, wobei der Fehlerbalken der jeweiligen Standardabweichung entspricht. Im Hinblick auf die gewählte Interpolationskurve ergeben sich hier zwei Höchstwerte der in Halbzeug-Längsrichtung entnommenen Zugproben, die bei 100 und 160 Einstichen pro cm^2 liegen und auf zwei vom Wirkprinzip unterschiedliche Abläufe im Vliesstoff hindeuten. Zum Verständnis des Kurvenverlaufs ist der Aufbau des GPR-Vliesstoffs von besonderer Bedeutung, der aus zwei Decklagen eines reißfesten Kunstfaservliesstoffs und einer dazwischen angeordneten, wenig verfestigten Kurzfaserschicht besteht. Mit steigender Vernadelungsdichte werden die Decklagen immer weiter geschwächt, womit die Zugfestigkeit des Gesamtverbundes verringert wird (Bereich **I**). Im weiteren Verlauf nimmt die Festigkeit der GPR-Zwischenschicht zu (Bereich **II**: Festigkeitserhöhung Gesamtverbund) und fällt anschließend aufgrund der fortschreitenden überproportionalen Faserschädigung ab (Bereich **III**).

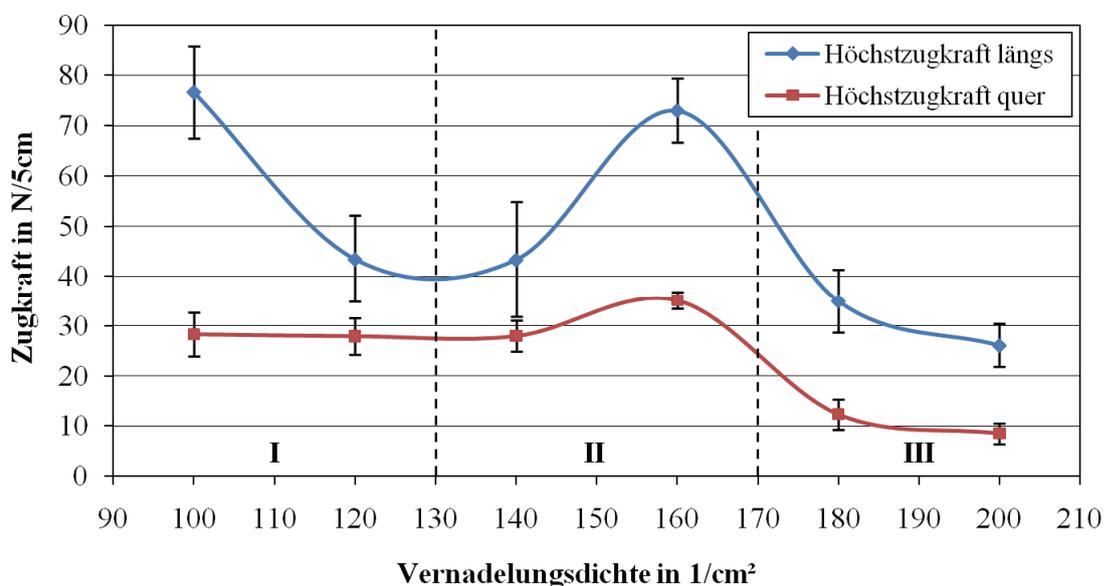


Abb. 27: Höchstzugkraft des ausgewählten GPR-Vliesstoffs mit einem Flächengewicht von 1300 g/m^2 in Abhängigkeit von der Vernadelungsdichte

Im Bereich **I** ist speziell eine hohe Zugfestigkeit in Längsrichtung durch die Abdeckware hervorgerufen. Eine nahezu konstante und vergleichsweise niedrige Zugkraft in Querrichtung korreliert mit derjenigen des eingesetzten Abdeckvliesstoffs, der ein Zugkraftverhältnis von ca. 4:1 zwischen Längs- und Querrichtung aufweist. Ein ausgeprägter Festigkeitsverlust in Längsrichtung bei der Erhöhung der Einstichdichte von 100 auf 120 $1/\text{cm}^2$ hängt außerdem mit dem Vliesverzug zusammen, der in einer starken Reduzierung des Flächengewichts des GPR-Vliesstoffs und somit der Fasermenge je Flächeneinheit resultiert. Sowohl die Decklagenschädigung als auch der Vliesverzug führen zur Änderung des optischen Erscheinungsbildes der Vliesstoffoberfläche.

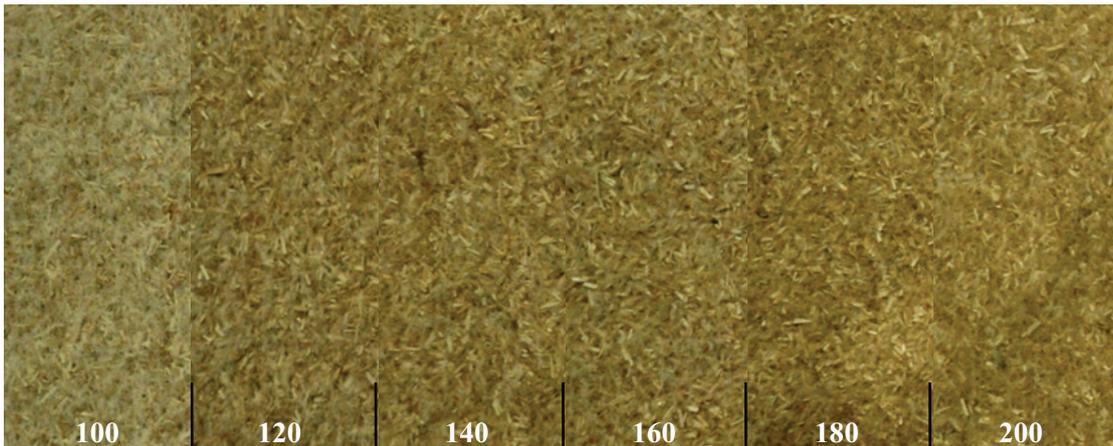


Abb. 28: Farbunterschiede verschiedener GPR-Vliesstoffe (Zahlen entsprechen der jeweiligen Einstichdichte)

In **Abb. 28** sind dazu die Farbunterschiede aufgrund der verschiedenen Vernadelungsdichten zu erkennen. Markant sind hier zwei Übergänge von 100 zu 120 und 160 zu 180 $1/\text{cm}^2$, die jeweils mit der drastischen Eigenschaftsminderung im Zugkraft-Einstichdichte-Schaubild in **Abb. 27** übereinstimmen. Im Bereich **II** ist ein deutlicher Festigkeitsanstieg sowohl in Längs- als auch in Querrichtung zu beobachten, der auf eine höhere Verfilzung der GPR-Fasern zurückzuführen ist. Die Überschreitung der Parametergrenze von ca. 170 $1/\text{cm}^2$ führt im Bereich **III** zu einer drastischen Eigenschaftsminderung in beiden Richtungen, was auf den Überlagerungseffekt der Faserschädigung und der Vliesstoffausdünnung – die sog. Zernadelung – hindeutet.

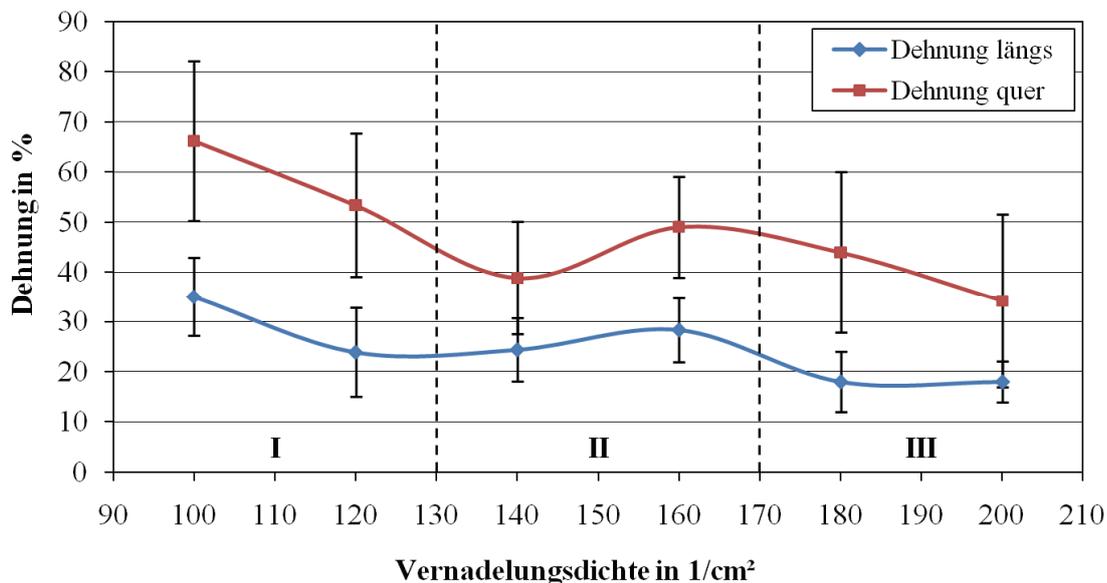


Abb. 29: Höchstzugkraftdehnung des repräsentativen GPR-Vliesstoffs mit einem Flächengewicht von ca. 1300 g/m^2 in Abhängigkeit von der Vernadelungsdichte

Der Kurvenverlauf der Höchstzugkraftdehnung in **Abb. 29** bestätigt ebenfalls die beschriebenen Zusammenhänge. Während hier im Bereich **I** die Dehnung aufgrund der Decklagenschädigung und des

Vliesverzugs stetig abnimmt, weisen die entsprechenden Werte im Bereich **II** eine steigende Tendenz auf, die aus der Verfestigung der GPR-Faserschicht folgt. Das Maximum liegt hier bei 160 1/cm^2 . Im Bereich **III** ist erneut die überproportionale Auswirkung der Faserschädigungen auf das Dehnungsverhalten des gesamten GPR-Vliesstoffs festzustellen.

Die Abhängigkeit des Flächengewichts des untersuchten GPR-Vliesstoffs von der zunehmenden Einstichdichte verdeutlicht **Abb. 30**. Eine starke Reduzierung des Flächengewichts im Bereich **I** (von 100 bis 120 1/cm^2) resultiert, unter Berücksichtigung eines gleichzeitigen Zugkraftverlustes (vgl. **Abb. 27**), aus der Kontraktion des Vliesstoffs in Dickenrichtung infolge der Längsausdehnung. Aufgrund einer fortschreitenden Vliesstoffverdichtung beginnt im Bereich **II** die Schrumpfung des Vliesstoffs in beiden Richtungen, was zur Flächenmassezunahme und zum Anstieg der mechanischen Vliesstoffeigenschaften führt. Bei einer Einstichdichte von über etwa 170 1/cm^2 sinkt im Bereich **III** das Flächengewicht des Vliesstoffs. Die mechanischen Vliesstoffeigenschaften erreichen aufgrund der Zernadelung das niedrigste Niveau.

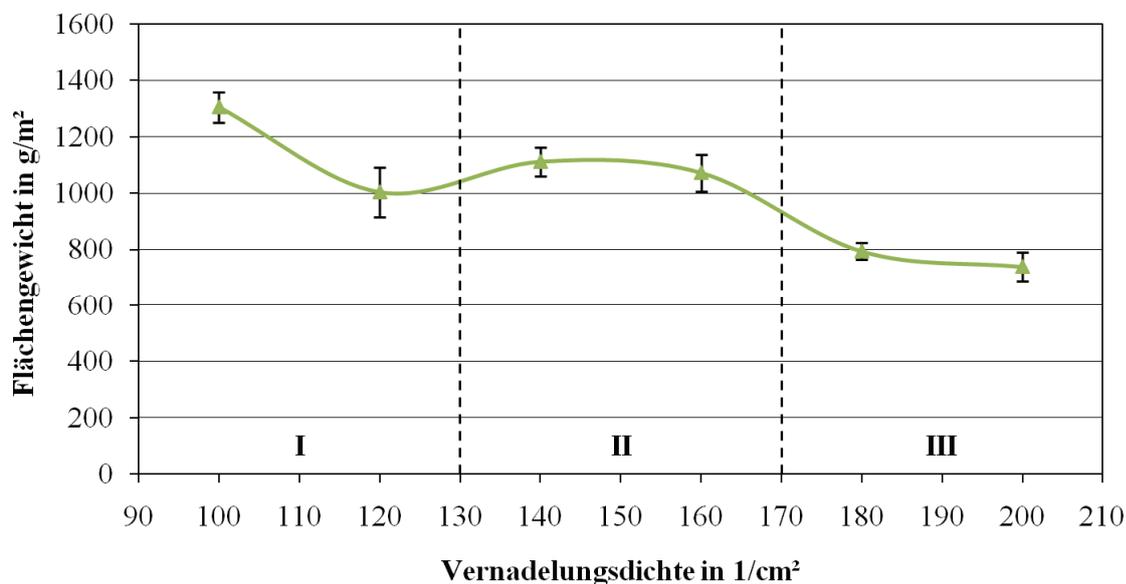


Abb. 30: Flächengewichtsänderung des repräsentativen GPR-Vliesstoffs in Abhängigkeit von der Vernadelungsdichte

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass für die Herstellung technischer Bauteile insbesondere die GPR-Vliesstoffe geeignet sind, die entweder mit 100 oder mit 160 Nadeleinstichen pro cm^2 verfestigt sind. Darüber hinaus ist bei der Formteilmontage auf Serienanlagen eine möglichst rieselfreie Halbzeugverarbeitung zu beachten. Diese Forderung setzt eine hohe Sperrfunktion der Abdecklagen voraus, wodurch beim Handhaben des Halbzeugs das Ausrieseln loser Partikel minimiert wird. Aus diesem Grund ist für die Bauteilmontage die Vliesstoffvariante mit einer Einstichdichte von ca. 100 1/cm^2 zu bevorzugen, was zudem eine höhere Produktionsgeschwindigkeit und längere Standzeit der Verfestigungsnadeln zulässt.

5.2 Spezifikation der Matrixkomponente

5.2.1 Vorversuche zur Matrixauswahl

Die Naturfaservliesstoffe können im Allgemeinen in Kombination mit verschiedenen Matrixharzen presstechnisch zu Bauteilen geformt werden. Bei der Formteilmfertigung in Großserie kommen derzeit Polyurethan-, Epoxid- und Polyacrylatharze zum Einsatz. Um die Eignung derartiger Matrixsysteme für die Verarbeitung von GPR-Vliesstoffen zu untersuchen, wurden vier praxisrelevante Harzsysteme entsprechend **Tabelle 5** ausgewählt.

Tabelle 5: Verwendete Matrixsysteme für die Verarbeitung mit GPR-Vliesstoffen

Nr.	Typ	Kennzeichnung	Mischungsverhältnis [Gewichtsanteile]	Verarbeitungstemperatur [°C]
1	Polyurethane	Polyol: Elastoflex [®] E 3592/100 Isocyanat: Iso 118/4	100 224	120–150
2	Epoxide	Harz: Araldite [®] LY 1135-1A Härter: Aradur [®] 1135-1B	100 20	140–150
3	Polyacrylate	Acrodur [®] 3558T	Fertigmischung	130–200
4	Polyacrylate	Acrodur [®] 3515T	Fertigmischung	130–200

Das 2K-PUR-Matrixsystem Elastoflex[®] E 3592/100 (Elastogran) ist ein für Naturfaserverbunde entwickeltes Halbhartsystem zur Herstellung von Dachhimmeln, Türseitenteilen oder Hutablagen im Automobilbau. Während der Vernetzung entsprechend der Polyadditionsreaktion entsteht CO₂ als Nebenprodukt, das zur Bildung feinporiger Schaumstruktur führen kann. Das Epoxidharz Araldite[®] LY 1135-1A (Huntsman Advanced Materials) ist ein schnellhärtendes und für die Naturfaserverarbeitung angepasstes 2K-Matrixsystem, welches im Laufe der Polymerisationsreaktion keine Nebenprodukte abspaltet und nach dem Aushärten kompakt bleibt. Das Polyacrylatharz Acrodur[®] 3558T (BASF) stellt ein Matrixsystem dar, das im ausgehärteten Zustand aufgrund der Modifizierung mit Latexpartikeln ein zähelastisch-duroplastisches Verhalten aufweist. Im Gegensatz dazu bleibt das Acrodur[®] 3515T (BASF) nach der Aushärtung hart-duroplastisch. Beide Polyacrylat-Systeme gehören nach ihrem Reaktionstyp zur Gruppe Polykondensate und spalten bei der Vernetzung Wasser ab. Die Abspaltung von Wasser kann beim Heißpressen zu Verarbeitungsproblemen wie Blasenbildung oder sogar Dampfexplosion führen und erfordert oft die Implementierung einer mehrfachen Werkzeugentlüftung in den Pressprozess.

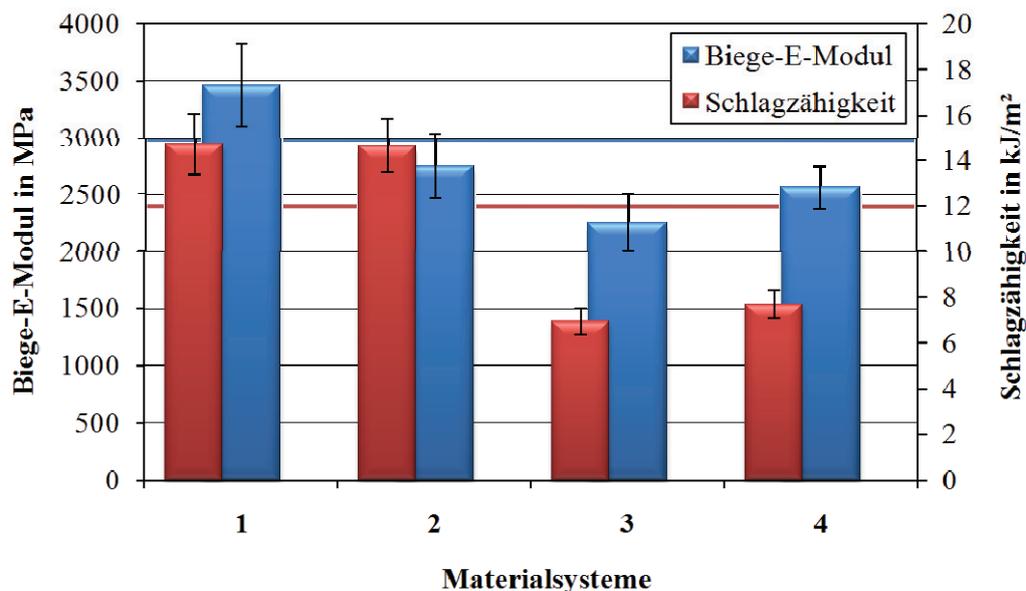
Auf Basis der ausgewählten Matrixkomponenten wurden in Verbindung mit GPR-Vliesstoffen entsprechende Materialsysteme mit einem einheitlichen Faseranteil von ca. 65 Gew.-% hergestellt. Dafür sind konfektionierte GPR-Halbzeuge mit einem Flächengewicht von ca. 1000 g/m² beidseitig mit dem jeweiligen Matrixharz besprüht und bei den abhängig vom Harztyp festgelegten Prozessparametern zu Prüfplatten gepresst worden. Die maßgeblichen Prozesskenngrößen sind in **Tabelle 6** zusammengefasst, wobei der Pressdruck umgerechnet auf die Zuschnittfläche (0,3 m²) dargestellt ist.

Tabelle 6: Untersuchte Materialsysteme und zugehörige Parameter des Pressprozesses

Material-system	Matrix	GPR-Halbzeug	Werkzeug-temperatur	Pressdruck	Presszyklus ^{*)}
	35 Gew.-%	65 Gew.-%	°C	MPa	s
1	Mat. 1 Tabelle 5	1000 g/m ²	130	2,2	45/8/3
2	Mat. 2 Tabelle 5	1000 g/m ²	145	2,2	60/8/3
3	Mat. 3 Tabelle 5	1000 g/m ²	165	2,2	70/6/3/15/3
4	Mat. 4 Tabelle 5	1000 g/m ²	165	2,2	70/6/3/15/3

^{*)} Gesamtpresszeit/Start der 1. Werkzeugentlüftung/Entlüftungsdauer/Start der 2. Werkzeugentlüftung/Entlüftungsdauer

Im Rahmen der durchgeführten Vorversuche zur Matrixauswahl wurden der Biege-E-Modul und die Charpy-Schlagzähigkeit als Bewertungskriterien festgelegt, die in Bezug auf die typischen Anforderungen von Türverkleidungsbauteile ausschlaggebend sind. Den hergestellten Testplatten sind Probekörper entnommen und dem Biegeversuch nach EN ISO 14125 sowie der Schlagzähigkeitsprüfung nach EN ISO 179-2 zugeführt worden. Die ermittelten Werkstoffkennwerte sind in **Abb. 31** dargestellt, wobei die Mindestgrenze für den Biege-E-Modul von 3.000 MPa und die Mindestgrenze für die Charpy-Schlagzähigkeit von 12 kJ/m² gesondert gekennzeichnet sind. Hieraus folgt, dass nur der Verbundwerkstoff **1** mit dem PUR-Matrixharz Elastoflex[®] E 3592/100 beide Anforderungen erfüllt und daher für weiterführende Versuche prädestiniert ist.

**Abb. 31:** Versuchsergebnisse zur Bewertung der Matrixeignung

5.2.2 Viskositätsmessungen

Das bevorzugte Matrixsystem ist ein viskoelastisches Fluid, das aufgrund der chemischen Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Reaktionskinetik seine rheologischen Eigenschaften drastisch ändert. Das rheologische Verhalten der Matrixkomponente bestimmt die Imprägnierung der faserverstärkten Verbundstruktur während des Pressvorganges und darüber hinaus die Bauteilqualität. Die Reaktionskinetik des Harzsystems kann durch Umgebungsbedingungen stark beeinflusst werden, wobei der Temperatur oft eine ausschlaggebende Bedeutung zukommt (vgl. [Geh98]). Zur rheologischen Charakterisierung des ausgewählten PUR-Harzes wurden mit Hilfe des Rheometers AR 2000ex mit integrierter Temperierkammer Viskositätsmessungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Das Messprinzip dieses Rheometers basiert auf der Erfassung der Phasenverschiebung zwischen der periodischen Schubspannung, die durch eine oszillierende Rotationsbewegung des Gerätestempels auf die Materialprobe ausgeübt wird, und der Scherung im viskoelastischen Fluid (siehe etwa [Mez06]). Für die Viskositätsmessung wurde das fertig gemischte Harzsystem auf die untere vortemperierte Platte mit einem Durchmesser von 25 mm aufgetragen und mit dem oberen vortemperierten Stempel gleicher Größe kontaktiert, sodass der Zwischenraum mit dem Probematerial vollständig ausgefüllt wurde. Bei allen Messungen wurde der Spalt zwischen den kreisrunden Platten auf 1 mm eingestellt. **Abb. 32** zeigt das verwendete Messgerät sowie eine Materialprobe vor und nach der Messung.



Abb. 32: Rheometer AR 2000ex mit integrierter Temperierkammer (TA Instruments), Materialprobe vor und nach der Viskositätsmessung

Bei der definierten Prüftemperatur ist die Materialprobe in Schwingung versetzt worden. Die Dauer von der Auftragung der Materialprobe auf die Messplatte bis zum Beginn der Messung (Vorvernetzung) betrug ca. 10 s. Die Geräteeinstellungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Messtemperatur: 20, 40, 60, 80, 100, 120°C
- Frequenz (oszillierend): 1 Hz
- Spalthöhe: 1 mm
- Amplitude am Außenrand: 0,01 mm

Den funktionalen Zusammenhang der gemessenen komplexen Viskosität η^* von der Temperatur und Zeit stellt **Abb. 33** dar. Die Messergebnisse verdeutlichen die thermisch bedingte Beschleunigung der chemischen Vernetzungsreaktion im Versuchsmaterial. Der Anfang des jeweiligen η^* -Kurvenanstiegs charakterisiert den Zeitpunkt der Aktivierung der Reaktionskomponenten. Die Temperaturerhöhung von 20°C auf 120°C hat eine Verkürzung der Topfzeit von ca. 500 s auf ca. 15 s zur Folge, wobei die Vorvernetzung bereits mitberücksichtigt ist. Der Übergang vom flüssigen in den festen Zustand konnte bei den 20°C- und 40°C-Proben nicht nachgewiesen werden, was auf hohe Restanteile viskoser Materialkomponenten zurückzuführen ist. Die anderen Proben ließen einen Dämpfungsfaktor kleiner eins feststellen und dadurch den Übergangspunkt zum festen Zustand definieren. Dennoch liegt der gemessene η^* -Maximalwert bei der 20°C-Probe wesentlich höher als bei der 120°C- oder 100°C-Probe. Dies ist auf das starke Aufschäumen des Harzes bei den Temperaturen über 100°C zurückzuführen, wobei sich eine geschlossenporige Schaumstruktur mit dünnen Zellwänden ausbildet. Die Wechselwirkung dieser verformungsfähigen Zellwände und der darin eingeschlossenen Heißluft kann zu niedrigeren Viskositätswerten führen.

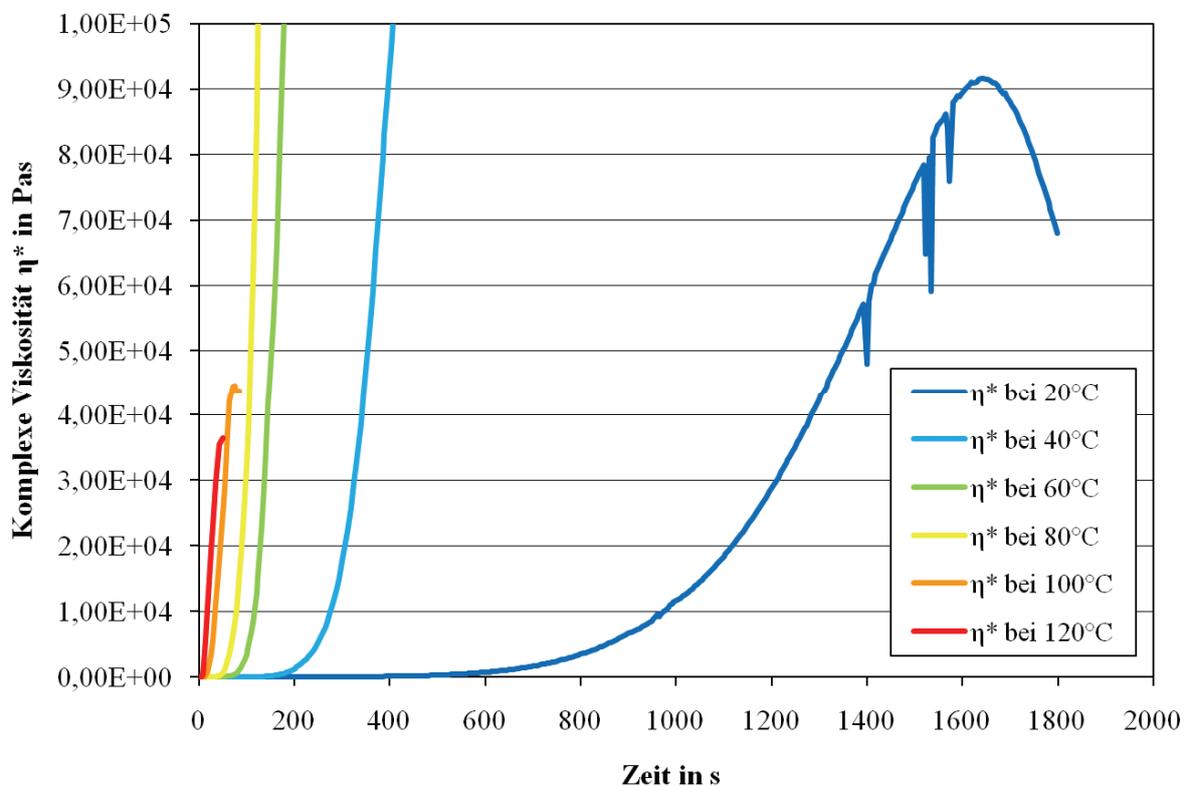


Abb. 33: Komplexe Viskosität des PUR-Harzsystems Elastoflex® E 3592/100 im Messbereich bis 100.000 Pas als Funktion Temperatur und Zeit

In der Praxis sind kurze Fertigungstaktzeiten anzustreben, wofür die Reaktionskinetik des Matrixharzes im Temperaturbereich von über 100°C von besonderem Interesse ist. Der Verlauf der Viskosität als Funktion der Zeit ist in **Abb. 34** am Beispiel der 120°C-Probe dargestellt. Der Schnittpunkt der entsprechenden Speicher- und Verlustmodul-Kurven spiegelt den Gel-Punkt des Harzes bei gegebener Prüftemperatur wieder. Die Viskosität steigt rasch an und die Matrixkomponente geht in den Festzustand über. Die Verteilung des Matrixmaterials im GPR-Halbzeug und somit die Durchtränkung der Naturfasermatte sind demnach nur innerhalb der ersten 15–20 s möglich, wobei die maximale Steifigkeit der Matrix nach ca. 50–60 s der Prozessdauer erreicht wird.

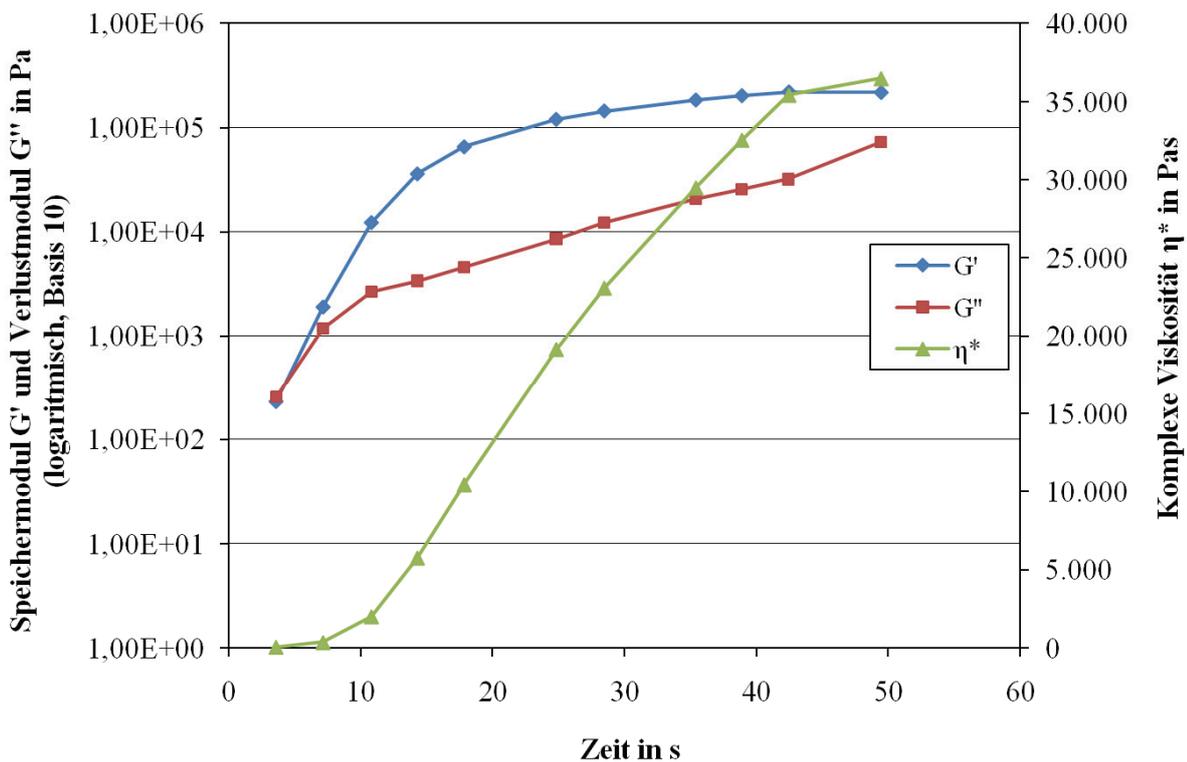


Abb. 34: Verlauf des Speicher- und Verlustmoduls sowie der komplexen Viskosität des PUR-Harzsystems Elastoflex® E 3592/100 bei 120°C

5.3 Entwicklung und Charakterisierung der Verbundwerkstoffe

5.3.1 Testmatrix zur Ermittlung grundlegender Werkstoffkennwerte

Zur Charakterisierung der GPR-Verbundwerkstoffe und zur Ermittlung der rezepturabhängigen Materialkennwerte wurden folgende werkstofftechnischen Einflussgrößen untersucht:

- Halbzeuganisotropie
- Halbzeugflächengewicht
- Matrixanteil
- Strukturverdichtung

Dafür wurden die in **Tabelle 7** dargestellten Werkstoffvarianten hergestellt, wobei die mit 100 l/cm^2 verfestigten GPR-Halbzeuge (vgl. Kap. 5.1.3) und das favorisierte PUR-Harzsystem Elastoflex[®] E 3592/100 zum Einsatz kamen. Das Halbzeugflächengewicht wurde im praxisrelevanten Bereich von 800 bis 1200 g/m^2 variiert. Der Matrixanteil betrug bei der Variante 1000 g/m^2 durchschnittlich 30, 35 oder 40 Gew.-% und bei den weiteren Werkstoffvarianten 35 Gew.-%. Die unterschiedliche Strukturverdichtung konnte durch die Pressdruckeinstellung und die Pressspaltsteuerung eingestellt werden.

Tabelle 7: Untersuchte Werkstoffvarianten

Materialparameter	Einheit	Werkstoffvarianten				
Halbzeugflächengewicht	g/m^2	800	900	1000	1100	1200
Matrixanteil	Gew.-%			30		
		35	35	35	35	35
				40		
Bereich der Werkstoffdichte für unterschiedliche Plattendicken	g/cm^3	0,5–1,15	0,4–1,15	0,45–1,15	0,5–1,0	0,55–1,15

Die hergestellten Testplatten wurden den in **Tabelle 8** aufgeführten Prüfungen unterzogen. Im einachsigen Zugversuch nach EN ISO 527-4 wurden der E-Modul, die Zugfestigkeit, die Dehnung bei Maximalkraft und die Querkontraktionszahl ermittelt, wobei die zur Bestimmung der Querkontraktionszahl notwendige synchronisierte Dehnungsmessung in Längs- und Querrichtung mit Hilfe eines Laserextensometers berührungslos erfolgte. Die Ermittlung der Biegeeigenschaften wurde im Dreipunkt-Biegeversuch in Anlehnung an EN ISO 14125 und der Schlagzähigkeit im instrumentierten Schlagbiegeversuch in Anlehnung an EN ISO 179-2 durchgeführt. Zwecks des praxisorientierten Werkstoffvergleichs ist dafür stets eine einheitliche Stützweite von 50 mm gewählt worden. Vor der Durchführung des jeweiligen Versuchs wurden die Masse und die Abmessungen jedes Probekörpers bestimmt, um eine präzise Zuordnung der Werkstoffkennwerte und der Materialdichte vorzunehmen.

Für die mikroskopischen Strukturuntersuchungen wurden den bereits getesteten Probekörpern Materialproben entnommen, in ein geeignetes Gießharz eingebettet und anschließend mit Hilfe einer Poliermaschine standardmäßig präpariert. Aufgrund der bekannten Materialzusammensetzung und -dichte konnte auf Basis der Schlibfbilder eine grobe Klassifizierung in Bezug auf die Werkstoffkennwerte vorgenommen werden (näheres hierzu siehe Kap. 5.3.3). Darüber hinaus wurden zu Vergleichszwecken Schlibfbilder eines in Großserie eingesetzten Verbundwerkstoffs aus Flachs-/Sisalfaser-Halbzeug und Polyurethan-Matrixharz angefertigt.

Tabelle 8: Angewendete Prüfverfahren und untersuchte Kenngrößen des GPR-Verbundwerkstoffs

Prüfverfahren	Norm	Probekörper- beschreibung	Kenngröße	Prüfbedingungen	
Zugversuch	EN ISO 527-4	Typ 2 250/25/variabel*)	E-Modul	Prüfgeschwindigkeit	1 mm/min
			Zugfestigkeit	Prüfgeschwindigkeit	10 mm/min
			Dehnung bei F_M	Prüfgeschwindigkeit	10 mm/min
			Querkontraktionszahl	Prüfgeschwindigkeit	1 mm/min
Dreipunkt-Biegeversuch	EN ISO 14125	Klasse II 80/15/variabel*)	Biege-E-Modul	Prüfgeschwindigkeit	5 mm/min
			Biegefestigkeit	Prüfgeschwindigkeit	5 mm/min
			Biege-Bruchdehnung bei F_M	Prüfgeschwindigkeit	5 mm/min
Schlagzähigkeitsprüfung	EN ISO 179-2	Typ 2 ungekerbt 80/15/variabel*)	Charpy-Schlagzähigkeit	Schlagrichtung	schmalseitig
Auflichtmikroskopie				Vergrößerung	x100 x300

*) Länge/Breite/Höhe in mm

5.3.2 Pressversuche mittels ausgewählter Platten- und Formwerkzeuge

Versuche mit Plattenwerkzeug

Die in **Tabelle 7** spezifizierten Materialkomponenten wurden im Plattenwerkzeug zu unterschiedlich verdichteten Verbundwerkstoffplatten verpresst. Dafür sind zunächst die vorgetrockneten, ca. 0,5 x 0,6 m großen Halbzeugzuschnitte auf einer 2K-Sprühanlage beidseitig mit einer entsprechenden Matrixharzmenge beschichtet worden. In den ersten Pressversuchen erfolgte die Ermittlung der für eine maximale Verbundwerkstoffdichte von ca. 1,2 g/cm³ erforderlichen Werkzeugschließkraft, wobei für eine niedrigere Werkstoffdichte eine Begrenzung des Pressspaltes im Bereich zwischen ca. 1,1 mm und ca. 3,6 mm mit Hilfe von Abstandhaltern (Stahlblechen) vorgenommen wurde. Die Prozessparameter lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Werkzeugschließkraft: 680 kN
- Werkzeugtemperatur: 130°C
- Presszyklus: 45/6/3 (Gesamtpresszeit/Start der Werkzeugentlüftung/Entlüftungsdauer in s)

Anhand der hergestellten Pressplatten konnten anschließend die entsprechenden Werkstoffkennwerte ermittelt und die Strukturanalyse mittels eines Auflichtmikroskops durchgeführt werden.

Versuche mit Formwerkzeug

Zur Validierung des Umformprozesses wurden die repräsentativ ausgewählten GPR-Halbzeuge mit dem Flächengewicht von ca. 1100 g/m² in einem Versuchswerkzeug (Bauteilprototyp der Türverkleidung des 1er BMW, hinten rechts, E-87) zu Bauteilen verarbeitet. Hierzu sind ca. 0,75 x 1 m große Halbzeugzuschnitte nach der Vortrocknung im Absorptionstrockner beidseitig mit insgesamt ca. 620 g/m² Matrixharz besprüht worden. Danach erfolgte das Verpressen der manuell ins Formwerkzeug eingelegten Zuschnitte zu GPR-Formteilen (siehe **Abb. 35**). Die eingesetzte Harzmenge entsprach einem Matrixanteil von ca. 35 Gew.-%, wobei diese Größe aufgrund der verarbeitungsüblichen Schwankungen des Halbzeugflächengewichts (vgl. dazu auch **Abb. 30**) und des Harzauftrags um ca. ±2,5 Gew.-% vom angegebenen Soll-Wert abwich. Der Presszyklus und die Werkzeugtemperatur wurden dabei identisch mit denjenigen der Plattenfertigung eingestellt. Die Werkzeugschließkraft musste bedingt durch eine größere projizierte Fläche des Bauteils auf ca. 1500 kN erhöht werden.



Abb. 35: Fertigung eines GPR-Verbundbauteils im Versuchswerkzeug Typ E-87. Mit PUR-Harz beschichtetes GPR-Halbzeug (links) und konsolidiertes Formteil (rechts)

Der im Pressverfahren hergestellte Bauteilträger und die kaschierte Türverkleidung sind in **Abb. 36** dargestellt, wobei die für die Umformung kritischen Bauteilbereiche gesondert gekennzeichnet sind. Der Randbeschnitt erfolgte durch eine Pinchkante direkt im Presswerkzeug. Die Formpressteile wiesen eine sehr hohe Oberflächengüte auf und wurden anschließend mittels einer Vakuumbeschichtungsanlage mit einer TPO-Folie mit Schaumrücken überzogen. Zum Anlegen des Vakuums an die Dekorfolie sind aufgrund einer luftdichten Bauteilstruktur an der Armauflage definierte Bohrungen ($\varnothing 1$ mm) eingebracht worden. Nach der Bauteilkaschierung wurde das Türmodul durch die Montage entsprechender Anbauteile fertiggestellt.

Das Umformverhalten der eingesetzten GPR-Halbzeuge wurde anhand der Verformung eines auf die Halbzeugoberfläche applizierten 10 mm Rasters analysiert. Dabei wurden die Bauteilbereiche mit hohen Umformgraden – Napf und Armauflage – hinsichtlich der maximal zulässigen Halbzeugausdehnung detailliert untersucht (siehe **Abb. 37**).

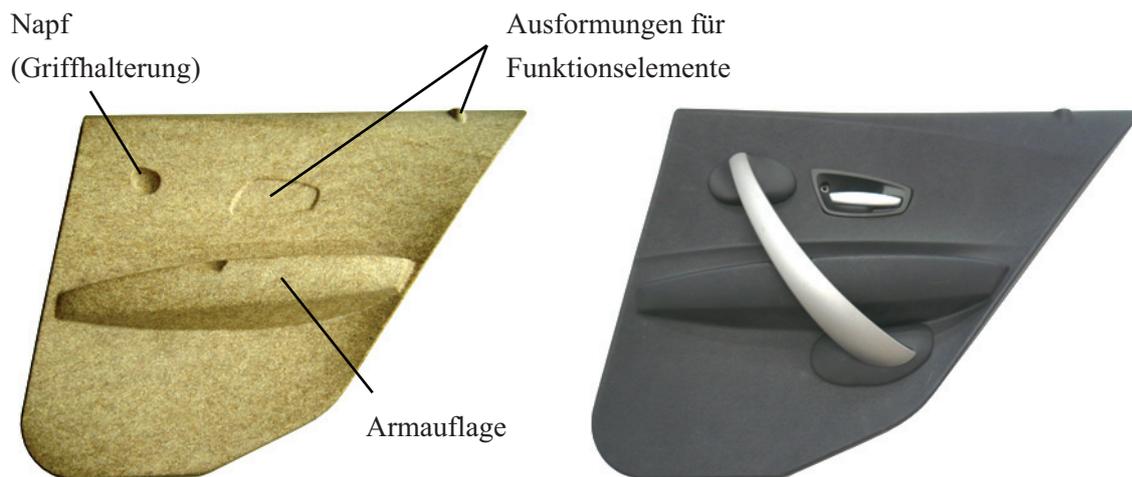


Abb. 36: Fertiges Formpressbauteil und vakuumkaschierte Türverkleidung mit Anbauteilen

Insgesamt konnte ein homogenes Verformungsbild des Rasters festgestellt werden, was auf eine günstige Zuschnittanordnung im Formwerkzeug zurückzuführen ist. In diesem Falle stimmte die Halbzeug-Produktionsrichtung, bei der eine wesentlich höhere Zugfestigkeit im Halbzeug vorliegt, mit der geometriebedingten Hauptverformungsrichtung überein. Diese hohe Zugfestigkeit gewährleistet das „Nachfließen“ des Halbzeugs in die Werkzeugkavität während des Pressvorgangs. Die Analyse des Umformverhaltens ergab eine maximal zulässige Halbzeug-Dehngrenze für lokale Verformung von ca. 50%. Das Überschreiten dieser Dehngrenze führt zum lokalen Versagen des Halbzeugs, was sich in Form von harzgefüllten Strukturbereichen ohne Faserverstärkung sowie in der Bildung der Einfallstellen äußert.



Abb. 37: Analyse des Umformverhaltens der GPR-Halbzeuge anhand der Rasterverzerrung. Links oben: Napfbereich, rechts unten: Armauflage

Zusammenfassend wurde in den durchgeführten Pressversuchen eine effiziente und reproduzierbare Formteilmontage mit den hier entwickelten GPR-Halbzeugen unter Einsatz von Standardausrüstungen und Serienwerkzeugen der Automobilindustrie nachgewiesen. Ein besonderes Augenmerk muss bei der Prozessgestaltung auf designspezifische Bauteilanforderungen und maximal zulässige Umformgrade gerichtet werden.

5.3.3 Auswertung der Prüfergebnisse

Mikroskopische Untersuchungen

Die GPR-Verbundstruktur unterscheidet sich von derjenigen eines konventionellen Naturfaserverbundes durch einen hohen Anteil an Flachsschäben, die im Vergleich zu Flachsfasern sehr geringe Festigkeitseigenschaften aufweisen. Der zelluläre Aufbau der Schäben mit seitlich geschlossenen Zellwänden verhindert deren vollständiges Ausfüllen mit dem Matrixharz während des Pressvorganges, was neben dem Luftporengehalt eine niedrige Materialdichte im Verbund bedingt. In **Abb. 38** sind die Strukturbestandteile eines GPR-Bauteils und eines konventionellen Naturfaserverbundes bei 300facher Vergrößerung dargestellt. Hierin sind Fasern, Schäben, Luftporen und Matrix deutlich zu erkennen. Hervorzuheben ist, dass das Matrixharz nicht in die zelluläre Schäbenstruktur eingedrungen ist, sondern sich in den Zwischenräumen des Faser-Schäben-Fachwerkes verteilt. Die konventionelle Faserverbundstruktur beinhaltet demgegenüber keine Schäben, dafür aber zahlreiche größere Luftporen.

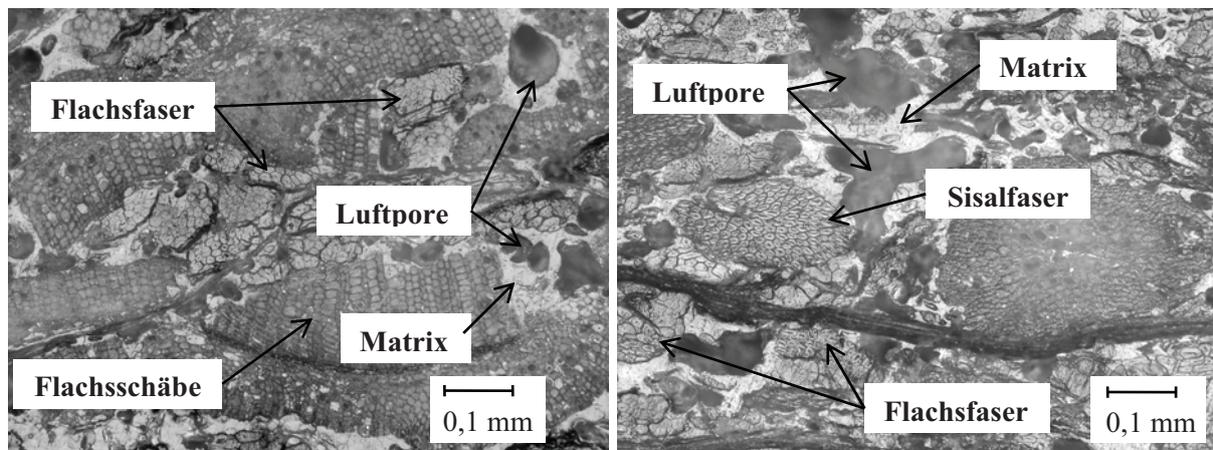


Abb. 38: Vergleich einer GPR-Verbundstruktur (links) und eines konventionellen Verbundwerkstoffs mit Flachs-/Sisalfaser-Verstärkung (rechts) bei 300facher Vergrößerung und einer Materialdichte von ca. $0,8 \text{ g/cm}^3$

Bei einer vergleichbaren Dichte weist der GPR-Verbund im Unterschied zum konventionellen NFK-Bauteil eine geringere Porenanzahl auf, was einerseits zu einer niedrigeren Luftdurchlässigkeit des GPR-Bauteils führt und andererseits eine bessere Oberflächenqualität der Formteile zur Folge hat. Diese gute Oberflächenqualität ist darauf zurückzuführen, dass die faserarmen Bereiche der Bauteiloberfläche von den Flachsschäben ausgefüllt werden und dadurch die presstechnische Formgebung in einer höheren Konturtreue resultiert.

Die Mikrostruktur der GPR-Verbunde ist stark abhängig von der Materialverdichtung. Je nach Werkstoffdichte können sich sog. Trockenstellen mit einer unzureichenden Imprägnierung ausbilden. Die GPR-Verbundwerkstoffe unterschiedlicher Dichte sind in **Abb. 39** dargestellt, wobei das Halbzeugflächengewicht und der Matrixharzgehalt überall gleich sind. Hier ist eine Trockenstelle – dunkler Bereich mit einem hohen Luftanteil – für den GPR-Verbundwerkstoff mit der Dichte $0,5 \text{ g/cm}^3$ charakteristisch. Die Steigerung der Materialverdichtung im Pressprozess führt zu kompakteren Werkstoffen mit einer besseren Faserbenetzung und einem hohen Kennwertniveau. Allerdings resultiert eine höhere Materialverdichtung in der Abnahme der Bauteildicke (vgl. in **Abb. 39** GPR-Verbunde mit der Dichte $0,7$ und $1,1 \text{ g/cm}^3$), was trotz der Erhöhung des E-Moduls aufgrund eines geringeren Querschnitt-Trägheitsmomentes zu einer niedrigeren Biegesteifigkeit des Formteils führt. Daher ist eine Abstimmung der Anforderungen an den Werkstoff mit denjenigen an das Formpressbauteil erforderlich.

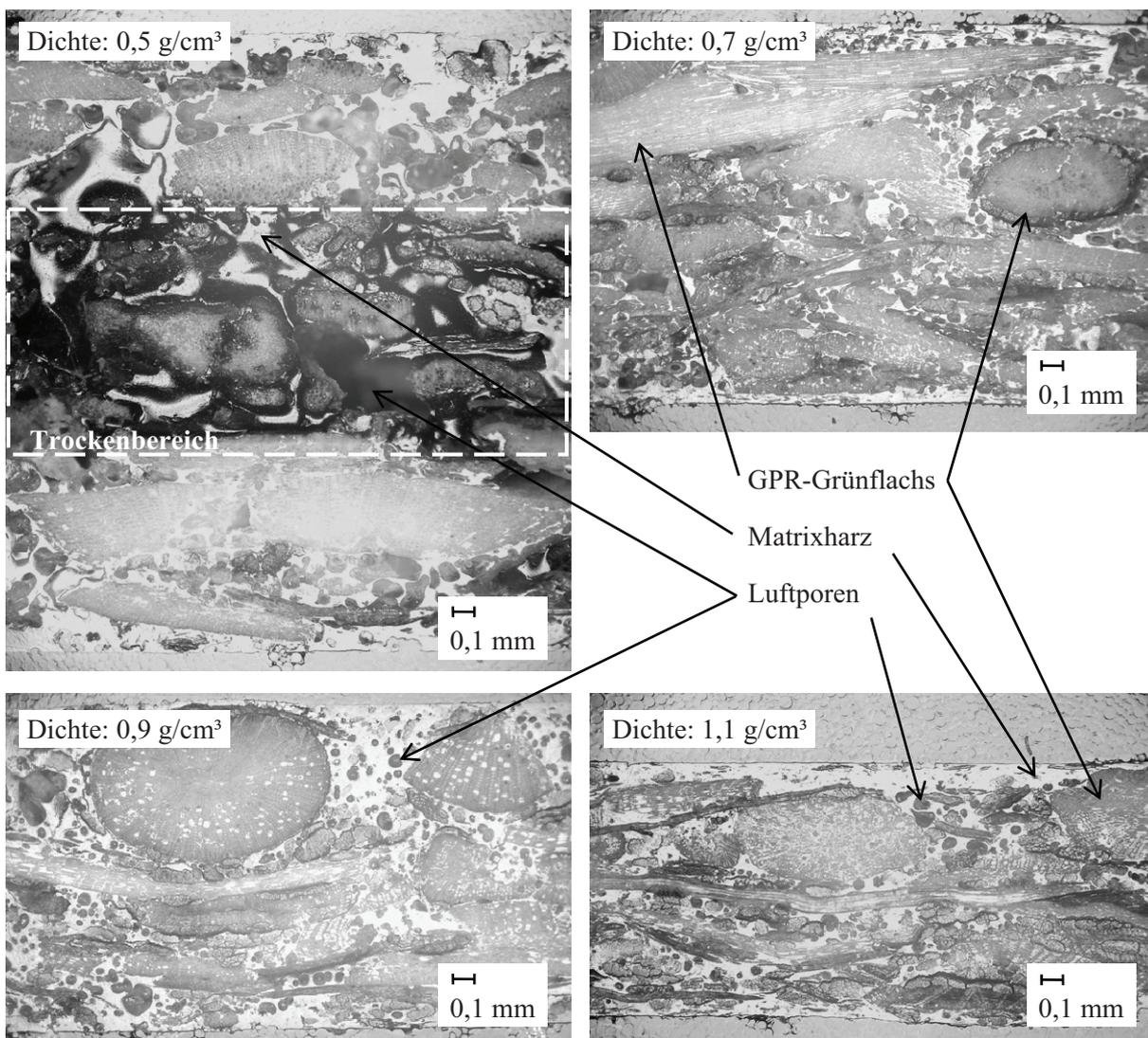


Abb. 39: Mikrostruktur der untersuchten GPR-Verbundwerkstoffe bei 100facher Vergrößerung

Die Abhängigkeit der Plattendicke von der Werkstoffdichte und dem Halbzeugflächengewicht ist in **Abb. 40** für 800, 1000 und 1200 g/m^2 GPR-Halbzeuge repräsentativ dargestellt. Kennzeichnend ist hier der im

Vergleich zum theoretisch zu erwartenden linearen Verlauf (gestrichelter Bereich der Trendlinie) überproportionale Anstieg der Plattendicke beim Unterschreiten definierter Werkstoffdichten (von ca. $0,55 \text{ g/cm}^3$ für 800 g/m^2 -Variante, ca. $0,6 \text{ g/cm}^3$ für 1000 g/m^2 -Variante und ca. $0,75 \text{ g/cm}^3$ für 1200 g/m^2 -Variante), was mit der Ausbildung der Trockenstellen in der Plattenmitte und einer ausgeprägten Struktur-Rückfederung nach dem Pressen zusammenhängt. Trotz eines einheitlichen Matrixharzanteils von ca. 35 Gew.-% bei allen drei betrachteten Halbzeugvarianten erfordert die Durchtränkung der 1200 g/m^2 Halbzeuge einen höheren Pressdruck als im Falle von Halbzeugen mit 800 g/m^2 Flächen-gewicht. Der Grund dafür liegt in den deutlich längeren notwendigen Fließwegen, die das Matrixharz in schwereren Halbzeugen überwinden muss, um eine ausreichende Strukturimprägnierung zu erreichen.

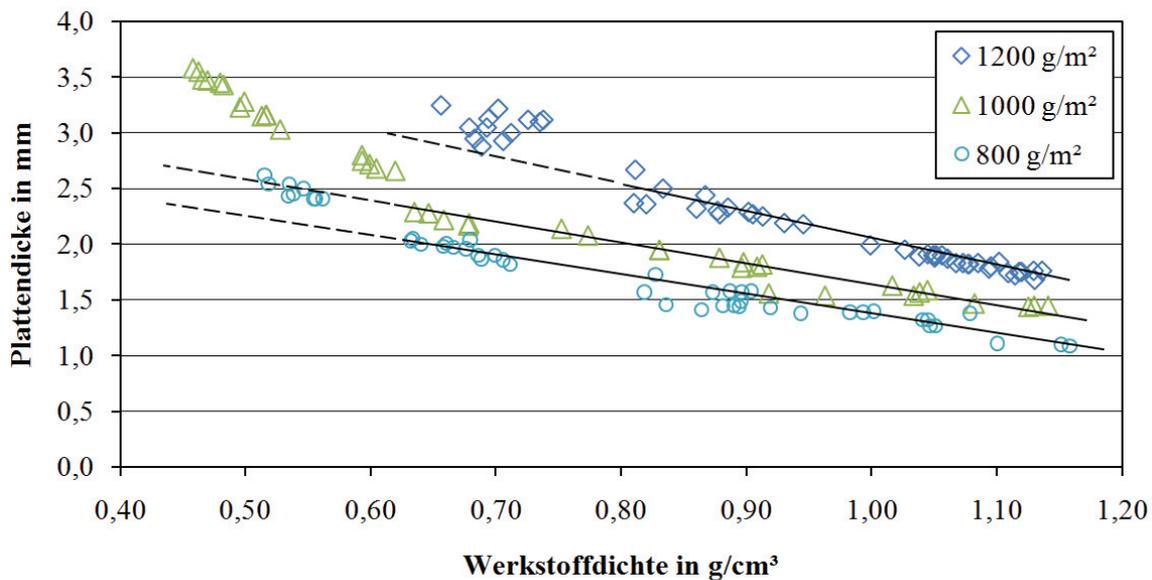


Abb. 40: Plattendicke h in Abhängigkeit von der Werkstoffdichte und dem Halbzeugflächengewicht für untersuchte GPR-Verbundwerkstoffe mit einem Matrixharzanteil von 35 Gew.-%

Insgesamt liefert die Mikrostrukturanalyse der untersuchten GPR-Presswerkstoffe einen praktikablen Nachweis für die angestrebte ganzheitliche Nutzung von Flachspflanzen als Verstärkungskomponente in Kunststoffbauteilen und erlaubt die werkstoffmechanischen Fragestellungen zum Materialverhalten in Abhängigkeit der Prozessbedingungen zu klären.

Mechanische Werkstoffkennwerte

Die Untersuchungen mechanischer Werkstoffkennwerte zeigten, dass die getesteten GPR-Werkstoffe sehr geringe Abhängigkeiten von der Prüfrichtung, dem Halbzeugflächengewicht und dem Matrixanteil aufweisen. Die Kennwertabhängigkeit von der Strukturverdichtung ist dagegen sehr stark ausgeprägt. Entscheidend für die Bauteilauslegung ist das Verbundverhalten in Abhängigkeit der jeweiligen Belastungsart.

Einfluss der Halbzeuganisotropie

Die geringfügige Anisotropie der GPR-Verbundstruktur ist in **Abb. 41** und **Abb. 42** angegeben, wobei die Messwerte für den Zug- und Biege-E-Modul sowie die Zug- und Biegefestigkeit in Längs- und Querrichtung bezogen auf die Halbzeug-Produktionsrichtung als Funktion der berechneten Materialdichte

dargestellt sind. Daraus folgen höhere Zugeigenschaften in Querrichtung als in Längsrichtung bei einer deutlichen Überschneidung der entsprechenden Bereiche aufgrund einer großen statistischen Streuung.

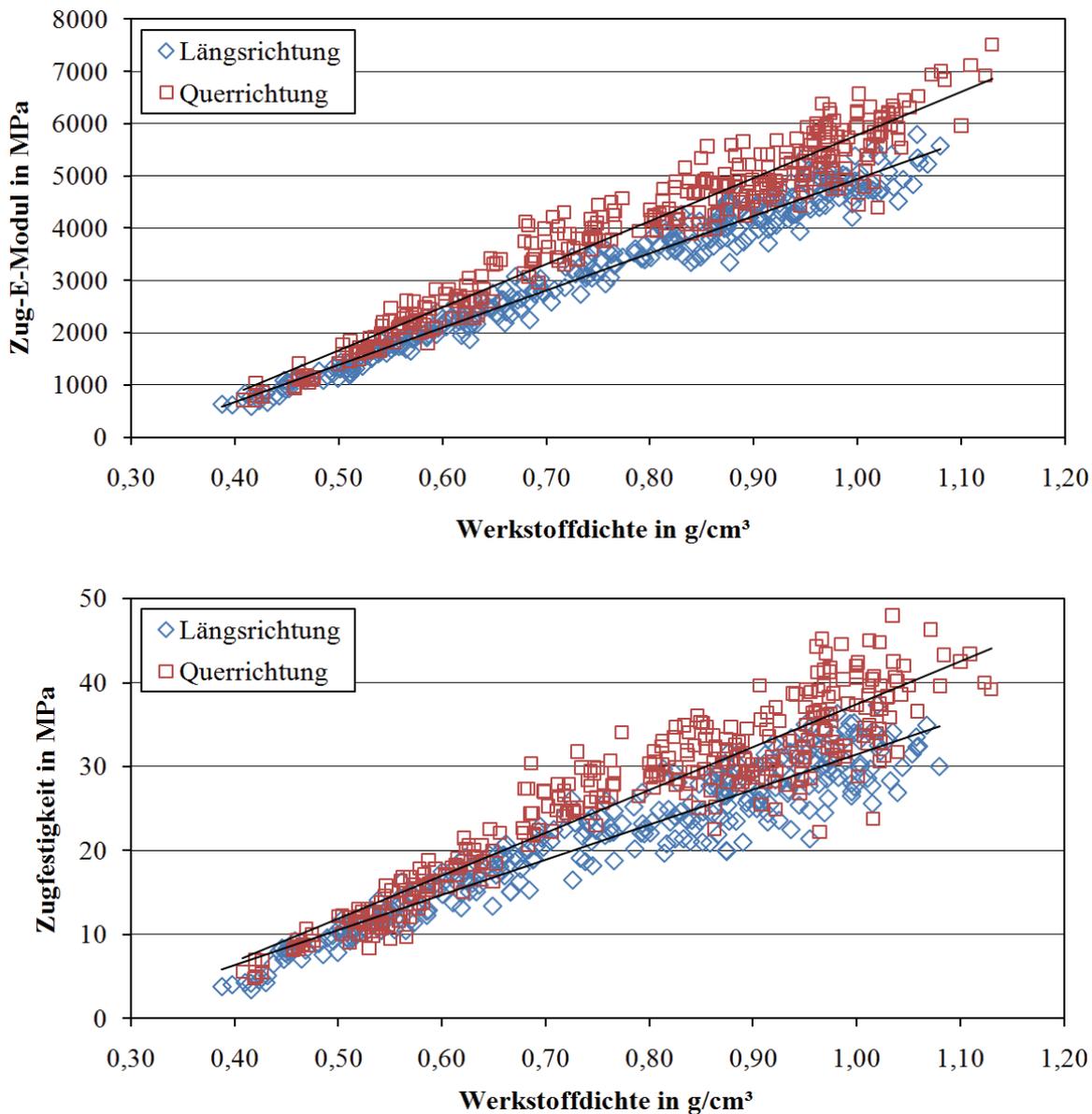


Abb. 41: Zugeigenschaften untersuchter GFR-Verbundwerkstoffe in Längs- und Querrichtung; Gesamtdarstellung für Halbzeugflächengewichte von 800 bis 1200 g/m² (Matrixanteil 35 Gew.-%)

Bei einer Werkstoffdichte von unter 0,6 g/cm³ ist in **Abb. 41** eine Übereinstimmung der jeweiligen Kennwerte zu erkennen. Eine stärkere Kennwertstreuung bei höherer Werkstoffdichte ist auf die Wirrlage der Verstärkungsfasern in der Verbundstruktur und auf eine mögliche lokale Umverteilung der Matrixkomponente zurückzuführen. Der Zug-E-Modul und die Zugfestigkeit steigen mit der wachsenden Werkstoffdichte nahezu linear an. Der Verlauf des Biege-E-Moduls und der Biegefestigkeit ist ebenfalls linear, wobei in den jeweiligen Richtungen die Kennwerte über den gesamten experimentell untersuchten Bereich der Werkstoffdichte übereinstimmen. Verglichen mit der ausgeprägten Richtungsabhängigkeit

der Halbzeugeigenschaften sind sämtliche untersuchten GPR-Verbunde quasi-isotrop, was mit unterschiedlichen Kraftübertragungsmechanismen bei den Halbzeugen und Verbunden im Zusammenhang steht (vgl. **Abb. 41** und **Abb. 27**).

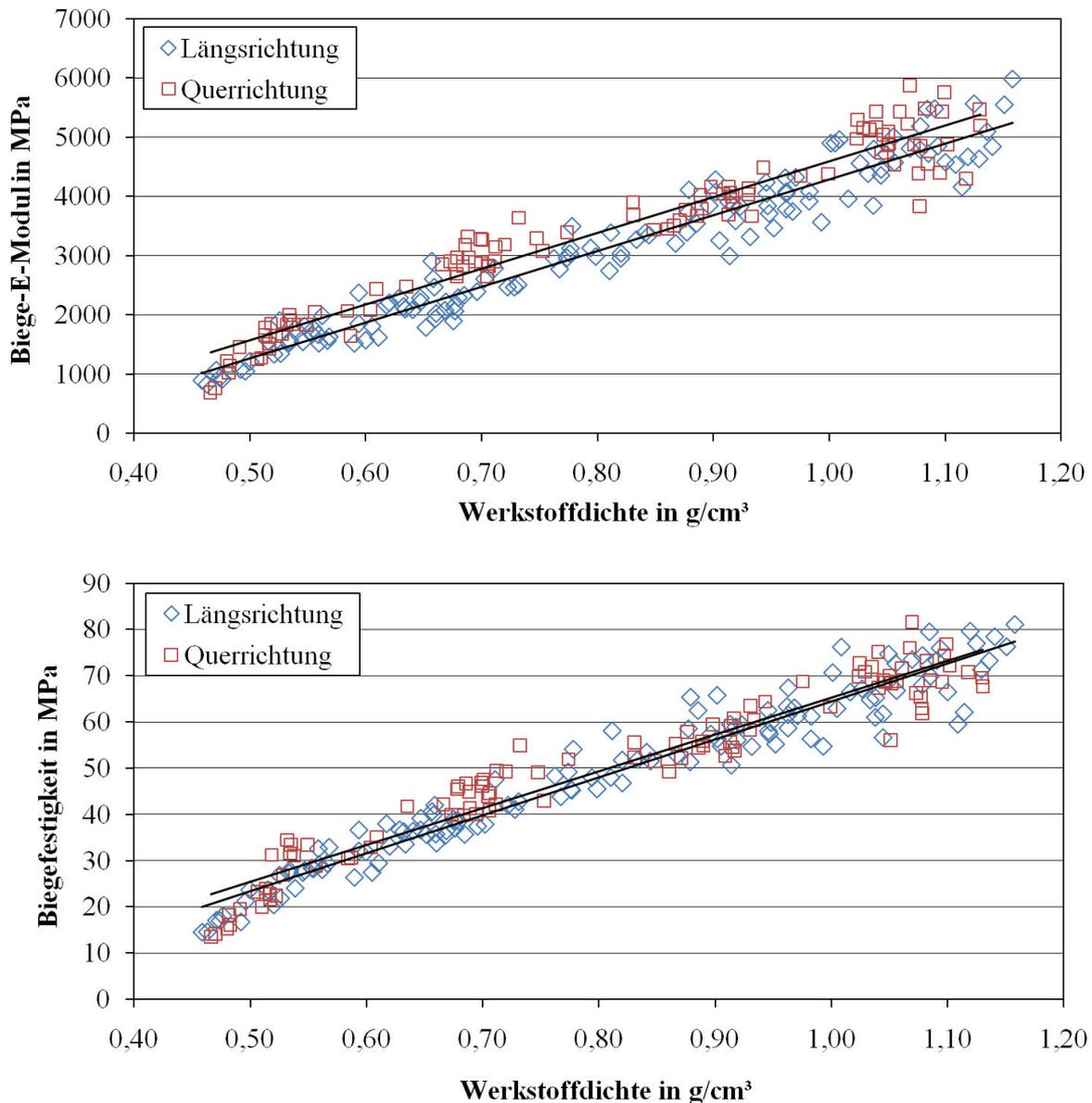


Abb. 42: Biegeeigenschaften untersuchter GPR-Verbundwerkstoffe in Längs- und Querrichtung; Gesamtdarstellung für Halbzeugflächengewichte von 800 bis 1200 g/m² (Matrixanteil 35 Gew.-%)

Halbzeugflächengewicht und statische Verbundeigenschaften

Den Einfluss des Flächengewichts der verwendeten GPR-Vliesstoffe auf den Zug-E-Modul und die Zugfestigkeit verdeutlicht **Abb. 43**. In den Diagrammen sind für die Halbzeugflächengewichte von 800 bis 1200 g/m² die Mittelwerte mit den zugehörigen Standardabweichungen angegeben. Die entsprechenden linearen Trendlinien weisen weitgehend einen ähnlichen Verlauf auf, womit eine geringe Auswirkung dieses Parameters auf die Zugeigenschaften der GPR-Verbunde festzustellen ist. Dennoch lässt sich

insbesondere im Zugfestigkeitsdiagramm eine geringfügige Steigerung der Festigkeitseigenschaften mit abnehmendem Halbzeugflächengewicht erkennen, wobei die ausgeprägte Messwertstreuung diesen Effekt relativiert. Die beschriebene Tendenz kann durch eine vergleichsweise bessere Halbzeugimprägnierung mit dem Matrixharz im Bereich niedriger Flächengewichte und somit durch einen steigenden Kraftschluss zwischen Fasern und Matrix im Gesamtquerschnitt des Zug-Probekörpers erklärt werden. Bei allen untersuchten Varianten geht die Erhöhung der Werkstoffdichte mit einer deutlichen Steigerung der Festigkeit einher.

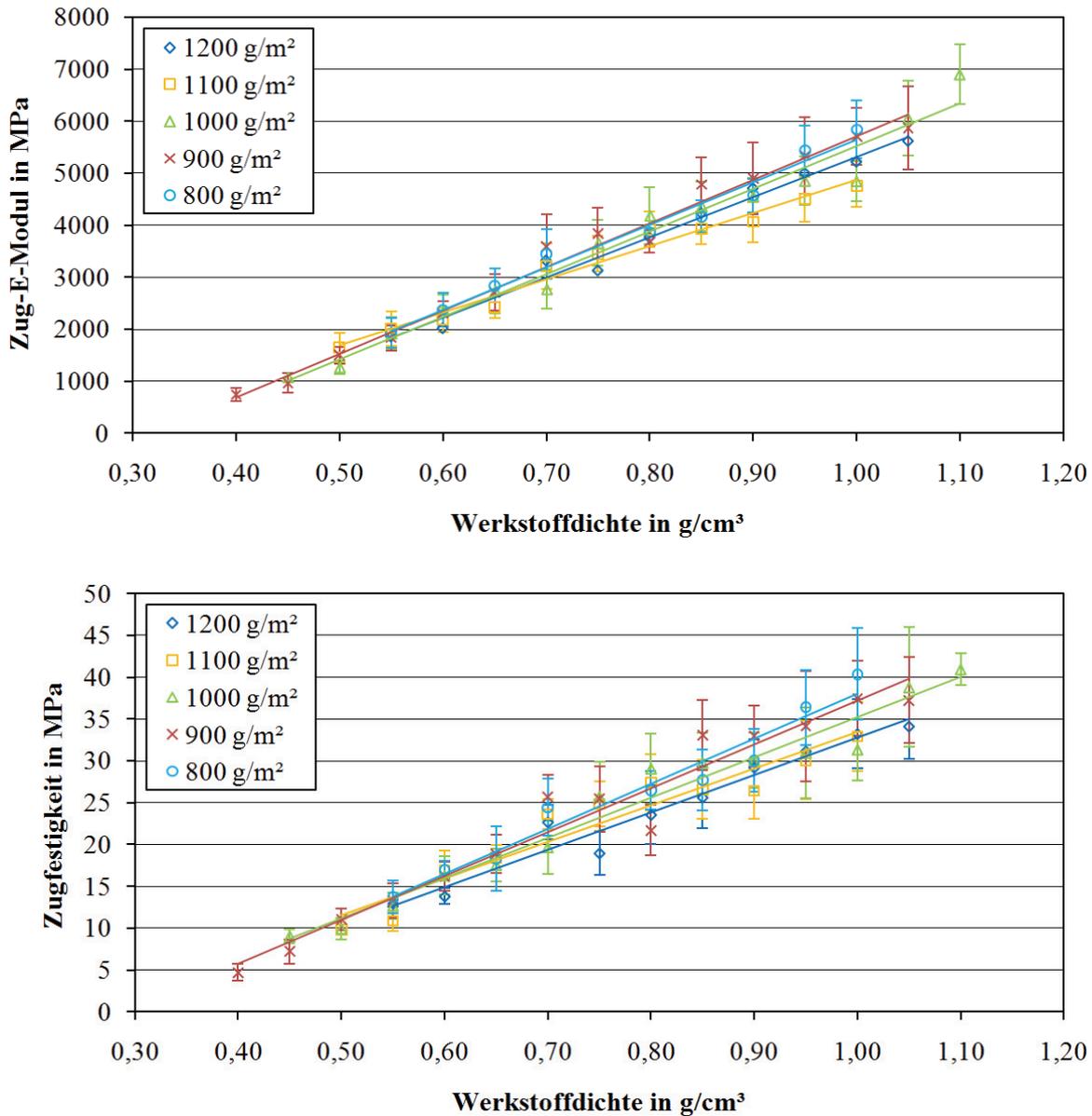


Abb. 43: Gemittelter Zug-E-Modul (oben) und gemittelte Zugfestigkeit (unten) der GPR-Verbundwerkstoffe in Abhängigkeit vom Halbzeugflächengewicht und der Werkstoffdichte (Matrixanteil 35 Gew.-%)

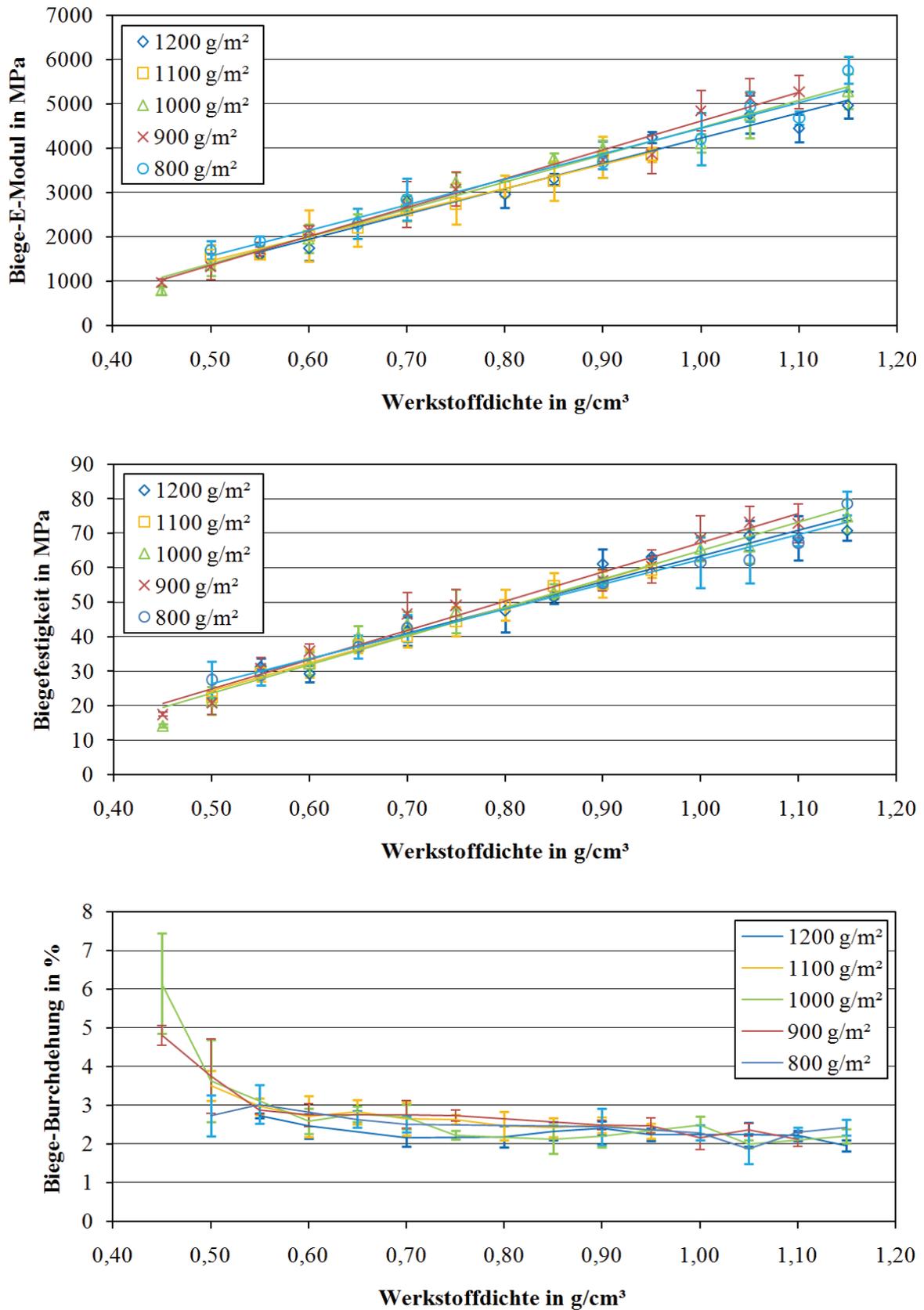


Abb. 44: Gemittelter Biege-E-Modul (oben), gemittelte Biegefestigkeit (mittig) und gemittelte Biege-Burchdehnung (unten) der GPR-Verbundwerkstoffe in Abhängigkeit vom Halbzeugflächen-gewicht und der Werkstoffdichte (Matrixanteil 35 Gew.-%)

Die lineare Steigerung der Zugkennwerte mit zunehmender Werkstoffdichte konnte auch beim Verlauf des Biege-E-Moduls und der Biegefestigkeit beobachtet werden (siehe **Abb. 44**). Im Unterschied dazu nimmt die Biege-Bruchdehnung (Dehnung der Randfaser bei maximaler Querkraft) mit der steigenden Strukturverdichtung grundsätzlich leicht ab. Der Verlauf der Biege-Bruchdehnung weist im unteren Dichtebereich eine stark ausgeprägte Abweichung vom Lineartrend auf, wobei der nicht-linear/linear-Übergangsbereich vom jeweiligen Halbzeugflächengewicht abhängt. Im Vergleich zu den Zugeigenschaften ist bei den Biegeeigenschaften eine höhere Übereinstimmung der Kennwerte der einzelnen Messreihen festzustellen.

Der überproportionale Anstieg der Biege-Bruchdehnung mit abnehmender Werkstoffdichte ist in der Entstehung der Trockenstellen im mittleren Bereich der Verbundplatten begründet und korreliert entsprechend dem jeweiligen Halbzeugflächengewicht mit der ebenfalls überproportionalen Plattendickenzunahme in **Abb. 40**. Der unzureichend imprägnierte Bereich der neutralen Faser hat eine Reduzierung der Biegesteifigkeit zur Folge, da die zug- und druckbelasteten Strukturbereiche keine vollkommene Haftung aufweisen. Dies wird auch aus **Abb. 45** deutlich, in der für die Gruppe 1000 die Messwerte der Biegefestigkeit und der Biege-Bruchdehnung als Funktion der Werkstoffdichte repräsentativ dargestellt sind. Demnach liegt die Untergrenze der Strukturverdichtung, die einer ausreichenden Halbzeugimprägnierung mit dem Matrixharz entspricht, bei ca. $0,55 \text{ g/cm}^3$.

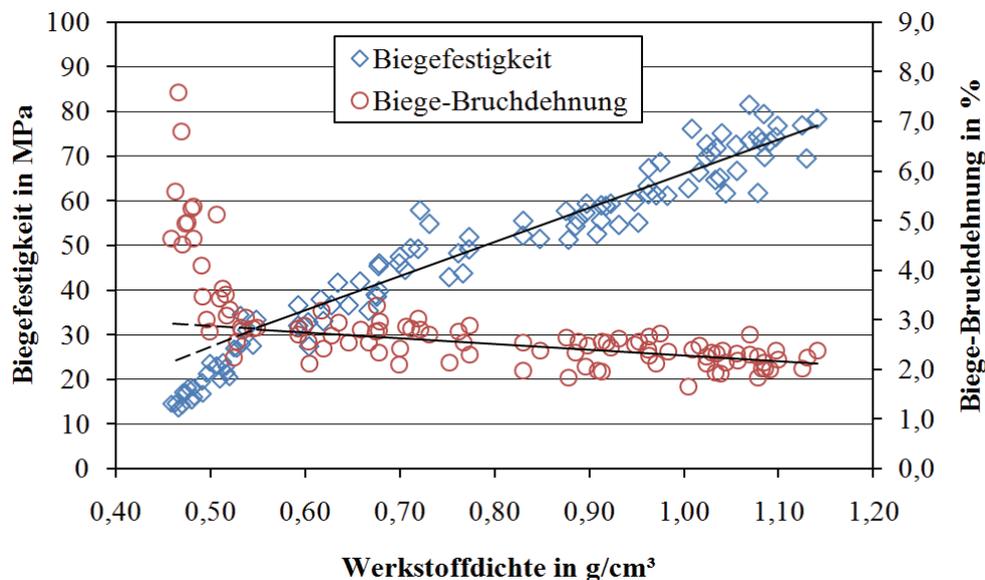


Abb. 45: Biegefestigkeit und Biege-Bruchdehnung der GPR-Verbundwerkstoffe der Gruppe 1000 in Abhängigkeit von der Werkstoffdichte (Matrixanteil ca. 35 Gew.-%)

Für die Steifigkeitsberechnung von GPR-Bauteilen ist neben dem E-Modul die Kenntnis der Querkontraktionszahl oder des Schubmoduls erforderlich. Die Ermittlung der Querkontraktionszahl wurde im einachsigen Zugversuch anhand einer synchronisierten berührungslosen Erfassung der Längs- und Querdehnung des Zugprobekörpers durchgeführt. Hierzu ist für die repräsentativen experimentellen Untersuchungen die Werkstoff-Gruppe 1000 ausgewählt worden. Die Messungen zeigen eine stagnierende Zunahme der Querkontraktionszahl mit steigender Werkstoffdichte (siehe **Abb. 46**). Unter der Berücksichtigung eines geringen Flächengewichteinflusses auf die Festigkeitseigenschaften der GPR-

Verbunde und einer erheblichen Kennwertstreuung ist davon auszugehen, dass die Querkontraktionszahl der restlichen Werkstoffvarianten eine gleiche Größenordnung und eine ähnliche tendenzielle Abhängigkeit von der Werkstoffdichte aufweist. Da die Querkontraktionszahl grundsätzlich einen geringen Einfluss auf die Plattensteifigkeit K besitzt ($K = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$), ist ebenfalls die Streuung dieser Messwerte für das Strukturverhalten der Verbundplatte von geringer Bedeutung.

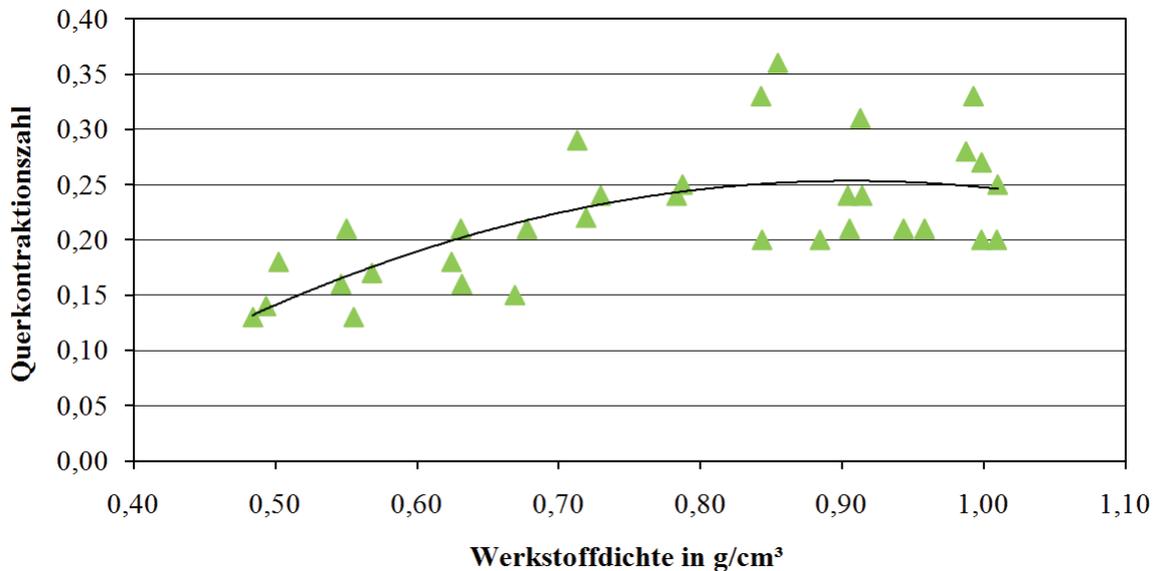


Abb. 46: Querkontraktionszahl als Funktion der Werkstoffdichte für die GPR-Verbunde der Gruppe 1000 (Matrixanteil ca. 35 Gew.-%)

Matrixanteil und statische Verbundeigenschaften

Die Festigkeitseigenschaften der GPR-Verbunde sind stark dichteabhängig, sodass zur Ermittlung des Einflusses vom Matrixanteil ein Kennwertvergleich bei einer einheitlichen Werkstoffdichte erforderlich ist. Dafür wurden Verbundwerkstoffe auf Basis der repräsentativ ausgewählten 1000 g/m² GPR-Halbzeuge mit jeweils 30, 35 und 40 Gew.-% PUR-Matrixharz, bezogen auf das Gesamtgewicht des Verbundwerkstoffs, und einer Werkstoffdichte von ca. 0,8 g/cm³ presstechnisch hergestellt und untersucht. Die in Längs- und Querrichtung angefertigten Verbundprobekörper wurden im Zug- und Biegeversuch getestet, wobei die zugehörigen gemittelten Ergebnisse in **Abb. 47** für die Zugeigenschaften und in **Abb. 48** für die Biegeeigenschaften dargestellt sind.

Sowohl bei der Zug- als auch bei der Biegebelastung ist im untersuchten Bereich ein sehr geringer Einfluss des Matrixanteils auf das jeweilige Eigenschaftsniveau festzustellen. Die Variante mit ca. 35 Gew.-% PUR-Matrix weist im Vergleich zu den anderen Materialien etwas höhere Zugkennwerte auf. Diese Tendenz liegt bei den Biegeeigenschaften nicht vor. Hier wurden bei der Variante mit ca. 40 Gew.-% PUR-Matrix die Maximalwerte gemessen, die allerdings im Vergleich zu den anderen Varianten nur geringfügig höher liegen. Aufgrund der relativ hohen Streuung der Messwerte konnte im Hinblick auf Biegeeigenschaften keine Vorzugsvariante ausgewählt werden.

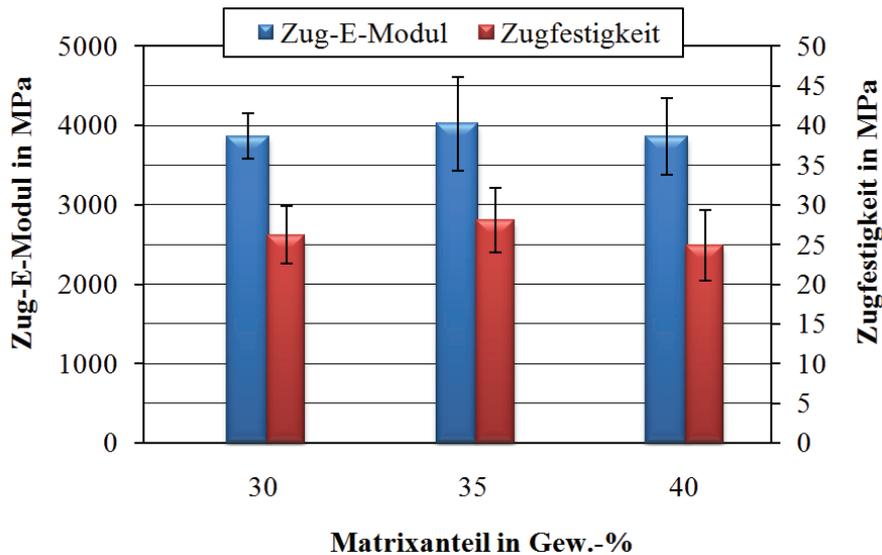


Abb. 47: Zug-E-Modul und Zugfestigkeit von GPR-Verbunden der Gruppe 1000 bei einer Werkstoffdichte von ca. $0,8 \text{ g/cm}^3$ in Abhängigkeit vom Matrixanteil

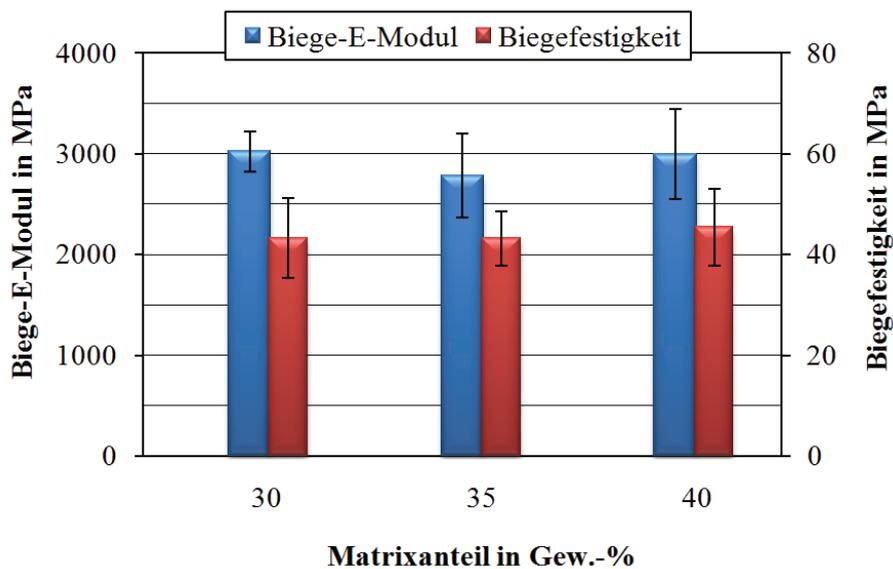


Abb. 48: Biege-E-Modul und Biegefestigkeit von GPR-Verbunden der Gruppe 1000 bei einer Werkstoffdichte von ca. $0,8 \text{ g/cm}^3$ in Abhängigkeit vom Matrixanteil

Schlageigenschaften von GPR-Verbunden

Das Verhalten von GPR-Verbunden bei schlagartiger Beanspruchung wurde anhand der Charpy-Schlagzähigkeit in Abhängigkeit von der Halbzeuganisotropie, dem Matrixanteil, dem Halbzeugflächengewicht und der Werkstoffdichte analysiert. Im Unterschied zu den statischen Verbundeigenschaften haben die Belastungsrichtung und der Matrixgehalt einen signifikanten Einfluss auf die Schlagzähigkeit der GPR-Verbunde. **Abb. 49** zeigt, dass die Schlageigenschaften der in Längs- und Querrichtung entnommenen Proben teilweise sehr unterschiedlich sind. Während die Mittelwerte bei einem niedrigen Matrixanteil von ca. 30 Gew.-% in Querrichtung um ca. 25% höher als in Längsrichtung sind, beträgt

diese Differenz beim 40%igen Matrixgehalt bereits ca. 60%. Tendenziell nimmt mit steigendem Matrixanteil die Schlagzähigkeit in Querrichtung stark zu, wobei die korrespondierenden Werte in Längsrichtung nur geringfügig ansteigen. Der Grund für eine derartige Richtungsabhängigkeit der Schlagzähigkeit liegt in der Vorzugsorientierung der Fasern im Halbzeug. Im Vergleich dazu kommt diese Richtungsabhängigkeit bei der statischen Belastung kaum zum Tragen (vgl. auch **Abb. 41**). Mit dem steigenden Matrixanteil verbessert sich die Fasereinbettung, was zu einer höheren Energieaufnahme – insbesondere bei den quer orientierten Schlagzähigkeitsproben – führt. Hieraus resultiert, dass die Schlagkennwerte in Längsrichtung (Halbzeug-Produktionsrichtung) als besonders kritisch zu bewerten sind. Weitere Untersuchungen der hochdynamischen Materialeigenschaften in Abhängigkeit vom Halbzeugflächengewicht und von der Werkstoffdichte wurden an den längs orientierten Schlagzähigkeitsproben durchgeführt.

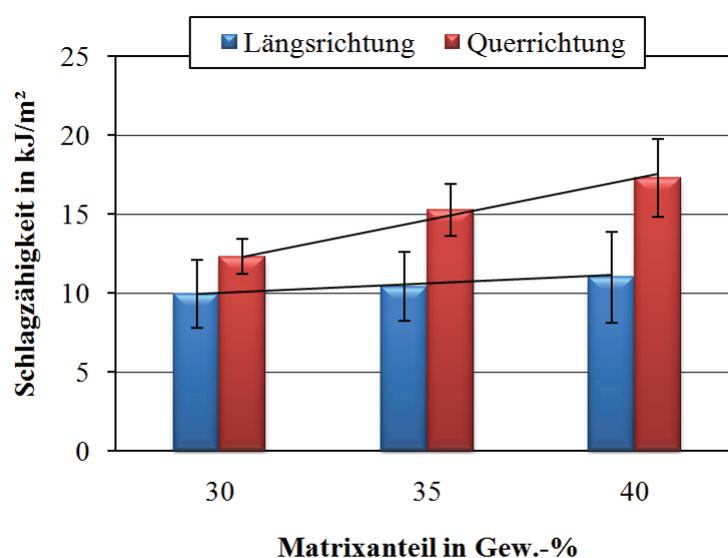


Abb. 49: Charpy-Schlagzähigkeit der GPR-Verbundproben Gruppe 1000 in Abhängigkeit vom Matrixanteil und von der Belastungsrichtung (einheitliche Werkstoffdichte: ca. $0,75 \text{ g/cm}^3$)

Den Einfluss der Werkstoffdichte und des Halbzeugflächengewichtes auf die Charpy-Schlagzähigkeit der GPR-Verbundmaterialien mit einem einheitlichen Matrixanteil von 35 Gew.-% ist in **Abb. 50** dargestellt. Charakteristisch ist hier die lineare Zunahme der Schlagzähigkeit ab einer definierten Werkstoffdichte, die vom jeweiligen Halbzeugflächengewicht abhängt. Diese signifikanten Werkstoffdichten korrelieren mit den bereits ermittelten Untergrenzen für die Halbzeugimprägnierung (siehe z. B. **Abb. 40**). Im unteren Dichtebereich sind die entsprechenden Standardabweichungen vergleichsweise gering, was auf die Überlagerung der Effekte infolge der ungenügenden Halbzeugimprägnierung und der niedrigen Absolutwerte zurückzuführen ist. Darüber hinaus ist festzustellen, dass über den gesamten untersuchten Dichtebereich die GPR-Werkstoffe der Gruppe 800 die höchsten Schlagzähigkeitswerte aufweisen. Entsprechend **Abb. 50** nimmt die Schlagzähigkeit mit dem wachsenden Halbzeugflächengewicht wesentlich ab. So erfordert beispielsweise das Erreichen des Kennwertniveaus der Gruppe 800 bei den GPR-Werkstoffen der Gruppe 1200 eine um ca. $0,2\text{--}0,3 \text{ g/cm}^3$ höhere Werkstoffdichte, was im Gesamtbauteil zu einem erheblichen Mehrgewicht führt.

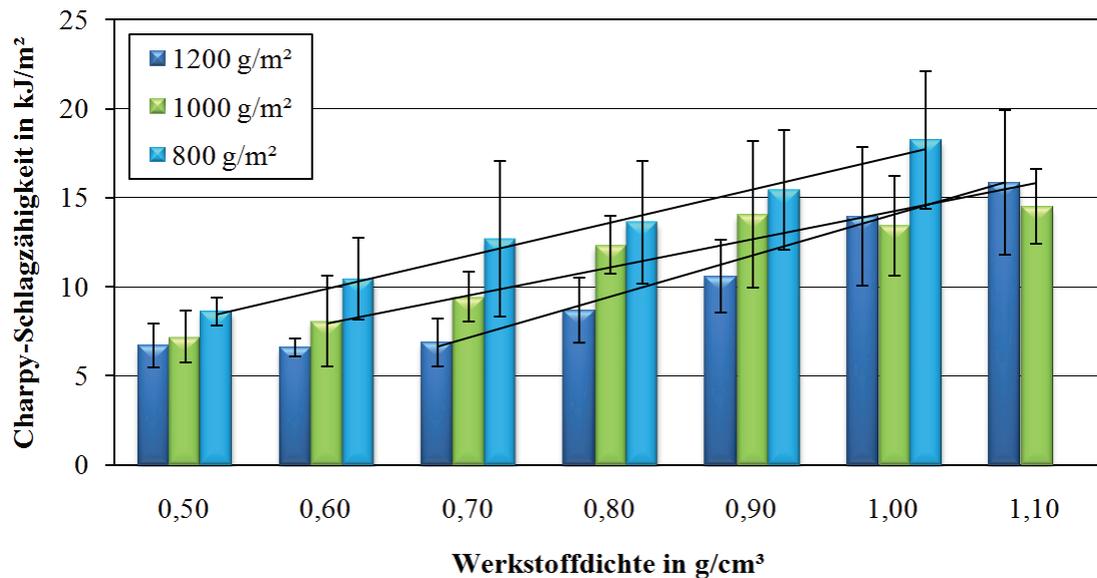


Abb. 50: Charpy-Schlagzähigkeit der GPR-Längsproben in Abhängigkeit vom Halbzeugflächengewicht und von der Werkstoffdichte (Matrixanteil 35 Gew.-%)

Für die Steigerung der Schlagzähigkeit von GPR-Verbunden in Längsrichtung haben die Einflussfaktoren Werkstoffdichte und Halbzeugflächengewicht gegenüber dem Einflussfaktor Matrixgehalt deutlichen Vorrang. Die für das Anwendungsbeispiel „Türverkleidung“ geforderte Schlagzähigkeits-Mindestgrenze von 12 kJ/m² (vgl. **Tabelle 3**) kann in GPR-Verbunden mit ca. 35 Gew.-% Matrix basierend auf den jeweiligen Schlagzähigkeits-Mittelwerten für die Gruppe 800 bei 0,7 g/cm³, für die Gruppe 1000 bei 0,8 g/cm³ und für die Gruppe 1200 bei 1,0 g/cm³ erreicht werden. Für die Schlagzähigkeit in Querrichtung ist demgegenüber auch der Matrixgehalt eine wesentliche Einflussgröße, mit der eine deutliche Verbesserung der hochdynamischen Eigenschaften von GPR-Verbunden erreicht werden kann.

Ein Vergleich praxisrelevanter Kennwerte eines konventionellen NFK-Serienbauteils (Türverkleidung) aus einem Flachs-/Sisalfaser-Halbzeug und des hier betrachteten GPR-Bauteils bei gleichem Halbzeugflächengewicht und PUR-Matrixanteil ist in **Tabelle 9** zusammenfassend aufgeführt. Daraus folgt, dass viele Kenndaten der beiden Werkstoffe annähernd vergleichbar sind, außer den Fogging-Eigenschaften und der Brennbarkeit, bei denen der neue GPR-Werkstoff deutlich besser abschneidet. Zudem zeichnen sich die GPR-Halbzeuge durch eine viel höhere Ressourcen- und Energieeffizienz in der Herstellung aus.

Tabelle 9: Gegenüberstellung praxisrelevanter Kenndaten (Quelle: Fa. Polytec Automotive)

Messgrößen	Einheit	Vorgabewerte	Konventionelles NFK-Serienbauteil	Untersuchtes GPR-Bauteil
Dicke	mm	2,2±0,2	1,90	2,0
Dichte	kg/m ³	750+100/- 50	840	812
Flächengewicht	g/m ²	1750+100/-200	1847	1763
Feuchtigkeitsgehalt	%	4,5±1,5	4,63	5,17
Biegefestigkeit	MPa	65±15	85	62
Biege-E-Modul	MPa	≥3000	3489	3289
Höchstbiegekraft	N	≥180	282	194
Dickenquellung	%	≤20	10,57	10,53
Wasseraufnahme	Gew.-%	≤60	28,53	29,87
Schlagzähigkeit	kJ/m ²	≥12	16,11	14,71
Foggingwert	mg	≤1	0,90	0,46
Brennbarkeit	mm/min	≤100	30	25
VOC-Wert	ppm	≤100	16,0	29,0
FOG-Wert	ppm	≤250	243	178

5.3.4 Mikromechanische Betrachtungen zur Verbundsteifigkeit

Aus den durchgeführten Untersuchungen zu mechanischen Werkstoffkennwerten und aus den entsprechenden mikroskopischen Strukturaufnahmen von GPR-Verbunden folgt, dass weitgehend eine regellose Faseranordnung und dadurch quasiisotrope Eigenschaften in der Bauteilebene vorliegen. Die Bestandteile von GPR-Werkstoffen sind Flachsfasern, Flachsschäben, Matrixharz und Luftporen. Aufgrund der geringen Festigkeit und der extrem niedrigen Materialdichte der Flachsschäben (siehe dazu Kap. 5.3.3) sind diese für ein mikromechanisches Näherungsmodell den Luftporen zuzuschlagen. Für mikromechanische Betrachtungen werden daher diese Materialien insgesamt als eine poröse, wirrfaserverstärkte und quasiisotrope Einzelschicht aufgefasst. Die Werkstoffkonstanten dieser „Wirrfaserschicht“ bestehend aus Luftporen/Schäben (Kurzbezeichnung: LS), Matrix und Flachsfasern sind von den Eigenschaften der Faser und der Matrix sowie von deren Volumenanteilen abhängig, wobei der Luftporengehalt wesentlich die Faser- und Matrix-Volumenanteile beeinflusst. Schematisch ist diese mikrostrukturelle Zusammensetzung in **Abb. 51** dargestellt und dient dem Aufbau eines mikromechanischen Näherungsmodells. Auch die abstrahierte Deformation des GPR-Verbundes innerhalb des Pressprozesses kann mit Hilfe des mikromechanischen Modells erläutert werden.

Vor dem Pressen weist der Verbund den **Zustand 1** auf, bei dem die Halbzeugober- und -unterfläche mit dem Matrixmaterial benetzt ist und die LS-Bereiche sowie Fasern im Halbzeug statistisch gleichmäßig verteilt sind. Infolge des Verpressens (Komprimierung) wird die Verbundstruktur in den **Zustand 2** überführt, wobei sich die Matrix zwischen den Fasern verteilt und teilweise in die LS-Bereiche eindringt: das Halbzeug wird imprägniert. Dadurch wird der Luftporenanteil sukzessive reduziert, bis beim höheren

Pressdruck der Verbund in einen kompakten **Zustand 3** übergeht. Für diesen Zustand wird angenommen, dass die LS-Bereiche mit dem Matrixharz vollständig gefüllt sind und die Schäben im Rahmen der Modellbetrachtung vernachlässigt werden dürfen. Der Verbundwerkstoff erreicht im **Zustand 3** die höchsten Steifigkeiten und Festigkeiten. An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich aufgrund der Modellannahme gemäß dem reellen Verbundverhalten das Flächengewicht vom **Zustand 1** zum **Zustand 3** nicht verändert. Die Faser- und Matrix-Masseanteile bezogen auf den Gesamtverbund bleiben damit gleich, allerdings findet durch die Dickenabnahme die Reduzierung des Verbundvolumens statt.

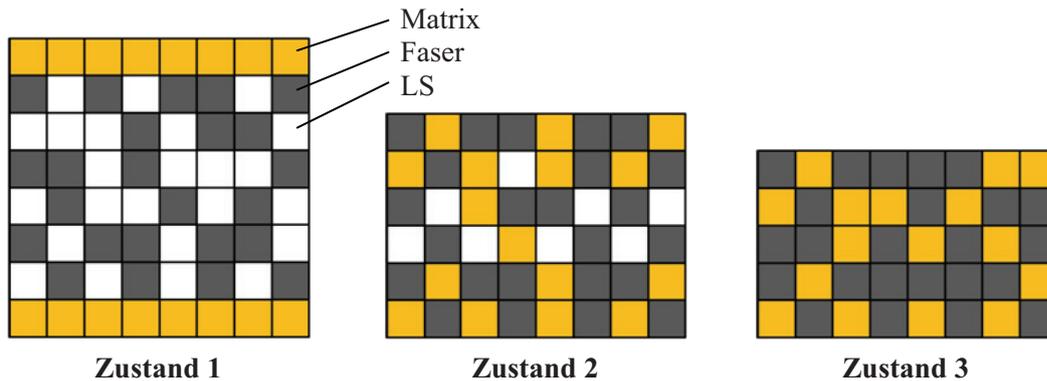


Abb. 51: Mikromechanisches Näherungsmodell zur Beschreibung der Deformation von GPR-Verbunden im Pressprozess (LS: Luftpore/Schäbe)

Das mikromechanische Näherungsmodell wird für die GPR-Presswerkstoffe zunächst für den Fall einer unidirektional (UD) verstärkten, porösen Einzelschicht und anschließend für den Fall eines wirrfaser-verstärkten, porösen Laminates entwickelt. Mit Hilfe des neuen Näherungsmodells soll im Weiteren das in den Versuchen beobachtete Werkstoffverhalten erklärt und die Abhängigkeit der Verbundsteifigkeit von der Werkstoffdichte analytisch ermittelt werden.

Mikromechanisches Näherungsmodell einer idealisierten porösen UD-Einzelschicht

Bei der Ableitung der Näherungsformel für den E-Modul in Faserrichtung werden folgende Annahmen vorausgesetzt:

- sowohl die Fasern als auch die Matrix sind inkompressibel und linear-elastisch
- die Faserlänge übt keinen Einfluss auf die Verbundeigenschaften aus
- die Verbundstruktur weist keine Trockenstellen auf

In einer porösen UD-Einzelschicht gilt aufgrund einer vollkommenen Haftung zwischen Fasern (f) und Matrix (m) die übliche Kompatibilitätsbedingung hinsichtlich der Dehnung:

$$\varepsilon = \varepsilon_f = \varepsilon_m. \quad (1)$$

Darüber hinaus wird für die Dehnung der LS-Bereiche (l) angenommen:

$$\varepsilon_l = \varepsilon_f = \varepsilon_m. \quad (2)$$

Die Kräfte der einzelnen Verbundkomponenten sind von der resultierenden Kraft F und von den (unterschiedlichen) Elastizitätswerten der Komponenten abhängig, wobei die Luftporen keine Kräfte

übertragen ($F_l \stackrel{\text{def}}{=} 0$). Aus dem Kräftegleichgewicht am repräsentativen Volumenelement (RVE) folgt dann

$$F = F_f + F_m \quad (3)$$

und unter der Berücksichtigung des Stoffgesetzes

$$F_i = \varepsilon_i E_i A_i \quad (4)$$

mit A_i als Fläche des Gesamtquerschnittes der jeweiligen Strukturkomponente ($i=f, m$) ergibt sich

$$\varepsilon E_{11} A = \varepsilon_f E_f A_f + \varepsilon_m E_m A_m. \quad (5)$$

Für den E-Modul des Verbundes in Faserrichtung E_{11} gilt demnach mit (2):

$$E_{11} = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A}. \quad (6)$$

Unter der Annahme einer homogenen Komponentenverteilung im Verbund besteht folgender Zusammenhang:

$$\frac{A_i}{A} = \frac{V_i}{V}, \quad (7)$$

wobei sich das Gesamtvolumen des Verbundes V aus Volumenanteilen der Fasern, der Matrix und der LS-Bereiche zusammensetzt und als Quotient von der Gesamtmasse m und der Werkstoffdichte ρ angeben lässt. Mit diesen Annahmen folgt aus (6) der Zusammenhang:

$$E_{11} = \left(E_f \frac{V_f}{m} + E_m \frac{V_m}{m} \right) \rho. \quad (8)$$

Entsprechend dieser Gleichung ist der E-Modul in Faserrichtung direkt proportional zur Werkstoffdichte des Verbundes.

Mikromechanisches Näherungsmodell für eine poröse wirrfaserverstärkte GPR-Einzelschicht

Zur Beschreibung der Werkstoffkennwerte einer porösen wirrfaserverstärkten GPR-Einzelschicht wird der Ansatz von Halpin-Pagano (siehe [HP69]) zugrundegelegt und unter der Berücksichtigung der dichteabhängigen Eigenschaften eines GPR-Verbundes erweitert. Gemäß diesem Ansatz kann der Wirrfaserverbund als ein symmetrisches Laminat, bestehend aus mehreren UD-Einzelschichten mit ($0^\circ, 90^\circ, \pm 45^\circ$) Orientierung, aufgefasst werden. Ein derartiges Laminat weist in der Ebene quasiisotrope Elastizitätseigenschaften auf. Darüber hinaus ist hier erstmalig die Matrixkomponente als Harz-Luft-Gemisch mit dichteabhängigen Eigenschaften angenommen worden, um das reelle Vernetzungsverhalten des PUR-Harzes zu simulieren und die Abschwächung der Verbund-eigenschaften auf das Niveau unter dem des Harzes erfassen zu können.

Der E-Modul der Matrix wird durch die infolge der Polyadditionsreaktion des PUR-Harzes entstehenden CO_2 -Poren beeinflusst und ist darüber hinaus von der Materialdichte der Matrix-komponente selbst abhängig. Nach der klassischen Laminattheorie gilt für diesen Verbund aus Harz (h) und Poren (p) folgende Mischungsregel:

$$E_m = E_h \varphi_h + E_p (1 - \varphi_h). \quad (9)$$

Bei der faktischen Annahme $E_p \stackrel{\text{def}}{=} 0$ und $\varphi_h = \frac{V_h}{V_h + V_p}$ ergibt sich aus (9) folgende Beziehung für den E-Modul der Matrixkomponente:

$$E_m = E_h \frac{V_h}{V_h + V_p}, \quad (10)$$

mit dem Volumen von Harz V_h und Poren V_p .

Ferner gilt mit $(V_h + V_p) = \frac{m_h}{\rho_m}$ sowie unter Voraussetzung eines konstanten Volumens von Harz und dessen Masseanteils ($V_h, m_h = \text{const}$) ein linearer Zusammenhang $E_m = f(\rho_m)$, wobei die Dichte der Matrixkomponente ρ_m mit der Werkstoffdichte des Gesamtverbundes ρ korrespondiert:

$$E_m = E_h \frac{V_h}{m_h} \rho_m. \quad (11)$$

Anhand der Analyse der Schlifffbilder der GPR-Verbunde und der Eigenschaften der Matrixkomponente konnten für den E-Modul und die Querkontraktionszahl der Matrixkomponente sowie für den Faservolumengehalt φ im GPR-Verbund folgende empirische Gleichungen abgeleitet werden:

$$E_m = 3666\rho - 1033, \quad (12)$$

$$\nu_m = 0,5\rho - 0,2, \quad (13)$$

$$\varphi = 0,733\rho - 0,267. \quad (14)$$

Die Kennwerte für die idealisierte unidirektional faserverstärkte Einzelschicht lassen sich aus den bekannten mikromechanischen Mischungsregeln (siehe z. B. [Sch05a]) bestimmen. Dabei gilt für den E-Modul einer UD-Schicht in Faserrichtung

$$E_{\parallel} = E_{f\parallel}\varphi + E_m(1 - \varphi) \quad (15)$$

und in Querrichtung

$$E_{\perp} = \frac{E_m}{1 - \nu_m^2} \cdot \frac{1}{(1 - \varphi) + \frac{E_m}{(1 - \nu_m^2)E_{f\perp}}\varphi}, \quad (16)$$

mit $E_{f\perp}$ als Faser-E-Modul quer zur Faser und ν_m als Querkontraktionszahl der Matrixkomponente.

Ebenfalls folgt für den Quer-Längs-Schubmodul $G_{\perp\parallel}$ der UD-Schicht mit dem Schubmodul der Matrixkomponente G_m und dem Quer-Längs-Schubmodul der Faser $G_{f\perp\parallel}$

$$G_{\perp\parallel} = G_m \frac{1}{(1 - \varphi) + \frac{G_m}{G_{f\perp\parallel}}\varphi} \quad (17)$$

und für die Querkontraktionszahl bei Belastung in Faserrichtung (Indizierung gemäß VDI-Richtlinie 2014)

$$\nu_{\perp\parallel} = \varphi\nu_{f\perp\parallel} + (1 - \varphi)\nu_m. \quad (18)$$

Bei der üblichen Voraussetzung der Existenz einer Verzerrungsenergiedichte, die eine eindeutige Funktion der Verzerrungen ist (siehe dazu [Kro92, Hah85]), folgt:

$$\frac{\nu_{\perp\perp}}{E_{\perp}} = \frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\parallel}}. \quad (19)$$

Entsprechend dem Ansatz von Halpin-Pagano gilt für die elastischen Kennwerte eines wirrfaser-
verstärkten Verbundes:

$$\bar{E} = \frac{4U_5(U_1 - U_5)}{U_1}, \quad (20)$$

$$\bar{\nu} = \frac{U_1 - 2U_5}{U_1}, \quad (21)$$

$$\bar{G} = U_5. \quad (22)$$

Die Invarianten U_1 und U_5 folgen aus:

$$U_1 = \frac{3Q_{11} + 3Q_{22} + 2Q_{12} + 4Q_{66}}{8}, \quad (23)$$

$$U_5 = \frac{Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} + 4Q_{66}}{8} \quad (24)$$

und die reduzierten Steifigkeiten ergeben sich gemäß

$$Q_{11} = \frac{E_{\parallel}}{1 - \nu_{\perp\parallel}\nu_{\parallel\perp}}, \quad (25)$$

$$Q_{22} = \frac{E_{\perp}}{1 - \nu_{\perp\parallel}\nu_{\parallel\perp}}, \quad (26)$$

$$Q_{12} = \nu_{\perp\parallel}Q_{22} = \nu_{\parallel\perp}Q_{11}, \quad (27)$$

$$Q_{66} = G_{\perp\parallel}, \quad (28)$$

wobei die modifizierten dichteabhängigen Kenngrößen aus Gl. (15) bis (18) resultieren.

Die Ergebnisse der experimentellen Verifizierung der Gleichungen (20) und (21) sind entsprechend in **Abb. 52** und in **Abb. 53** dargestellt. Der berechnete E-Modul des GPR-Verbundes weist eine nahezu lineare Abhängigkeit von der Werkstoffdichte auf, was mit den experimentell ermittelten Kennwerten sehr gut übereinstimmt. Der Verlauf der berechneten Querkontraktionszahl lässt ebenfalls eine hohe Übereinstimmung mit den entsprechenden Messwerten feststellen. Die zugehörigen angenommenen oder berechneten Kenngrößen des GPR-Verbundes und dessen Komponenten sind im Anhang 10.3 zusammengefasst.

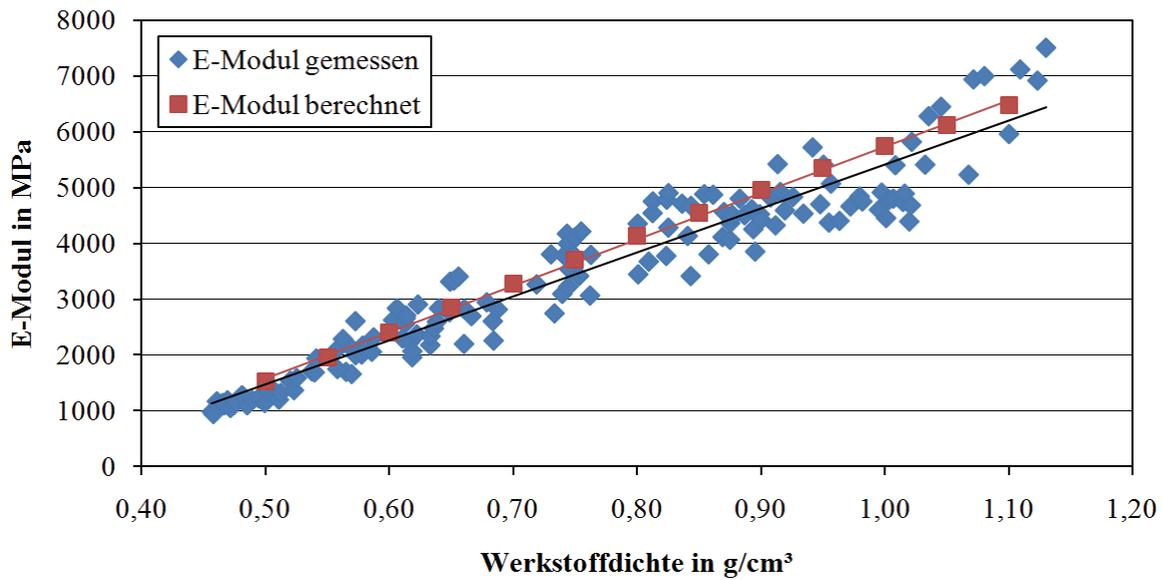


Abb. 52: Berechneter und gemessener E-Modul des GPR-Verbundes in Abhängigkeit von der Werkstoffdichte

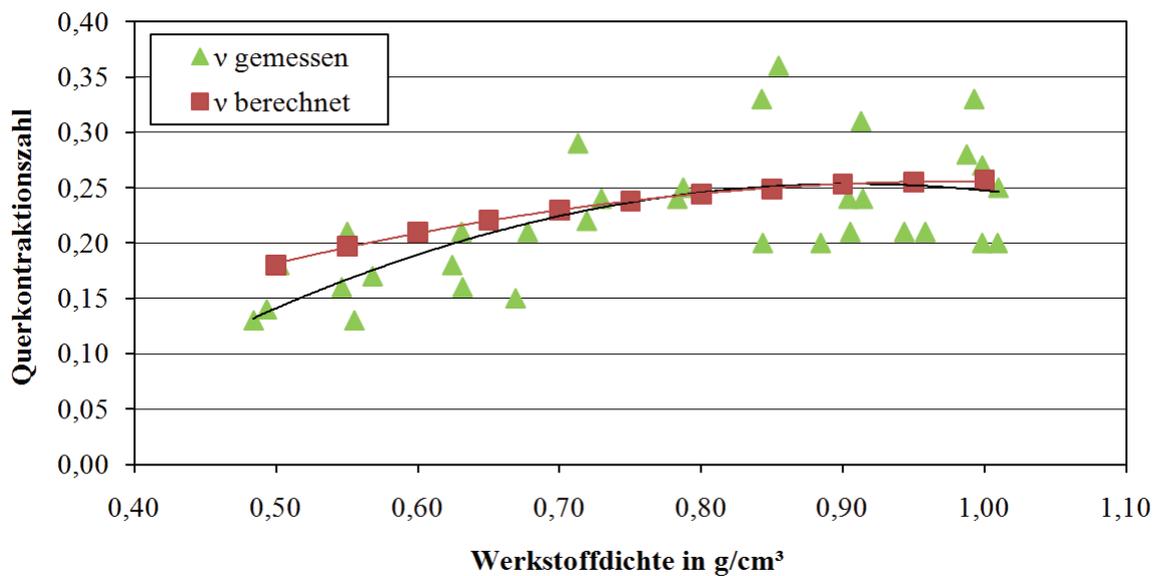


Abb. 53: Berechnete und gemessene Querkontraktionszahl des GPR-Verbundes in Abhängigkeit von der Werkstoffdichte

6 Leichtbau-Konstruktionskonzept für GPR-Pressbauteile

6.1 CAD-Flächenmodell und Ableitung des FE-Modells

Die NFK-Pressbauteile für den automobilen Innenraum werden in der Regel im Anschluss an die Designentwicklung konstruiert. Für die Formteilkonstruktion kommen verschiedene CAE-Programme zum Einsatz, wobei als Ausgangsgeometrie die sog. C-Fläche – ein vom Designer festgelegtes, dünnes CAD-Flächenmodell – dient (siehe **Abb. 54**). Basierend auf diesem CAD-Flächenmodell werden die Sichtseite „A-Fläche“ und die Rückseite „B-Fläche“ des zukünftigen Pressbauteils ebenfalls als Flächenmodelle aufgebaut. Ein derartiger Konstruktionsprozess fokussiert oft die Ableitung einer Offset-Oberfläche zur vorgegebenen C-Fläche und führt im Ergebnis zur Entstehung eines Bauteilträgers mit einer weitgehend konstanten Bauteildicke. In **Abb. 54** ist exemplarisch ein Ausschnitt des CAD-Modells einer modernen Serien-Türverkleidung zur Erläuterung der Drei-Schicht-Konstruktion dargestellt.

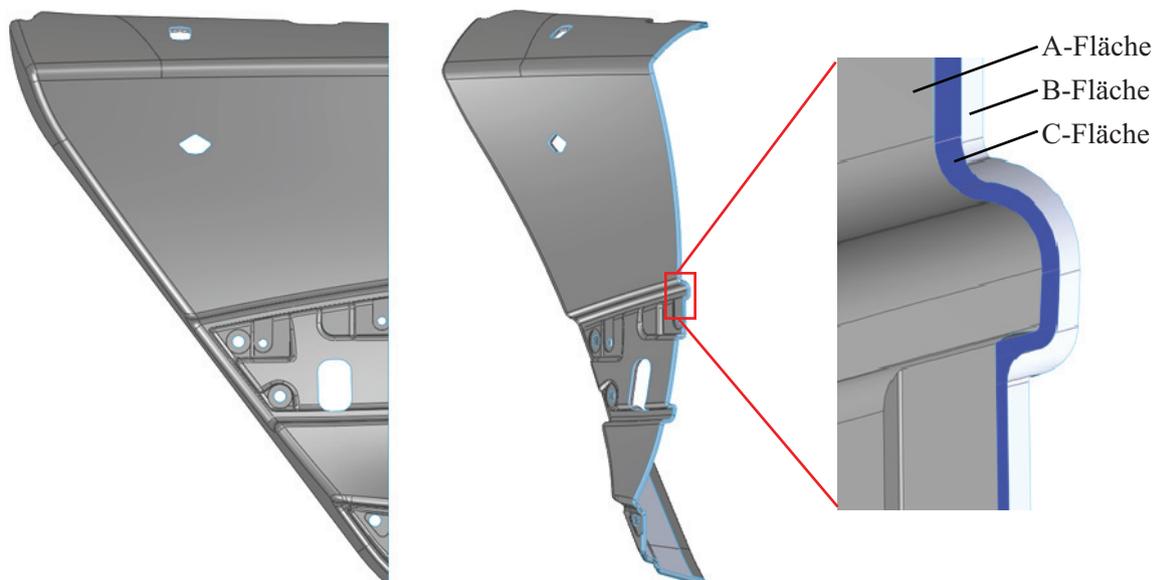


Abb. 54: Ausschnitt des CAD-Modells einer Serien-Türverkleidung zur Erläuterung der Drei-Schicht-Konstruktion

Bei der Bauteilauslegung gemäß der Drei-Schicht-Konstruktion wird von homogenen Kennwerten des eingesetzten Presswerkstoffs ausgegangen, wodurch der Rechenaufwand reduziert und die Formteilentwicklung vereinfacht wird. Diese Herangehensweise widerspricht allerdings dem eigentlichen Leichtbauprinzip im Sinne einer belastungsgerechten Bauteilgestaltung, bei welcher der Querschnittsanpassung in Abhängigkeit von den lokalen Spannungszuständen eine entscheidende Bedeutung zukommt. Um das Leichtbaupotenzial bei der belastungsgerechten Konstruktion von NFK-Pressbauteilen unter der Berücksichtigung der ermittelten Zusammenhänge zwischen der Werkstoffdicke, der Bauteildicke und den Materialkennwerten auszunutzen, soll in dieser Arbeit am Beispiel einer GPR-Türverkleidung die Optimierung der Wanddickenverteilung durchgeführt und mit den Simulationsergebnissen konventioneller Bauteilauslegung verglichen werden.

Als praxisrelevantes Bauteil wurde ein vereinfachtes CAD-Modell einer Türverkleidung konstruktiv umgesetzt (siehe **Abb. 55**). Dazu ist das Mittelsegment der Türverkleidung auf eine 2D-gekrümmte und in die dritte Dimension konstant ausgeformte Struktur reduziert worden. Diese Vereinfachung erlaubt in den späteren Optimierungsschritten die Zuweisung der Dicke und darüber hinaus des E-Moduls, der Festigkeit und der Querkontraktionszahl für die einzelnen Bereiche des Finite-Elemente(FE)-Modells.

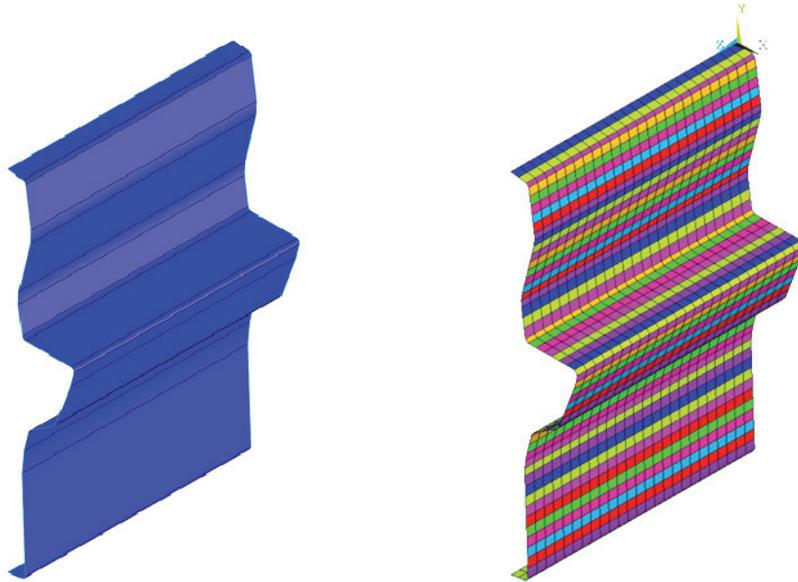


Abb. 55: Vereinfachtes Flächenmodell der Türverkleidung (links) und Elementdarstellung mit Farbzuzuweisung (rechts)

Die Erstellung und Berechnung des FE-Modells erfolgte im CAE-Programm ANSYS unter Einsatz von Schalenelementen mit jeweils vier Knoten, die in streifenförmige Bereiche mit gleichbleibenden physikalischen Eigenschaften zusammengefasst sind (vgl. **Abb. 55**). Dies erlaubt die Zuweisung der Materialien durch eine Eingabe mittels „DO“-Schleifen für eine ganze Zeile, wobei ANSYS im Allgemeinen bis zu 60 Parameter als Designvariablen zur Optimierung von Strukturen verwenden kann. Unter Beachtung der ANSYS-Vorgaben wird das Modell in 59 unterschiedliche Elementreihen eingeteilt, denen anschließend die Dicke und die entsprechenden mechanischen Eigenschaften zugewiesen werden. Das FE-Modell entspricht einem Ausschnitt der Türverkleidung mit den Abmessungen (B x H x T) 110 mm x 580 mm x 375 mm. Aufgrund der verhältnismäßig einfachen Geometrie ohne 3D-Krümmungen lassen sich die Materialbereiche (Elementreihen) mit homogenen Eigenschaften bereits im Vorfeld manuell definieren. Für die Erstellung eines präzisen FE-Modells von komplexen Strukturen ist die Materialzuweisung für jedes einzelne Element erforderlich.

Durch die begrenzte Anzahl von Design-Variablen lässt sich das Bauteil nur grob in Teilbereiche mit unterschiedlichen Kennwerten (E-Modul, Festigkeit und Querkontraktionszahl) unterteilen. Dies hat eine ebenfalls grobe Modellierung der Dickenverteilung und einen ausgeprägt abgestuften Konturverlauf zur Folge. Eine Abhilfe bieten geeignete CAE-Programme wie z. B. OptiStruct und HyperStudy von Altair oder optiSLang von Dynardo, die eine deutlich größere Variablenanzahl zulassen.

Bei dem entwickelten Modell bleibt ferner die umformspezifische Halbzeugdeformation infolge der Reibung im Werkzeug und der dreidimensionalen Bauteilausformung unberücksichtigt. Dadurch ist die

Übertragung der Berechnungsergebnisse auf ein reelles Bauteil nur unter Maßgabe einer geringen Halbzeugverformung zweckmäßig. Für die Bauteilauslegung in Leichtbauweise soll der Wanddickenoptimierung eine entsprechende Umformsimulation vorgeschaltet werden, die lokale Umformgrade im Halbzeug und darüber hinaus die Änderung dessen Flächengewichts rechnerisch erfasst. Dennoch erlaubt das entwickelte FE-Modell einen korrekten Variantenvergleich der konventionellen und der neuen Bauteilauslegung und ist somit repräsentativ. Das Ziel der Bauteilsimulation und -optimierung ist, ausgehend von einer vorgegebenen Formteilgeometrie und von einem praxisrelevanten Belastungsfall, die Minimierung der Strukturverformung beim konstanten Bauteilgewicht oder die Reduzierung des Bauteilgewichtes bei einer festgelegten Strukturverformung durch die lokale Querschnittsanpassung in Abhängigkeit vom jeweiligen lokalen Spannungszustand.

6.2 Definition von Parametern und Randbedingungen

Zur Optimierung der Dickenverteilung am FE-Modell einer Türverkleidung wurden insgesamt 59 Designvariablen eingeführt und als Grenzwerte die dickenbezogenen Zugfestigkeiten herangezogen, die für jede Materialsektion auf der ermittelten linearen Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von der Werkstoffdichte und darüber hinaus von der Bauteildicke basieren. Als Optimierungsziel erfolgt die Ermittlung der Wanddickenverteilung bei minimaler Knotenverschiebung in Bezug auf die Referenzlage. Die Übersicht zu den Optimierungsparametern ist in **Tabelle 10** angegeben.

Tabelle 10: Übersicht zu den Optimierungsparametern

	Charakteristische Kenngröße	Bemerkung
Designvariablen	Wanddicke	E-Modul und Querkontraktionszahl als Funktion der Wanddicke
Zustandsvariablen	Vergleichsspannung nach der Gestaltänderungsenergiehypothese	Restriktionen durch Zugfestigkeit als Funktion der Wanddicke
Ziel der Optimierung	Minimierung der Knotenverschiebung	In Bezug auf Referenzlage

Die Designvariablen, gemäß ANSYS-Nomenklatur DESIGN VARIABLE (DV),

- sind die Parameter, die durch die Optimierung verändert werden dürfen,
- benötigen einen Startwert, um die erste Optimierungsschleife zu durchlaufen, und
- entsprechen den Identifikationsnummern von generierten Materialsektionen, wodurch die vollständigen Materialsektionen zur Optimierung herangezogen werden.

Die Zustandsvariablen, nach ANSYS-Nomenklatur STATE VARIABLE (SV),

- dienen der Erfassung des Zustandes des FE-Modells und
- entsprechen hier den berechneten Spannungen in jeder Elementreihe, die hinsichtlich der zulässigen Spannungen (Zugfestigkeiten) der jeweiligen Materialsektion bewertet werden.

Die Zielfunktion der Optimierung der Extremaufgabe, OBJECTIVE FUNCTION (OBJ) ist die Minimierung der maximalen Knotenverschiebung unter der vorgegebenen Belastung.

Die ausgewählten Materialdaten, die dem GPR-Verbundwerkstoff der Gruppe 1000 mit dem Matrixanteil von ca. 35 Gew.-% entsprechen, sind in **Tabelle 11** als Inputwerte angegeben; die detaillierte Materialdatenmatrix ist im Anhang 10.4 zu entnehmen. Jede Wanddicke erhält beim Einlesen der Datei eine fortlaufende Identifikationsnummer, die eine entsprechende Designvariable bei der Parameteroptimierung repräsentiert. Demnach wird beim Ändern der Identifikationsnummer die verwendete Materialsektion entsprechend geändert.

Tabelle 11: Repräsentative Materialdaten der eingeführten 100 Materialsektionen

Identifikationsnummer	E-Modul in MPa	Querkontraktionszahl	Wanddicke in mm	Zugfestigkeit in MPa
1	4900	0,267	1,500	29,01
2	4868	0,266	1,515	28,82
3	4836	0,264	1,530	28,64
4	4804	0,262	1,545	28,45
5	4772	0,261	1,560	28,27
6	4740	0,259	1,575	28,08
7	4708	0,257	1,590	27,90
...
100	1732	0,178	2,985	10,69

Für die Simulation wird das FE-Modell der Türverkleidung an den beiden Rändern bei $H_1 = 0$ mm und $H_2 = 580$ mm in die x-, y- und z-Richtung eingespannt (siehe **Abb. 56**). Dadurch ist in der Einspannung nur die Rotation der zugehörigen Modellknoten um die z-Achse erlaubt. Die Kräfte wurden mit einem Sicherheitsbeiwert von $S = 1,2$ angenommen und entsprechend dem Modell (**Abb. 56**) in die x- und y-Richtung aufgebracht sowie über die gesamte Tiefe des Bauteils gleichmäßig verteilt, wodurch die Belastung infolge des Abstützens des menschlichen Unterarmes simuliert werden konnte. Die Gesamtlast in x-Richtung beträgt 85 N und in y-Richtung 235 N und entspricht somit weitgehend den Vorgaben aus der Praxis.

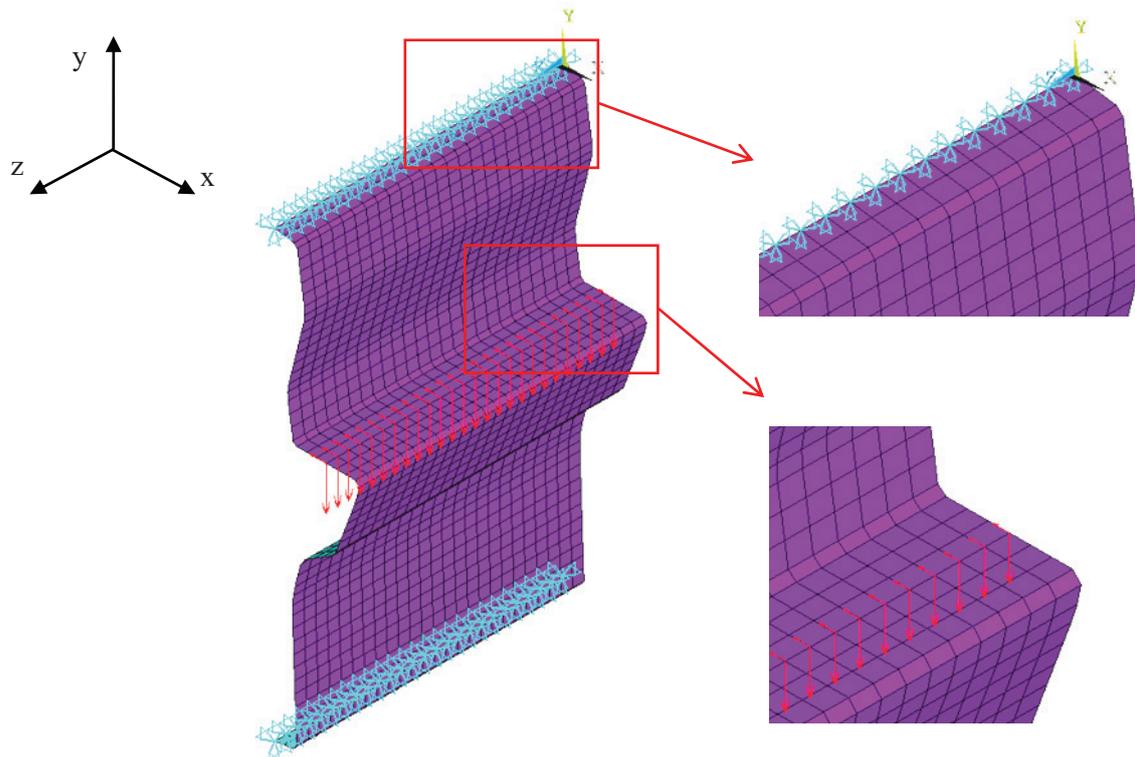


Abb. 56: Kinematische und dynamische Randbedingungen des FE-Modells: Gesamtlast in x-Richtung 85 N und in y-Richtung 235 N

6.3 Bauteiloptimierung hinsichtlich der Struktursteifigkeit

Für die Optimierung der Wanddickenverteilung wurde im FE-Modell der Algorithmus „First Order Optimization Method“ eingesetzt, der in die Kategorie der Hillclimbing- oder Downhill-Suchverfahren gehört. Ausgehend von den festgelegten Startwerten werden die Designvariablen in der Umgebung der ausgewählten Startwerte solange variiert, bis keine Verbesserung der Optimierungsgröße mehr erfolgt oder bis die festgelegte Maximalanzahl der Iterationen – hier 100 – erreicht ist. Als Ergebnis der Simulation werden in einer Textdatei bis zu 100 Wanddickenverteilungen unter Angabe der jeweiligen maximalen Knotenverschiebung des FE-Modells und der berechneten Spannungen für jede Elementreihe ausgegeben, wobei die beste Variante entsprechend hervorgehoben ist.

Der Programmcode des entwickelten FE-Modells beinhaltet folgende Hauptschritte (siehe auch Quelltext im Anhang 10.5):

1. Deklaration der Designvariablen und Startwertzuweisung
2. Optimierungsschleife
 - Beginn der Optimierungsschleife
 - Festlegen des Elementtyps (4-Knoten-Schalenelement) inklusive Keyoption
 - Einlesen der vorgefertigten Materialdatenmatrix (vgl. Kap 6.2)
 - Definition von n (Anzahl der verwendeten Materialsektionen)

- Geometrieaufbau
- Anlegen von n-Materialsektionen gemäß der Materialdatenmatrix
- Vernetzung des Modells
- Zuweisung von Schichtdicken und Materialkennwerten für jede Elementreihe
- Festlegen der Lagerungen: Festlagerung
- Lastaufbringung auf ausgewählte Knoten
- Übertragung der Randbedingungen von Geometrie auf Knoten
- Lösen des zuvor angelegten FE-Modells
- Postprocessing
- Sortieren der einzelnen Knotenverschiebungen nach Größe
- Herauslesen der betragsmäßig größten Verschiebung
- Herauslesen der maximalen Mises-Vergleichsspannung für jede Elementreihe
- Ende der Optimierungsschleife

3. Start der Optimierung

- Festlegung des zulässigen Wertebereichs für die Designvariablen und der zugehörigen Schrittweite
- Zuweisung neuer Grenzwerte für die Zustandsvariablen
- Speicherung des besten Designs
- Definition der Optimierungsfunktion: Minimierung der größten Knotenverschiebung
- Festlegen des Optimierungsalgorithmus: First Order Optimization Method
- Anweisung zur Ausführung der Optimierung

4. Auflistung aller Optimierungsergebnisse

Bedingt durch den ausgewählten Optimierungsalgorithmus sind sowohl die Anzahl der Iterationen als auch die vorgeschlagene Bestlösung von der Startwertzuweisung und von der festgelegten Abstandsfunktion abhängig. Eine ungünstige Kombination der Startwerte kann zum vorzeitigen Beenden der Optimierung führen, die nur wenige iterative Schritte aufweist und zum Festsetzen in einem lokalen Optimum neigt. Aus diesem Grund erfordert eine statistisch abgesicherte Lösungsfindung eine im Allgemeinen kaum spezifizierbare Mehrzahl der Optimierungsversuche bei unterschiedlicher Definition der Ausgangssituation in der Wertelandschaft. Die Fragestellungen der Startpunktfestlegung in der Wertelandschaft und der Auswahl von Schrittweite der Abstandsfunktion zählen zu den grundlegenden Problemen der globalen nichtlinearen Optimierung, deren ausführliche Untersuchung in der Spezialliteratur beschrieben wird (siehe etwa [Har08, Sch05b]). Das hier entwickelte Verfahren zur numerischen Bauteiloptimierung zeigt deutliche Vorteile gegenüber den konventionellen Auslegungsmethoden auf, die bei der Formteilgestaltung die übliche konstante Wanddicke vorsehen.

6.4 Ergebnisse der Steifigkeitsoptimierung

Die durchgeführte Bauteilsimulation beim konventionellen Design mit konstanter Wanddicke ergab eine Knotenverschiebung in x-Richtung, die sich im kritischen Verformungsbereich befindet. Demgegenüber

ist die maximale Bauteilverformung in y-Richtung bei den vorgegebenen Lasten gering. In **Abb. 57** sind berechnete Gesamtknotenverschiebungen für drei Bauteile mit unterschiedlichen Wanddicken als Vektorplot dargestellt. Darin sind die Beträge der Verschiebungsvektoren gemäß einem einheitlichen Maßstab 1:12,5 angegeben. Bei allen drei Varianten ist festzustellen, dass die Bauteilverformung vorzugsweise entlang der x-Achse erfolgt. Daher wurde die Minimierung der Knotenverschiebung in x-Richtung als Zielfunktion der Bauteiloptimierung ausgewählt.

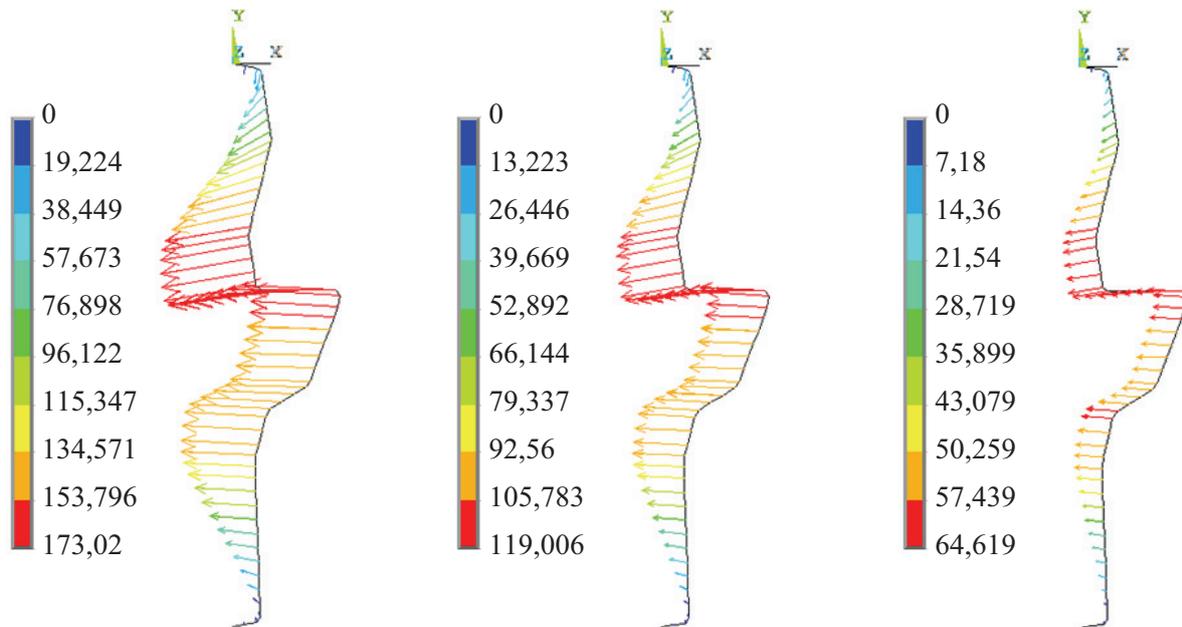


Abb. 57: Knotenverschiebung des FE-Modells als Vektorplot bei konstanten Wanddicken von 1,5 mm (links), 1,8 mm (mittig) und 2,985 mm (rechts)

Die rechnerische Spannungsanalyse zeigt, dass bei allen untersuchten Varianten mit konstanter Wanddicke, die auf dem GPR-Halbzeug mit 1000 g/m² Flächengewicht basieren, ein Bauteilversagen eintritt (siehe dazu **Tabelle 12**). Als Versagenskriterium wurde dabei aufgrund der quasiisotropen Eigenschaften von GPR-Werkstoffen und des nicht linearen Werkstoffverhaltens bis zum Bruch die Vergleichsspannung nach der Gestaltänderungsenergiehypothese (von Mises) herangezogen (vgl. [Kro05]). Zur Vermeidung des Bauteilversagens ist hier daher eine wesentliche Erhöhung des Halbzeugflächengewichts notwendig, was eine zusätzliche Strukturverstärkung erlaubt, aber gleichzeitig eine Bauteilgewichtszunahme nach sich zieht. In **Tabelle 12** sind die entsprechenden Berechnungsergebnisse für die GPR-Bauteile aus 1200 g/m² schweren Halbzeugen mit 35 Gew.-% PUR-Matrix angegeben. Beim Bauteil mit 1,5 mm Wanddicke zeigt diese Maßnahme eine unzureichende Verstärkungswirkung, wogegen bei den weiteren Bauteilen mit konstanter Dicke das Versagen verhindert werden konnte.

Tabelle 12: Simulationsergebnisse der GPR-Bauteile mit konstanter Wanddicke

Verbundkomponenten	Bewertungskriterien	Konstante Wanddicke			
		1,5 mm	1,8 mm	2,235 mm	2,985 mm
1000 g/m ² GPR-Halbzeug (65 Gew.-%), PUR-Matrix (35 Gew.-%)	Max. Knotenverschiebung in mm	173,020	119,006	80,041	64,619
	Max. Vergleichsspannung in MPa	46,266	32,713	21,149	11,792
	Zugehörige Festigkeit in MPa	29,005	25,306	19,943	10,695
	Bauteilversagen	JA	JA	JA	JA
1200 g/m ² GPR-Halbzeug (65 Gew.-%), PUR-Matrix (35 Gew.-%)	Maximale Knotenverschiebung	141,300	92,448	56,096	32,109
	Maximale Vergleichsspannung	46,266	32,713	21,149	11,792
	Zugehörige Festigkeit	40,500	36,000	29,475	18,225
	Bauteilversagen	JA	NEIN	NEIN	NEIN

Im Unterschied zu den konventionellen Varianten weisen die GPR-Verbundstrukturen mit der optimierten Wanddickenverteilung bei einem Halbzeugflächengewicht von 1000 g/m² kein Versagen auf. Die Simulationsergebnisse einiger optimierten GPR-Bauteile sind in **Tabelle 13** angegeben, wobei die Optimierungsergebnisse von den jeweiligen Startwerten der Designvariablen abhängig sind. Beim ersten Bauteil wurden den 59 Designvariablen die Startwerte von 10 bis 90 in wiederkehrenden Reihenfolge (entspricht den Wanddicken von 1,635 bis 2,835 mm) mit der Schrittweite 10 (0,15 mm) zugewiesen. Für das zweite Bauteil ist ein einheitlicher Startwert 21 festgelegt worden, was der Wanddicke von 1,8 mm entspricht. Das dritte Bauteil wies ebenfalls einen einheitlichen Startwert 50 und die optimierte Wanddickenverteilung mit der geringsten Knotenverschiebung auf. Ferner wurden zur Abschätzung der Ergebnisqualität die Startwerte 1 und 100 untersucht, die jedoch keine Verbesserung der Parameterkombinationen ergaben. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt, dass die hier entwickelte Methode zur Optimierung der Wanddickenverteilung gegenüber einer unterschiedlichen Startwertzuweisung robust ist und die berechnete maximale Knotenverschiebung stets in einem engen Wertebereich liegt. Bei der Optimierung komplexer Bauteile ist die Festlegung von einheitlichen Startwerten im Hinblick auf eine effektive numerische Berechnung mit einer für die Praxis ausreichenden Anzahl der Designvariablen vorteilhaft.

Tabelle 13: Simulationsergebnisse einiger optimierten GPR-Bauteile in Abhängigkeit von den gewählten Startwerten; Verbundkomponenten: 1000 g/m² GPR-Halbzeug (65 Gew.-%) und PUR-Matrix (35 Gew.-%)

Bewertungskriterien	Startwerte für die Optimierung		
	Variabel von 1,635 bis 2,835 mm	Einheitlich 1,8 mm	Einheitlich 2,235 mm
Maximale Knotenverschiebung in mm	63,261	62,798	62,518
Maximale Vergleichsspannung in MPa	14,513	14,403	13,799
Zugehörige Festigkeit in MPa	14,764	14,764	14,024
Bauteilversagen	NEIN	NEIN	NEIN

Die optimale GPR-Bauteilvariante weist bei einer nahezu 100%igen Materialausnutzung eine maximale Knotenverschiebung von 62,518 mm auf (vgl. **Tabelle 13**). Bezogen auf diesen Wert liegt die entsprechende Kenngröße bei der Variante mit der konstanten Wanddicke von 2,985 mm um 3,4% und bei der Variante mit 1,5 mm Wanddicke um 276,8% höher. Das Ergebnis der Simulation ist demnach ein hinsichtlich der Verformung optimiertes Bauteil, in dem kein Versagen eintritt, wobei das Bauteilgewicht in den hier betrachteten Fällen gleich ist.

Die normierten Kenngrößen der untersuchten konventionellen Bauteile sind in **Abb. 58** dargestellt. Dabei wurden die entsprechenden Kennwerte des bevorzugten optimierten Bauteils jeweils als 100% angenommen. Hervorzuheben ist, dass bei allen Varianten im Vergleich zur Optimal-Struktur höhere Bauteilverformungen vorliegen, die mit den niedrigeren Bauteilsteifigkeiten einhergehen. Zudem übersteigt die maximale Vergleichsspannung stets die zugehörige Festigkeit des Verbundwerkstoffs.

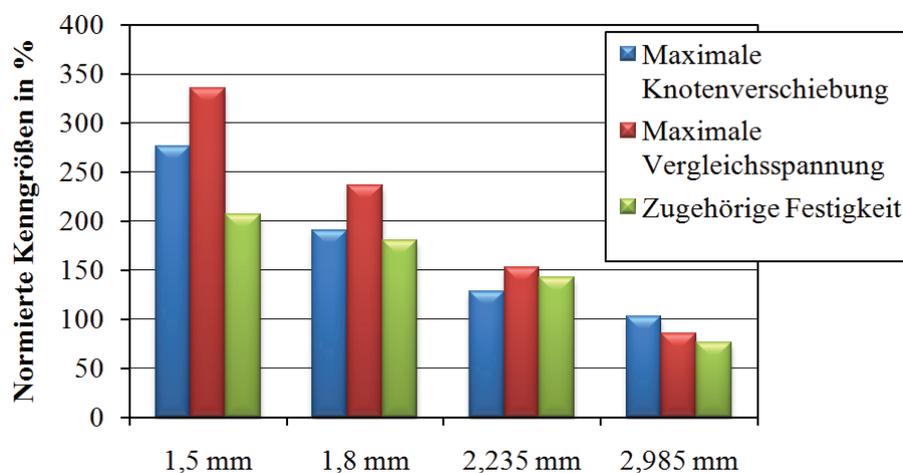


Abb. 58: Normierte Kenngrößen der konventionellen GPR-Bauteile konstanter Dicke bezogen auf die jeweiligen Kennwerte der Optimal-Struktur

Falls die Anforderung nach Minimierung der Maximalverformung durch die Vorgabe der Gewichtsreduzierung ersetzt wird, kann bei einer definierten Bauteilverformung die Materialeffizienz gesteigert werden. So führt z. B. die Reduzierung des Halbzeugflächengewichtes um 100 g/m^2 bei einem Matrixanteil von 35 Gew.-% zu einer Masseeinsparung von 154 g/m^2 im Verbund, was einer 10%igen Gewichtsreduzierung am Gesamtbauteil entspricht. Die Voraussetzung dafür ist die Querschnittsanpassung durch die Optimierung der Wanddickenverteilung. Besonders deutlich lässt sich das am Beispiel der in **Tabelle 12** vorgestellten Türverkleidung mit der konstanten Wanddicke von 1,8 mm feststellen, die in der Praxis oft zum Einsatz kommt. Dieses Bauteil muss zur Vermeidung des Versagens aus dem 1200 g/m^2 schweren GPR-Halbzeug hergestellt werden, während die Türverkleidung mit der optimierten Wanddickenverteilung aus dem leichteren 1000 g/m^2 GPR-Halbzeug der gleichen Belastung standhält und zudem eine Verformung von lediglich 67,6% derjenigen des Referenzbauteils aufweist.

Die Spannungsverteilungen der ausgewählten Bauvarianten sind in **Abb. 59** dargestellt, wobei die Maximalwerte im Bereich der Krafteinleitung und unter der Armauflage liegen und dort bei konventionellen Bauteilen zum Versagen führen.

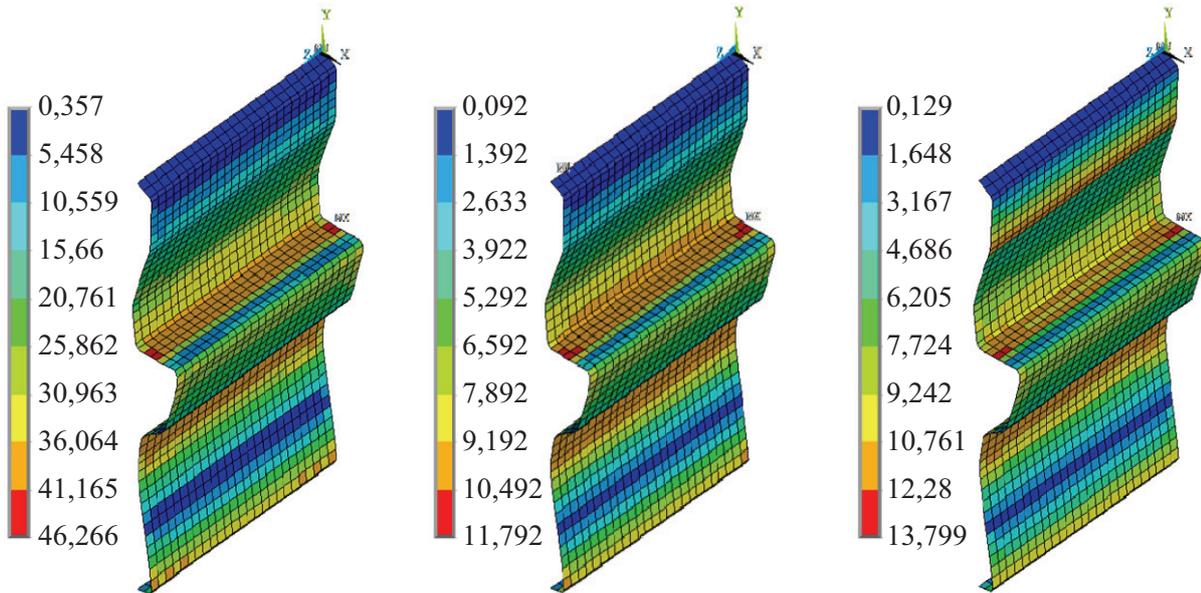


Abb. 59: Mises-Vergleichsspannungen der Bauvarianten mit konstanter Wanddicke von 1,5 mm (links) und 2,985 mm (mittig) sowie der Optimal-Struktur (rechts)

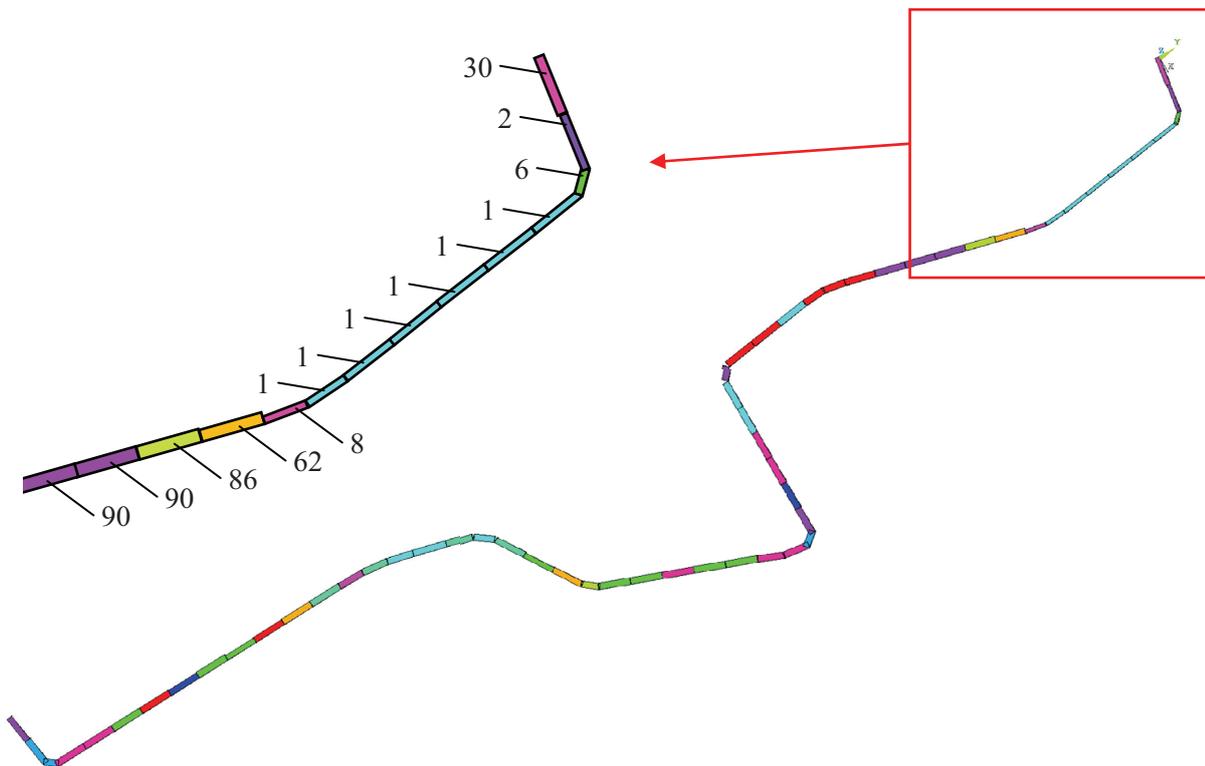


Abb. 60: Wanddickenverteilung des optimalen Bauteildesigns; Zahlen entsprechen den Identifikationsnummern der zugewiesenen Materialsektionen

Die Wanddickenverteilung des belastungsgerecht optimierten Bauteils verdeutlicht **Abb. 60**. Für jede Elementreihe wird hier eine eigene Materialsektion mit festgelegten Werkstoffkennwerten und einer

entsprechenden Dicke über die Identifikationsnummer bestimmt, die im vergrößerten Ausschnitt der graphischen Querschnittsdarstellung jeder Elementreihe zugeordnet ist. Die vollständigen Datensätze zu den Simulationsergebnissen sind dem Anhang 10.6 zu entnehmen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass durch die beschriebene Anpassung der Dicke an die lokal herrschenden Beanspruchungen hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit ein höherer Leichtbaugrad erreicht wird. Die vorgestellte leichtbauorientierte Konstruktionsmethodik erlaubt dabei nicht nur eine nahezu vollständige Ausschöpfung der Festigkeitsressourcen von GPR-Pressbauteilen, sondern kann zur Querschnittsdimensionierung von NFK-Formpressbauteilen aus konventionellen Naturfaserhalbzeugen herangezogen werden. Eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung der erarbeiteten Auslegungsstrategie ist die genaue Kenntnis der dichteabhängigen Verbundeigenschaften zur Generierung einer ausreichenden Anzahl von notwendigen Materialsektionen.

7 Neue Herstellungstechnologie für Verbundbauteile aus Ganzpflanzenrohstoffen

Das unter Einsatz von Ganzpflanzenrohstoffen entwickelte Verfahren zur Fertigung von naturfaserverstärkten Bauteilen in Leichtbauweise beinhaltet die Hauptstufen der Rohstoffbereitstellung, der Halbzeugfertigung, der Werkstoffentwicklung und -charakterisierung, der Bauteilauslegung und -optimierung sowie der Bauteilherstellung und umfasst dementsprechend die komplette Wertschöpfungskette von der Pflanze bis zum fertigen Bauteil (siehe **Abb. 61**). Dabei weist der neue technologische Ansatz deutliche Vorteile gegenüber den etablierten Fertigungsverfahren und den gängigen Materialkonzepten auf. Vor allem die Nutzung der gesamten Flachspflanze, die eine nahezu 100%ige Verwertung zulässt, erhöht nicht nur die Materialeffizienz deutlich, sondern auch die Kosteneffizienz, und leistet somit einen Beitrag zum nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen.

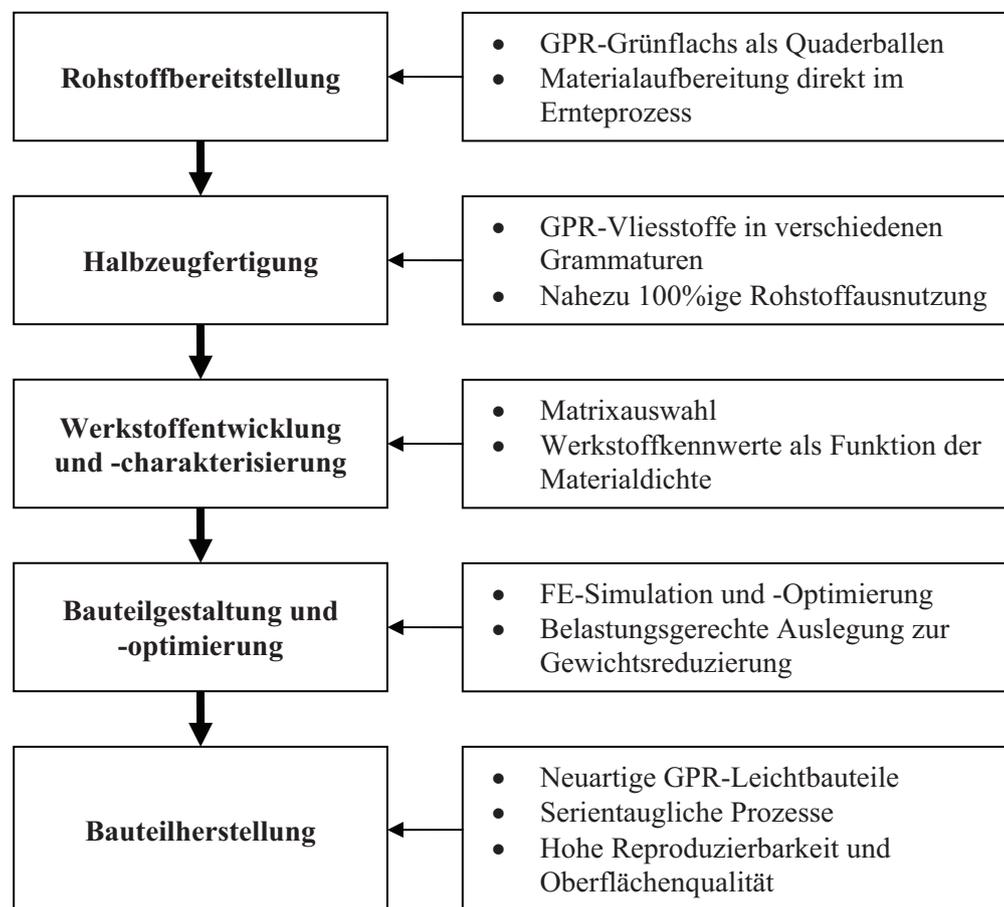


Abb. 61: Neue durchgängige Prozesskette zur Herstellung von GPR-Bauteilen in Leichtbauweise

Im Bereich der **Rohstoffbereitstellung** wurde eine für die technische Anwendung geeignete Rohstoffvorlage entwickelt und Vorgaben für eine prozesskonforme Materialaufbereitung während des Ernteprozesses definiert. Dabei sind der Röstgrad der Pflanzen, die Materialfeuchte und die Längverteilung im Quaderballen als ausschlaggebende Qualitätskenngrößen identifiziert worden. Anhand der

durchgeführten Versuche zur Materialaufbereitung und Halbzeugherstellung konnte das optimale Verarbeitungsfenster für die Bereitstellung einer prozessgerechten Rohstoffvorlage ermittelt werden. Hervorzuheben ist die verlustarme Weiterverarbeitung des Pflanzenmaterials zum flächigen Halbzeug. Dabei kommt das nicht geröstete Flachstroh, das beim Eintreten der gelbgrünen Reifephase der Pflanzen geerntet wird, mit einem Feuchtigkeitsgehalt im Bereich von 12 bis 15 Gew.-% zur Anwendung. Die Längenverteilung im Ballen, die für eine einwandfreie Prozessführung bei der Halbzeugherstellung erforderlich ist, liegt für die Verarbeitung auf der beschriebenen Vliesanlage zwischen 50 mm und 150 mm. Das in Bezug auf die Längenverteilung optimale Prozessfenster ist von der jeweiligen Maschinenkonfiguration der Vliesanlage abhängig und dadurch auf andere Anlagentechnik nur bedingt übertragbar. Dagegen zählen die für den Feuchtegehalt ermittelten Grenzwerte zu den wesentlichen Kenndaten, die von der Anlagenkonfiguration grundsätzlich unabhängig sind.

Die Fremdkörperfreiheit der Rohstoffvorlage wird durch eine entsprechende Gestaltung des Ernteverfahrens gewährleistet, wobei gemäß dem neuen Ernteverfahren gleichzeitig auch die Einflussnahme auf Schnittlänge und Ballengröße entsprechend den Anforderungen des Vliesherstellers erfolgt. Eine technische Umsetzung dieses Ernteverfahrens für die Bereitstellung des GPR Grünflachs unter Verwendung „schlagkräftiger“ Landtechnik verdeutlicht **Abb. 62**.



Abb. 62: Feldversuch zur Bereitstellung des GPR Grünflachs als Quaderballen für das entwickelte Verfahren zur Halbzeugherstellung: a) Ballenpresse im Einsatz, b) Integriertes Schneidwerk der Ballenpresse und c) Fertiger Quaderballen aus GPR Grünflachs

Die maximale Stundenleistung der eingesetzten Ballenpresse beträgt ca. 100 Ballen, was einer Materialmenge von ca. 30 t entspricht. Die vorgegebene Schnittlängenverteilung resultiert aus der Einstellung des Messerabstandes im Schneidwerk der Ballenpresse.

Bei dem zweiten Prozessschritt **Halbzeugfertigung** wurden Modifizierungen bei den folgenden technologischen Abschnitten vorgenommen: Anlagenbeschickung, Faserdosierung, Vlieslegung und Vliesverfestigung. Auf dieser Basis sind die jeweiligen Maschinendatensätze für eine reproduzierbare verlustarme Prozessführung ermittelt worden. Die Produktionsleistung der betrachteten Vliesanlage ist vom Flächengewicht der GPR-Vliesstoffe direkt abhängig und bewegt sich bei den untersuchten Flächengewichten zwischen 800 und 1200 g/m² entsprechend bei 550 bis 860 kg/h. Eine wesentliche Anforderung bestand dabei in der Zuführung von Produktionshilfsstoffen – leichten Kunstfaservliesstoffen – als Abdeckware im Vlieslegungsprozess. Die Untersuchung der Morphologieänderung des GPR-Materials entlang der Fertigungskette und die Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der wichtigsten Einflussgrößen der Halbzeugverfestigung erlaubten bei der gewählten Geometrie der Verfestigungsnadeln eine praxisrelevante Festlegung der zugehörigen Parametergrenzwerte. Basierend auf den Ergebnissen der Flächengewichtsanalyse und der Zugprüfung der repräsentativ ausgewählten GPR-Halbzeuge wurde die Einstichdichte von 100 1/cm² bei der Stichtiefe von 11 mm und beidseitiger Vernadelung als besonders vorteilhaft für eine effiziente und materialgerechte Herstellung eingestuft.

Eine ganzheitliche Verwertung der Flachspflanzen ist anhand der Untersuchungen der Materialzusammensetzung in den GPR-Halbzeugen nachgewiesen worden, wobei annähernd gleichmäßige Verteilung der Flachsfasern und -schäben im Halbzeugquerschnitt erzielt werden konnte. Darüber hinaus wurden auf Basis der Fertigungsstudien Maßnahmen zur Erhöhung der Materialeffizienz durch die Rückführung der anfallenden Produktionsreststoffe (lose Flachsschäben) ins Halbzeug bei der großtechnischen Umsetzung des neuen Fertigungsverfahrens abgeleitet. Die verwendete Vliesanlage der Fa. Isowood GmbH und das hergestellte GPR-Halbzeug als Rollenware sind in **Abb. 63** dargestellt.



Abb. 63: Verwendete Vliesanlage (links) und fertige GPR-Halbzeugrolle (rechts)

Für die **Werkstoffentwicklung und -charakterisierung** wurde zunächst die Auswahl eines Matrixmaterials vorgenommen, wofür im Rahmen der Vorversuche im Plattenwerkzeug vier praxisrelevante und nach Reaktionstyp unterschiedliche Harzsysteme (Epoxid-, Polyurethan- und Polyacrylatharz) heran-

gezogen worden sind. Anhand der ermittelten mechanischen Verbundeigenschaften wurde das PUR-Harzsystem aus Polyol Elastoflex[®] E 3592/100 und Isocyanat Iso 118/4 als besonders geeignet eingestuft. Die Untersuchung der ausgewählten Matrix hinsichtlich der Vernetzungskinetik in Abhängigkeit von der Verarbeitungstemperatur erlaubte die Optimierung des Pressprozesses bei der Fertigung von GPR-Bauteilen. Dadurch konnten serientaugliche Zykluszeiten von lediglich 45 s erzielt werden, wobei das Matrixmaterial auf das GPR-Halbzeug mittels einer 2K-Sprühanlage beidseitig aufgetragen und die so entstandene Komponentenmischung unter Druck und Temperatur zum Verbundwerkstoff konsolidiert werden konnte.

Im Weiteren sind zahlreiche unterschiedliche GPR-Verbundplatten unter Variation des Halbzeugflächengewichtes, des Matrixanteils und der Strukturverdichtung hergestellt und hinsichtlich der ausschlaggebenden Werkstoffeigenschaften im Zug- und Biegeversuch sowie in der Schlagzähigkeitsprüfung umfassend untersucht worden. Die entsprechenden Werkstoffkennwerte wurden als dichteabhängige Kenngrößen dargestellt und analysiert. Sie bildeten darüber hinaus die Datenbasis zur Verifizierung des eigens entwickelten mikromechanischen Werkstoffmodells für GPR-Verbundwerkstoffe. Die anschließend durchgeführten mikroskopischen Untersuchungen der GPR-PUR-Verbunde lieferten nicht nur wesentliche Informationen zum werkstoffmechanischen Verhalten und zum Einfluss prozessbedingter Parameter auf die Verbundeigenschaften, sondern bestätigen, dass die gesamte Flachspflanze als Verstärkungskomponente in Kunststoffbauteilen zum Tragen kommt. Diese Erkenntnisse dienen zur optimalen Gestaltung der neuen durchgängigen Prozesskette und der Ableitung von Prozessrestriktionen bei der Herstellung von GPR-Bauteilen.



Abb. 64: Beispiele von konfektionierten GPR-Halbzeugzuschnitten (links) und kaschierten GPR-Formteilen (rechts)

Die bevorzugten GPR-Verbunde sind im vorhandenen E87-Versuchswerkzeug zu Bauteilen (Türverkleidung des 1er BMW) verarbeitet und anschließend im vakuumgestützten Kaschierungsprozess mit entsprechenden Oberflächenmaterialien ausgestattet worden, wodurch die gesamte Prozesskette erfolgreich für Serienanwendungen im Fahrzeugbau validiert werden konnte. Beispiele der konfektionierten GPR-Halbzeuge und der kaschierten GPR-Bauteile sind in **Abb. 64** dargestellt. Die Ergebnisse der durchgeführten branchenspezifischen Bauteilprüfungen belegen das anforderungsgerechte Eigenschafts-

profil von GPR-Leichtbauteilen, wobei sich diese gegenüber den Serienbauteilen speziell im Hinblick auf Emissionen und Brennbarkeit durch bessere Kennwerte auszeichnen.

Im Rahmen der Dissertation konnte darüber hinaus eine neue Gestaltungstrategie für NFK-Leichtbaukomponenten entwickelt werden, die eine belastungsgerechte Bauteilauslegung in Leichtbauweise zulässt und dadurch eine weitere Gewichtsreduzierung und Verbesserung der Struktureigenschaften im Vergleich zu den derzeit etablierten Referenzbauteilen erlaubt. So konnte an einem repräsentativen Strukturmodell einer Türseitenverkleidung durch die Anwendung der hier entwickelten FE-Wanddickenoptimierung ein Gewichtsvorteil von 20% gegenüber dem klassisch dimensionierten Bauteil nachgewiesen werden. Die bei der nicht linearen Optimierung durchgeführte Sensitivitätsanalyse bezüglich der Problematik der Startpunktfestlegung in der Wertelandschaft zeigte eine hohe Robustheit und Zuverlässigkeit des generierten FE-Modells. Die erzielten Erkenntnisse besitzen Pilotcharakter für andere GPR-Bauteile, allerdings sollte bei komplexeren Strukturen eine entsprechende Umformsimulation der Optimierung vorgeschaltet werden. Die erarbeitete Konstruktionsmethodik kann im Allgemeinen auch für die Auslegung und Gestaltung von NFK-Formpressbauteilen eingesetzt werden, wofür die entsprechenden Werkstoffkennwerte in Abhängigkeit von der Werkstoffdichte zu ermitteln sind.

8 Zusammenfassung

Die Ressourcenknappheit erfordert in zunehmendem Maße neue ökologische und ökonomische Material- und Strukturlösungen. Besondere Vorteile besitzen hier Bauteile aus naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK), die zudem hohe Leichtbaueigenschaften aufweisen und daher für mobile Anwendungen wie z. B. im Fahrzeugbau prädestiniert sind. Eine weitere Steigerung der Ressourceneffizienz bei hoher Wirtschaftlichkeit kann durch den Einsatz von Ganzpflanzenrohstoffen (GPR) zur Verstärkung von Kunststoffen erzielt werden, wobei sich die entsprechenden Fertigungsverfahren erst am Anfang des Entwicklungsstadiums befinden. Zur Bereitstellung von umweltschonenden und nachhaltigen Technologien zur Herstellung von derartigen Leichtbaustrukturen ist eine ganzheitliche Betrachtung der komplexen Wertschöpfungskette von der Pflanze bis zum fertigen Bauteil zwingend erforderlich. Denn nur eine übergreifende Herangehensweise zur Abstimmung der einzelnen Prozessschritte aufeinander unter der Berücksichtigung kompatibler Schnittstellen und fertigungsbedingter Eigenschaften erlaubt eine nahezu vollständige Ausschöpfung des werkstoffimmanenten Leistungspotenzials.

In der vorliegenden Arbeit ist eine durchgängige Technologie zur Herstellung von GPR-Bauteilen in Leichtbauweise konzipiert, konfiguriert, erprobt und optimiert worden, die – gegenüber den klassischen NFK-Technologien – erhebliche Vorteile hinsichtlich der Material- und Kosteneffizienz aufweist. Neben der deutlichen Verkürzung des Rohstoffgewinnungsprozesses und Minimierung der Einflüsse infolge der Witterungssituation im Erntefenster konnten GPR-Halbzeuge mit quasihomogener Flächengewichtsverteilung und imprägnierfähiger Struktur hergestellt werden. Zur Analyse des Verbundverhaltens von GPR-Werkstoffen sind auf Basis mikroskopischer Untersuchungen und zerstörender Belastungsprüfungen werkstoffmechanische Näherungsformeln erarbeitet worden. Als wesentlicher, über den Pressprozess steuerbarer Parameter fließt in diese Mischungsregel die Dichte des Verbundes und damit die Bauteildicke ein, wodurch eine direkte Korrelation zum Fertigungsverfahren gegeben ist. Anhand der abgeleiteten funktionalen Zusammenhänge können die Bauteileigenschaften gezielt an die Belastungsanforderungen angepasst werden, wodurch eine Auslegungsstrategie vorliegt, um das Leichtbaupotenzial der neuen Werkstoffgruppe GPR vollständig auszunutzen. Die gewonnenen Erkenntnisse zum prozessbedingten Verbundverhalten, zur Bauteilauslegung und zur Konzeption der Prozesskette bilden die wesentliche Grundlage für ein übergeordnetes Konzept zur gekoppelten Bauteil- und Prozessgestaltung. Diese Herangehensweise konnte exemplarisch an eigens hergestellten und getesteten GPR-Halbzeugen und -Musterbauteilen verifiziert und validiert werden. Im Weiteren bestätigen die durchgeführten rechnerischen, experimentellen und technologischen Untersuchungen nicht nur die hohe Variabilität der mechanischen Eigenschaften der GPR-Verbunde und die hohe Umformbarkeit für komplexe Bauteilgeometrien, sondern auch die zusätzlichen Leichtbauvorteile durch dickenvariable Bauteilgestaltung.

Im Hinblick auf die Produktivitätssteigerung und Minimierung des Matrixanteils bei Leichtbaustrukturen ist eine detaillierte Abstimmung der einzelnen Prozessparameter und der notwendigen Abdeckmaterialien bei der Vlieslegung notwendig. Die Anwendung der vorgeschlagenen Maßnahmen zur Rückführung von anfallenden Produktionsreststoffen in den Vlieslegungsprozess gewährleistet dabei die verlustfreie Verwertung des Pflanzenmaterials in technischen Halbzeugen und erhöht damit die Nachhaltigkeit des neuen Verfahrens zur Herstellung von GPR-Bauteilen.

9 Verzeichnisse

9.1 Literaturverzeichnis

- [AHS01] ALEX, R., HIEBER, G., SCHORNDORF, K.: *Umweltfreundliche Verbunde – PMMA-Reaktionsharze mit Flachsfasern verstärken*. In: *Kunststoffe* 91 (2001) 12, S. 70–75.
- [BBD⁺10] BAUR, E., BLOCK, T., DICKERT, M., JOAS, S.: *Erstellung von Konstruktionsregelwerken für das Spritzgießen und Formpressen von naturfaserverstärkten Kunststoffen*. Schlussbericht zum Verbundvorhaben (FNR-Förderkennzeichen 22002205), 2010.
- [BGJ⁺09] BAUR, E., GRAUPNER, N., JOAS, S., OTREMBIA, F.: *Formpressteile aus naturfaserverstärkten Kunststoffen*. In: *Kunststoffe* 99 (2009) 3, S. 36–43.
- [BGW⁺08] BAAR, A., GRAFFIUS, T., WONNEBERGER, M., METTE, C., REIMER, L., GÜNTHER, P.: *Immer wichtigere Rolle im Fahrzeugbau*. In: *Automotive Materials, Entwicklung-Anwendung-Recycling* 5 (2008) 1, S. 25–27.
- [BK99] BECKMANN, A., KLEINHOLZ, R.: *Anforderungen an Naturfasern aus der Sicht eines Kfz-Zulieferers für Innenraumteile*. 2nd International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 28. – 29. Juni 1999.
- [BKL⁺99] BERGNER, A., KÖHLER, E., LAMPKE, Th., ODENWALD, S., WIELAGE, B.: *Flachsfaserverstärktes Polypropylen*. In: *Kunststoffe* 89 (1999) 8, S. 60–62.
- [BKL00] BÓCSA, I., KARUS, M., LOHMEYER, D.: *Der Hanfanbau – Botanik, Sorten, Anbau und Ernte, Märkte und Produktlinien*. Münster: Landwirtschaftsverlag, 2000.
- [BM01] BROCKMANN, C., MITZLER, J.: *Weniger Fertigungsschritte, kurze Zykluszeiten. Großflächige dekorierte Formteile im One-Shot-Verfahren*. In: *Kunststoffe* 91 (2001) 8, S. 122–124, 126.
- [BMS⁺05] BUTTLAR, H.-B. von, MÜSSIG, J., SCHMEHL, M., SCHÖNFELD, U.: *Naturfaserverstärkte Konstruktionswerkstoffe für SMC-Anwendungen. Neue industrielle Fertigungsverfahren und Anwendungen*, Fachtagung zur AGRITECHNICA, Hannover, 10. November 2005.
- [BS92] BÖTTCHER, P., SCHMALZ, E.: *Nähwirk-Vliesstoffe aus Pflanzenfaserstoffen für technische Textilien*. 4. Int. Techtexil-Symposium, Neue Perspektiven für technische Vliesstoffe, Aktuelle Entwicklungen im Materialbereich, Frankfurt/M., 02.-04. Juni 1992.
- [CGG⁺02] CHEVALLIER, F., GÜNTHER, P., GASSAN, J., SCHNACK, E., PICKETT, A. K.: *Lignoprop und Lignoflex: zwei „berechenbare“ Werkstoffe*. In: *Technische Textilien* 45 (2002) 3, S. 145–146, 148–150.

- [CGP⁺08] CARUS, M., GAHLE, Ch., PENDAROVSKI, C., VOGT, D., ORTMANN, S., GROTENHERMEN, F., BREUER, Th., SCHMIDT, Ch.: *Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaser-Werkstoffen (Deutschland und EU)*. Hürth: Media Cologne Kommunikationsmedien, 2008.
- [CO04] CESCUTTI, G., OTREMBIA, F.: *Übersicht aktuellen Ansätze zur Berechnung von naturfaserverstärkten Kunststoffen*. 7. Int. AVK-TV Tagung, Baden-Baden, 28.–29. September 2004.
- [DS88] DAMBROTH, M., SEEHUBER, R.: *Flachs: Züchtung, Anbau und Verarbeitung*. Stuttgart: Ulmer, 1988.
- [EG01] EINSIEDEL, R., GASSAN, J.: *Zur Recyclingfähigkeit von holz- und naturfaserverstärkten Duroplasten*. 4. Int. AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen, Baden-Baden, 11.–12. September 2001.
- [EGH⁺01] ESSENPREIS, M., GRASER, K., HAGEN, T., VORNBERGER, K., WÖRLE, G.: *Umweltverträglichkeit der neuen 7er-Baureihe*. In: *Motortechnische Zeitschrift* 62 (2001) Heft extra Der neue BMW 7er, S. 144–146, 148, 150–152.
- [Fis04] FISCHER, D.: *Mit one shot-Technologien Interieur-Oberflächen gestalten*. In: *Plastverarbeiter* 55 (2004) 8, S. 34, 39.
- [FM98] FRIES, K. W., MÜLLER, H.: *PUR Natur im Automobil. Mit Flachs und Sisal verstärkte Polyurethane für Automobil-Innenraumteile*. In: *Kunststoffe* 88 (1998) 4, S. 544–546.
- [Föl95] FÖLSTER, T.: *Nachwachsende Rohstoffe in technischen Anwendungen am Beispiel Fasern/Vliese*. In: *Textilveredlung* 30 (1995) 1/2, S. 2–8.
- [Fra05] FRANCK, R. R. (Hrsg.): *Bast and other plant fibres*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2005.
- [FS04] FREHSDORF, W., SCHMIDHUBER, S.: *Natürlich besser*. In: *Kunststoffe* 94 (2004) 10, S. 268–271.
- [Gas97] GASSAN, J.: *Naturfaserverstärkte Kunststoffe – Korrelation zwischen Struktur und Eigenschaften der Fasern und deren Composites*. Aachen: Shaker, 1997.
- [GBB⁺04] GABBERT, U., BAUMGARTEN, H., BERGER, H., KARI, S., PUDEL, F., SALEEM, Z.: *Computational Design, Compounding and Verification of Natural Fibre Composites for Industrial Applications*. 10th Int. Conference Renewable Resources and Plant Biotechnology, NA-ROSSA, Magdeburg, 7.–8. Juni 2004.
- [GCB01] GASSAN, J., CHATE, A., BEDZKI, A. K.: *Calculation of elastic properties of natural fibers*. In: *Journal of Materials Science* 36 (2001), S. 3715–3720.
- [GCS⁺08] GRAUPNER, N., CESCUTTI, G., SCHULTE, M., MÜSSIG, J.: *Wanddicken im Fokus - Umformverhalten beurteilen*. In: *Kunststoffe* 98 (2008) 1, S. 91–93.
- [Geh98] GEHM, L.: *Rheologie*. Hannover: Vincentz, 1998.

- [GHP00] GARKHAIL, S. K., HEIJENRATH, R. W. H., PEIJS, T.: *Mechanical properties of natural-fibre-mat-reinforced thermoplastics based on flax fibres and polypropylene*. In: Applied Composite Materials 7 (2000), S. 351–372.
- [GKK+04] GERTH, P., KÖHLER, R., KRAUSE, J.-P., MÜNCH, H.: *Herstellung und Charakterisierung von Verbundwerkstoffen aus definierten Naturfaserqualitäten*. 10th Int. Conference Renewable Resources and Plant Biotechnology, NAROSSA, Magdeburg, 7.–8. Juni 2004.
- [Got07] GOTTWALD, A.: *„Grüne“ Tür mit „Polyflax“ – nachwachsender Naturfaserverbund*. In: Automobil Produktion 20 (2007) 12, S. 71.
- [Gre06] GREINER, R.: *Naturfaser-Exterieur Anwendungen im Automobilbau*. In: Kunststoffe im Automobilbau, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2006, S. 145–156.
- [GWP⁺10] GUSOVIVUS, H.-J., WALLOT, G., PECENKA, R., RINBERG, R., NENDEL, W.: *Die Bereitstellung von Faserstoffen aus feucht konserviertem Hanf für die Verarbeitung zu naturfaserverstärkten Kunststoffen*. Narotech 2010, 8. Int. Symposium „Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen“, Erfurt, 9.–10. September 2010.
- [Hah85] HAHN, H. G.: *Elastizitätstheorie*. Stuttgart: Teubner, 1985.
- [Har01] HARTMANN, K.: *Zukunftsentwicklungen bei Werkstoffen im KFZ Innenraum*. Zulieferer Innovativ, Jahreskongress mit Fachausstellung, BAIKA, Bayern Innovativ, AUDI Forum Ingolstadt, 04. Juli 2001.
- [Har08] HARZHEIM, L.: *Strukturoptimierung: Grundlagen und Anwendungen*. Frankfurt/M.: Deutsch, 2008.
- [HBK97] HEIER, L., BARTSCH, C., KROMER, K.-H.: *Verfahrenstechnik der Produktion von Feldentholztem Leinstroh zur Erzeugung von nichttextilen Industriefasern*. In: VDI Berichte 1356, Düsseldorf: VDI, 1997, S. 189–192.
- [HKA01] HIEBER, G., KOHLER, R., ALEX R.: *Umweltfreundliche Verbunde*. In: Kunststoffe 91 (2001) 12, Carl Hanser Verlag, München, 2001, S. 70–75.
- [HNR97] HERRMANN, A. S., NICKEL, J., RIEDEL, U.: *Was können nachwachsende Rohstoffe in Konstruktionswerkstoffen leisten? Werkstoffeigenschaftswerte und Technologie*. In: Tagungsband zum 2. Symposium Biorohstoff Hanf, Frankfurt/M., 27.02.–02.03.1997, S. 381–388.
- [HP69] HALPIN, J. C., PAGANO, N. J.: *The Laminate Approximation for Randomly Oriented Fibrous Composites*. Journal of Composite Materials 3 (1969) 12, S. 720–724.
- [HS04] HENSELER, J., SCHMACHTENBERG, E.: *Durchgängige Simulationskette für naturfaserverstärkte Polymere*. 7. Int. AVK-TV Tagung, Baden-Baden, 28.–29. September 2004.
- [Jac06] JACOBS, W.: *Entscheidungskriterien zur Materialauswahl für Innenraumteile*. 9. Int. AVK-Tagung, Essen, 19.–20. September 2006.

- [KBW⁺10] KROLL, L., BLAU, P., WABNER, M., FRIEB, U., EULITZ, J., KLÄRNER, M.: *Leichtbaukomponenten für energieeffiziente Werkzeugmaschinen*. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): *Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik*, 1. Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters eniPROD, Chemnitz: 2010, S. 231-257.
- [KM10] KROLL, L., MÜLLER, S.: *Modeling and simulation of high-performance structures in fiber composites construction*. Meeting of the European Alliance for Thermoplastic Composites (EATC), Frankfurt/M.: 2010.
- [KN97] KÖHLER, E., NENDEL, W.: *Verbundwerkstoffe mit Naturfaserverstärkung*. In: Friedrich, K. (Hrsg.): *Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*. Frankfurt/M.: DGM Publisher, 1997, S. 663–668.
- [Kno00] KNOTHE, J.: *Entwicklung und Optimierung von Verarbeitungsverfahren zur Herstellung flachsverstärkter Kunststoffbauteile, Optimierung der Produktion, der Verwertung und des Recyclings von technisch nutzbaren Kurzfasern*. Schlussbericht zum Verbundvorhaben (FNR-Förderkennzeichen 22013395), 2000.
- [KOG⁺06] KARUS, M., ORTMANN, S., GAHLE, Ch., PENDAROVSKI, C.: *Einsatz von Naturfasern in Verbundwerkstoffen für die Automobilproduktion in Deutschland von 1999 bis 2005*. Hürth: nova-Institut, 2006.
- [KRL⁺06] KNOBELSDORF, C., REUBMANN, T., LÜTZKENDORF, R., ENDESFELDER, A., BRAUN, H.: *Vliesstoff/Duomer-Halbzeuge für die Verbundherstellung*. In: AVR Allgemeiner Vliesstoff-Report (2006) 4, S. 20–23.
- [Kro92] KROLL, L.: *Zur Auslegung mehrschichtiger anisotroper Faserverbundstrukturen*. Dissertation, TU Clausthal, 1992.
- [Kro05] KROLL, L.: *Berechnung und technische Nutzung von anisotropiebedingten Werkstoff- und Struktureigenschaften für multifunktionale Leichtbauanwendungen*. Habilitation, TU Dresden, 2005.
- [KS97] KNOTHE, J., SCHLÖBER, T.: *Naturfaserverstärkte Fahrzeugteile*. In: *Kunststoffe* 87 (1997) 9, S. 1148–1150, 1152.
- [KU10] KROLL, L., ULKE-WINTER, L.: *Leichtbau-Hochleistungsstrukturen nach dem Vorbild der Natur*. Von der Natur lernen: (R)Evolution in der Entwicklung technischer Systeme für den Apparate- und Anlagenbau, Frankfurt/M.: 2010.
- [KZ02] KLEBA, I., ZABOLD, J.: *Eine Fahrt ins Blaue. Naturfaserverstärkte Polyurethane im Automobilbau*. In: *Kunststoffe* 92 (2002) 3, S. 112–120.
- [Lam01] LAMPKE, Th.: *Beitrag zur Charakterisierung naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe mit hochpolymerer Matrix*. Dissertation, TU Chemnitz, 2001.
- [Lan98] LANGER, E.: *Flachs in Deutschland – Neue technische und textile Anwendungen*. 1st Nordic Conference on Flax and Hemp Processing, Tampere, 10.–12. August 1998.

- [Lei00] LEIFELD, F.: *Faservorbereitung*. In: ALBRECHT, W. u. a. (Hrsg.): *Vliesstoffe: Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung*. Wiley-VHC, Weinheim, 2000, S. 139–144.
- [LMR02] LÜTZKENDORF, R., MIECK, K., REUBMANN, T.: *Verfahren und Trends bei der Herstellung von naturfaserverstärkten Verbunden*. 5. Int. AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen, Baden-Baden, 17.–18. September 2002.
- [LR05] LÜTZKENDORF, R., REUBMANN, T.: *Verarbeitungstechnologien für die Naturfaserverbundherstellung*. In: GAK Gummi Fasern Kunststoffe 58 (2005) 7, S. 441–446.
- [LRA03] LIM, J. H., RATNAM, M. M., ABDUL KHALIL, H. P. S.: *An experimental and finite element analysis of the static deformation of natural fiber-reinforced composite beam*. In: Composites Science and Technology 63 (2003), S. 169–177.
- [MBH96] MÜSSIG, J., BÄUMER, R., HASENPATH, J.: *Mechanischer Aufschluß von Hanfstroh*. In: Melliand-Textilberichte 77 (1996) 5, S. 302–303.
- [Med08] MEDINA, L. A.: *Materialentwicklung und Prozessoptimierung von naturfaserverstärkten Kunststoffen mit geringem Matrixanteil für Automobilanwendungen*. Dissertation, TU Kaiserslautern, 2008.
- [Mez06] MEZGER, Th. G.: *Das Rheologie-Handbuch*. Hannover: Vincentz, 2006.
- [ML02] MÜLLER, H., LEYRER, H.: *Verwendung nachwachsender Rohstoffe bei der Fertigung von Verkleidungsteilen im Automobilbereich*. In: Schriftenreihe Kunststofftechnik (VDI). VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002, S. 221–232.
- [MR95] MIECK, K. P., REUBMANN, T.: *Flachs versus Glas. Flachsmattenverstärkte Thermoplaste (FMT) – eine Alternative zur Glasmattenverstärkung?* In: Kunststoffe 85 (1995) 3, S. 366–368, 370.
- [MSB⁺07] MÜSSIG, J., SCHÖNFELD, U., BUTTLAR, H.-B. von, SCHMEL, M.: *Karosserie aus Naturfasern und Pflanzenöl*. In: Kunststoffe 97 (2007) 3, S. 78, 80, 82–83.
- [MSL⁺03] MEDINA, L., SCHLEDJEWSKI, R., LAHM, M., JUNGSMANN, H.: *Formpressen duromer gebundener Naturfaserhalbzeuge*. In: DEGISCHER, H.-P. (Hrsg.): *Verbundwerkstoffe (14. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde Wien 2003)*. Wiley-VCH, Weinheim, 2003, S. 762–767.
- [MSL⁺04] MEDINA, L., SCHLEDJEWSKI, R., LAHM, M., JUNGSMANN, H.: *Innovative Naturfaserhalbzeuge für Automobilanwendung*. 5th Int. Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 27.–28. April 2004.
- [Müs99] MÜSSIG, J.: *Beurteilung der Eignung des Einsatzes von Hanffasern im Automobilbereich aus technischer Sicht*. Seminar Verbundwerkstoffe mit Hanf 'Technik' am Faserinstitut Bremen, Bremen, 19. Mai 1999.

- [Müs01] MÜSSIG, J.: *Untersuchung der Eignung heimischer Pflanzenfasern für die Herstellung von naturfaserverstärkten Duroplasten – vom Anbau zum Verbundwerkstoff*. Dissertation, Uni Bremen, 2001.
- [Ode03] ODENWALD, S.: *Eigenschaften und Umformverhalten naturfaserverstärkter Thermoplaste*. Dissertation, TU Chemnitz, 2003.
- [PBK04] PRÖMPER, E., BOGDANOV, N., KREITLOW, R.: *Neue Automobil-Interior-Bauteile aus nachwachsenden Rohstoffen*. 7. Int. AVK-TV Tagung, Baden-Baden, 28.–29. September 2004.
- [PS00] PÖLTI, J., SCHÄFER, H.: *I. Faserverstärkte Polyurethan (PUR)-Anwendungen für den Karosserieaußenbereich am Beispiel eines Dachmoduls und für II. Automobilinnenverkleidungen auf Basis nachwachsender Rohstoffe*. DVM-Tag 2000, Werkstoffe und Verfahren im Wettbewerb, Leichtbau im Fahrzeugbau, Berlin, 10.–12. Mai 2000.
- [RBS⁺10] RINBERG, R., BÜRGERMEISTER, S., SCHIERL, S., NENDEL, W., KROLL, L.: *Perspektiven von ganzpflanzenbasierten Naturfasern als Verstärkungskomponente in Kunststoffbauteilen*. 8. Int. Symposium „Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen“, Erfurt, 9.–10. September 2010.
- [RGK⁺05] RIEDEL, U., GASSAN, J., KARUS, M., MÜSSIG, J., PRÖMPER, E., SCHÖNBERGER, D., SPERBER, V.: *Technische und ökonomische Rahmenbedingungen für NFK-Bauteile*. 8. Int. AVK-TV Tagung, Baden-Baden, 27.–28. September 2005.
- [Rie01] RIEDEL, U.: *Naturfaserverstärkte Polymere: Stand der Technik und Perspektiven*. 4. Int. AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen, Baden-Baden, 11.–12. September 2001.
- [RKN⁺07] RINBERG, R., KROLL, L., NENDEL, W., PHILIPP, K.: *Neue Technologie zur ganzheitlichen Verwertung von Flachspflanzen in Innenraum-Verkleidungsbauteilen moderner Pkw*. 11. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, Chemnitz, 24.–25. Oktober 2007.
- [RLW06] RIEDEL, U., LÖWIS OF MENAR, Th. von, WURL, Th.: *Bioconcept-Car*. 9. Int. AVK-Tagung, Essen, 19.–20. September 2006.
- [RMH⁺08] REUßMANN, T., MÜLLER, K., HANSEN, M.-R., EHMKE, R.: *Verbundwerkstoffe auf Basis von cellulosischen Kurzfasern*. In: GAK Gummi Fasern Kunststoffe 61 (2008) 9, S. 578–583.
- [Sch97] SCHUH, T.: *Naturfasern in Automobilanwendungen*. In: FRIEDRICH, K. (Hrsg.): *Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*. Frankfurt/M.: DGM Publisher, 1997, S. 67–73.
- [Sch00] SCHENEK, A.: *Naturfaser-Lexikon*. Frankfurt/M.: Deutscher Fachverlag, 2000.
- [Sch05a] SCHÜRMAN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.

- [Sch05b] SCHUMACHER, A.: *Optimierung mechanischer Strukturen. Grundlagen und industrielle Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- [Sed04] SEDLACIK, G.: *Beitrag zum Einsatz von unidirektional naturfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen als Werkstoff für großflächige Strukturbauteile*. Dissertation, TU Chemnitz, 2004.
- [SFZ02] SCHOSSIG, T., FROMMANN, L., ZIEGMANN, G.: *Herstellungstechnologien für Faser-Verbund-Werkstoffe mit Naturfasern*. 5. Int. AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen, Baden-Baden, 17.–18. September 2002.
- [SKB02] SEDLACIK, G., KÖHLER, E., BERGNER, A.: *Langfaserverstärkte Thermoplaste aus bahnförmigem Halbzeug*. 9. Int. Tagung Stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen, Freiberg, 20.–21. März 2002.
- [Spe02] SPERBER, V. E.: *Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Holz- und Naturfaser Verbundwerkstoffe*. 4th International Wood and Natural Fibre Composites Symposium, Kassel, 10.–11. April 2002.
- [SRT⁺11] SCHIERL, S., RINBERG, R., TODOROV, A., KROLL, L., BROBERG, F.: *Steigerung der hochdynamischen Eigenschaften von NFK-Spritzgussbauteilen durch partielle Halbzeugverstärkung*. In: Wielage, B. (Hrsg.): *Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*. 18. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, TU Chemnitz: 2011, S. 555-560.
- [Van00] VAN TREECK, B.: *Das große Cannabis-Lexikon – Alles über die Nutzpflanze Hanf*. Berlin: Lexikon-Imprint, 2000.
- [Tro01] TROMMLER, W.: *Konstruktionswerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen im Schienenfahrzeugbau*. In: ZEV, Glasers Analen + DET, Die Eisenbahntechnik 125 (2001) 4, S. 166–167.
- [Wic03] WICHMANN, H.: *Perspektiven von KWST a. n. R. in den Bereichen Bootsbau sowie Wand- und Fußbodensysteme*. Vortrag, Fachtagung Nachhaltige Mobilität – Naturfaserwerkstoffe für die Verkehrstechnik zur AGRITECHNICA, Hannover, 13. November 2003.
- [Wil02] WILLMEROOTH, G.: *Technologien zur Verwendung von naturfaserverstärkten Polyurethanen für die serielle Produktion in der Automobilindustrie*. 4th Int. Wood and Natural Fibre Symposium, Kassel, 2002.
- [Wit94] WITTIG, W.: *Einsatz von Naturfasern in Kfz-Bauteilen*. In: *Kunststoffe im Automobilbau: Rohstoffe, Bauteile, Systeme*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994, S. 259–279.
- [WL04] WURL, T., LETTMANN, K.: *Kanadier – Nachwachsende Rohstoffe im Bootsbau*. 6. RIKO-Veranstaltung Neue faserverstärkte Produkte – vielseitig und funktionssicher. Göttingen, 2004.
- [Wuz06] WUZELLA, G.: *Ein neuartiger Verbundwerkstoff aus Naturfasern und einem Duroplasten – Technologie, Anwendungen und Eigenschaften*. 9. Int. AVK-Tagung, Essen, 19.–20. September 2006.

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Referenzbauteil der entwickelten Türverkleidung aus GPR verstärktem Polyurethan (1er BMW, Quellen: BMW AG, SLK TU Chemnitz).....	14
Abb. 2:	Konventionelle Flachsfasergewinnung und neues Verfahren der Rohstoffbereitstellung	16
Abb. 3:	Klassifizierung der Naturfaserhalbzeuge für technische Anwendungen in Abhängigkeit von Zusammensetzung und Matrixmaterial.....	17
Abb. 4:	Bioconcept-Car (links: NFK-Kotflügel und -Stoßstange; rechts: Testfahrzeug mit NFK-Anbauteilen).....	18
Abb. 5:	Schematische Darstellung eines Rundballens und eines Quaderballens.....	24
Abb. 6:	Aufbau eines Universal-Ballenöffners (Quelle: Temafa, Isowood).....	29
Abb. 7:	Faseröffner (Quelle: Isowood).....	29
Abb. 8:	Aufbau einer aerodynamischen Vliesanlage nach dem Airlay-Prinzip und zugehöriger Materialfluss (Quelle: Fehrer AG); RSP: Rüttelschachtspeiser, V21/R: Vorvliesbildner, K12: Wirrvlieskarde.....	30
Abb. 9:	Nadelmaschine mit Vliesstoffabzug (Quelle: Isowood)	31
Abb. 10:	Materialablieferung vom Rüttelschachtspeiser zur Bandwaage (links) und Materialzuführung zum Vorvliesbildner V21/R (rechts)	33
Abb. 11:	Materialverluste bei der Ablieferung vom Vorvliesbildner V21/R zur Wirrvlieskarde K12 (links) und gleichmäßiges Faservlies vor der Vernadelung (rechts).....	33
Abb. 12:	Harzimprägnierung im Sprühverfahren	35
Abb. 13:	Verfahrensablauf beim Formpressen von GPR-Halbzeugen	36
Abb. 14:	Neue durchgängige Prozesskette für NFK-Formpressbauteile aus GPR Grünflachs	38
Abb. 15:	Wesentliche Schnittstellen der neuen Prozesskette.....	39
Abb. 16:	Struktur des vernadelten Vliesstoffes aus GPR-Grünflachs	41
Abb. 17:	Typische Längenverteilungen in unterschiedlichen GPR-Ballen	43
Abb. 18:	Flachstroh mit unterschiedlichem Röstgrad	44
Abb. 19:	Verwendeter Laborentholzer Flaksy [®] der Fa. Bahmer Maschinenbau	45
Abb. 20:	Masseverlust bei der Faserentholzung in Abhängigkeit von Röstgrad und Anzahl Prozessdurchläufe	45
Abb. 21:	Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Materialverluste; Fehlerbalken entspricht der Standardabweichung	46
Abb. 22:	Verarbeitungsfenster für die Fertigung einer prozessgerechten Rohstoffvorlage aus GPR Grünflachs.....	47
Abb. 23:	Morphologieänderung des GPR Grünflachs im Verarbeitungsprozess	48

Abb. 24:	Ergebnisse der Faserlängenanalyse	49
Abb. 25:	Ober- und Unterseite eines Formpressbauteils aus GPR-Vliesstoff mit Polyurethan-Matrix	50
Abb. 26:	a) Ausgewählte Verfestigungsnadel (Typ: 15 x 16 x 25 x 3 1/2 M332 G 53017, Fa. Groz-Beckert), b) Arbeitsbereich und c) Kerbengeometrie	51
Abb. 27:	Höchstzugkraft des ausgewählten GPR-Vliesstoffs mit einem Flächengewicht von 1300 g/m ² in Abhängigkeit von der Vernadelungsdichte	53
Abb. 28:	Farbunterschiede verschiedener GPR-Vliesstoffe (Zahlen entsprechen der jeweiligen Einstichdichte)	54
Abb. 29:	Höchstzugkraftdehnung des repräsentativen GPR-Vliesstoffs mit einem Flächengewicht von ca. 1300 g/m ² in Abhängigkeit von der Vernadelungsdichte.....	54
Abb. 30:	Flächengewichtsänderung des repräsentativen GPR-Vliesstoffs in Abhängigkeit von der Vernadelungsdichte	55
Abb. 31:	Versuchsergebnisse zur Bewertung der Matrixeignung	57
Abb. 32:	Rheometer AR 2000ex mit integrierter Temperierkammer (TA Instruments), Materialprobe vor und nach der Viskositätsmessung.....	58
Abb. 33:	Komplexe Viskosität des PUR-Harzsystems Elastoflex [®] E 3592/100 im Messbereich bis 100.000 Pas als Funktion Temperatur und Zeit	59
Abb. 34:	Verlauf des Speicher- und Verlustmoduls sowie der komplexen Viskosität des PUR-Harzsystems Elastoflex [®] E 3592/100 bei 120°C	60
Abb. 35:	Fertigung eines GPR-Verbundbauteils im Versuchswerkzeug Typ E-87. Mit PUR-Harz beschichtetes GPR-Halbzeug (links) und konsolidiertes Formteil (rechts)	63
Abb. 36:	Fertiges Formpressbauteil und vakuumkaschierte Türverkleidung mit Anbauteilen	64
Abb. 37:	Analyse des Umformverhaltens der GPR-Halbzeuge anhand der Rasterverzerrung. Links oben: Napfbereich, rechts unten: Armauflage	64
Abb. 38:	Vergleich einer GPR-Verbundstruktur (links) und eines konventionellen Verbundwerkstoffs mit Flachs-/Sisalfaser-Verstärkung (rechts) bei 300facher Vergrößerung und einer Materialdichte von ca. 0,8 g/cm ³	65
Abb. 39:	Mikrostruktur der untersuchten GPR-Verbundwerkstoffe bei 100facher Vergrößerung	66
Abb. 40:	Plattendicke h in Abhängigkeit von der Werkstoffdichte und dem Halbzeugflächengewicht für untersuchte GPR-Verbundwerkstoffe mit einem Matrixharzanteil von 35 Gew.-%	67
Abb. 41:	Zugeigenschaften untersuchter GPR-Verbundwerkstoffe in Längs- und Querrichtung; Gesamtdarstellung für Halbzeugflächengewichte von 800 bis 1200 g/m ² (Matrixanteil 35 Gew.-%).....	68

Abb. 42:	Biegeeigenschaften untersuchter GPR-Verbundwerkstoffe in Längs- und Querrichtung; Gesamtdarstellung für Halbzeugflächengewichte von 800 bis 1200 g/m ² (Matrixanteil 35 Gew.-%).....	69
Abb. 43:	Gemittelter Zug-E-Modul (oben) und gemittelte Zugfestigkeit (unten) der GPR-Verbundwerkstoffe in Abhängigkeit vom Halbzeugflächengewicht und der Werkstoffdichte (Matrixanteil 35 Gew.-%).....	70
Abb. 44:	Gemittelter Biege-E-Modul (oben), gemittelte Biegefestigkeit (mittig) und gemittelte Biege-Bruchdehnung (unten) der GPR-Verbundwerkstoffe in Abhängigkeit vom Halbzeugflächengewicht und der Werkstoffdichte (Matrixanteil 35 Gew.-%).....	71
Abb. 45:	Biegefestigkeit und Biege-Bruchdehnung der GPR-Verbundwerkstoffe der Gruppe 1000 in Abhängigkeit von der Werkstoffdichte (Matrixanteil ca. 35 Gew.-%).....	72
Abb. 46:	Querkontraktionszahl als Funktion der Werkstoffdichte für die GPR-Verbunde der Gruppe 1000 (Matrixanteil ca. 35 Gew.-%).....	73
Abb. 47:	Zug-E-Modul und Zugfestigkeit von GPR-Verbunden der Gruppe 1000 bei einer Werkstoffdichte von ca. 0,8 g/cm ³ in Abhängigkeit vom Matrixanteil.....	74
Abb. 48:	Biege-E-Modul und Biegefestigkeit von GPR-Verbunden der Gruppe 1000 bei einer Werkstoffdichte von ca. 0,8 g/cm ³ in Abhängigkeit vom Matrixanteil.....	74
Abb. 49:	Charpy-Schlagzähigkeit der GPR-Verbundproben Gruppe 1000 in Abhängigkeit vom Matrixanteil und von der Belastungsrichtung (einheitliche Werkstoffdichte: ca. 0,75 g/cm ³).....	75
Abb. 50:	Charpy-Schlagzähigkeit der GPR-Längsproben in Abhängigkeit vom Halbzeugflächengewicht und von der Werkstoffdichte (Matrixanteil 35 Gew.-%).....	76
Abb. 51:	Mikromechanisches Näherungsmodell zur Beschreibung der Deformation von GPR-Verbunden im Pressprozess (LS: Luftpore/Schäbe).....	78
Abb. 52:	Berechneter und gemessener E-Modul des GPR-Verbundes in Abhängigkeit von der Werkstoffdichte.....	82
Abb. 53:	Berechnete und gemessene Querkontraktionszahl des GPR-Verbundes in Abhängigkeit von der Werkstoffdichte.....	82
Abb. 54:	Ausschnitt des CAD-Modells einer Serien-Türverkleidung zur Erläuterung der Drei-Schicht-Konstruktion.....	83
Abb. 55:	Vereinfachtes Flächenmodell der Türverkleidung (links) und Elementdarstellung mit Farbuweisung (rechts).....	84
Abb. 56:	Kinematische und dynamische Randbedingungen des FE-Modells: Gesamtlast in x-Richtung 85 N und in y-Richtung 235 N.....	87
Abb. 57:	Knotenverschiebung des FE-Modells als Vektorplot bei konstanten Wanddicken von 1,5 mm (links), 1,8 mm (mittig) und 2,985 mm (rechts).....	89

Abb. 58:	Normierte Kenngrößen der konventionellen GPR-Bauteile konstanter Dicke bezogen auf die jeweiligen Kennwerte der Optimal-Struktur.....	91
Abb. 59:	Mises-Vergleichsspannungen der Bauvarianten mit konstanter Wanddicke von 1,5 mm (links) und 2,985 mm (mittig) sowie der Optimal-Struktur (rechts).....	92
Abb. 60:	Wanddickenverteilung des optimalen Bauteildesigns; Zahlen entsprechen den Identifikationsnummern der zugewiesenen Materialsektionen.....	92
Abb. 61:	Neue durchgängige Prozesskette zur Herstellung von GPR-Bauteilen in Leichtbauweise	95
Abb. 62:	Feldversuch zur Bereitstellung des GPR Grünflachs als Quaderballen für das entwickelte Verfahren zur Halbzeugherstellung: a) Ballenpresse im Einsatz, b) Integriertes Schneidwerk der Ballenpresse und c) Fertiger Quaderballen aus GPR Grünflachs	96
Abb. 63:	Verwendete Vliesanlage (links) und fertige GPR-Halbzeugrolle (rechts).....	97
Abb. 64:	Beispiele von konfektionierten GPR-Halbzeugzuschnitten (links) und kaschierten GPR-Formteilen (rechts).....	98

9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Qualitätsmerkmale und Messgrößen des Pflanzenrohstoffs	25
Tabelle 2:	Qualitätsmerkmale und Messgrößen der Rohstoffvorlage (Quaderballen).....	26
Tabelle 3:	Bauteil- und Halbzeuganforderungen für den Bauteiltyp „Türverkleidung“ anhand der verfügbaren Liefervorschriften	27
Tabelle 4:	Produktionsleistung in Abhängigkeit vom Halbzeugflächengewicht	50
Tabelle 5:	Verwendete Matrixsysteme für die Verarbeitung mit GPR-Vliesstoffen	56
Tabelle 6:	Untersuchte Materialsysteme und zugehörige Parameter des Pressprozesses	57
Tabelle 7:	Untersuchte Werkstoffvarianten	61
Tabelle 8:	Angewendete Prüfverfahren und untersuchte Kenngrößen des GPR-Verbundwerkstoffs	62
Tabelle 9:	Gegenüberstellung praxisrelevanter Kenndaten (Quelle: Fa. Polytec Automotive).....	77
Tabelle 10:	Übersicht zu den Optimierungsparametern.....	85
Tabelle 11:	Repräsentative Materialdaten der eingeführten 100 Materialsektionen.....	86
Tabelle 12:	Simulationsergebnisse der GPR-Bauteile mit konstanter Wanddicke	90
Tabelle 13:	Simulationsergebnisse einiger optimierten GPR-Bauteile in Abhängigkeit von den gewählten Startwerten; Verbundkomponenten: 1000 g/m ² GPR-Halbzeug (65 Gew.-%) und PUR-Matrix (35 Gew.-%).....	90

10 Anhang

10.1 Einfluss des Röstgrades auf die Materialverluste bei Flachstroh

Materialcharge	Probe	Normierte Probemasse in % nach Prozessdurchlauf			
		0	1	2	3
Charge 1 (stark geröstet)	1	100,00	75,00	59,15	51,83
	2	100,00	90,65	71,03	64,17
	3	100,00	73,48	58,20	51,20
	4	100,00	68,75	55,31	46,88
	5	100,00	71,45	55,66	48,48
Mittelwert		100,00	74,99	59,09	51,80
Standardabweichung		0,00	8,59	6,45	6,82
Charge 2 (leicht angeröstet)	1	100,00	94,39	83,17	71,71
	2	100,00	94,66	83,79	71,82
	3	100,00	93,87	82,90	70,97
	4	100,00	95,24	84,24	71,92
	5	100,00	93,33	82,32	70,72
Mittelwert		100,00	94,45	83,45	71,54
Standardabweichung		0,00	0,73	0,75	0,54
Charge 3 (nicht geröstet)	1	100,00	94,45	90,02	89,46
	2	100,00	94,18	90,03	89,34
	3	100,00	95,26	91,02	91,02
	4	100,00	94,45	90,51	89,64
	5	100,00	94,67	90,22	89,78
Mittelwert		100,00	94,53	90,32	89,74
Standardabweichung		0,00	0,41	0,42	0,68

10.2 Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Materialverluste beim Grünflachsstroh

Materialcharge	Probe	Feuchtigkeits- gehalt	Ausgangs- masse	Masse nach zwei Prozessdurchläufen	Masse- verlust
		%	g	g	%
Charge 1	1	2,13	22,80	10,30	54,82
	2	2,15	24,30	11,30	53,50
	3	2,10	24,30	12,90	46,91
	4	2,16	21,80	11,20	48,62
	5	2,13	22,50	11,20	50,22
Mittelwert		2,13	23,14	11,38	50,82
Standardabweichung		0,02	1,12	0,94	3,30
Charge 2	1	6,98	26,80	21,90	18,28
	2	6,87	24,30	17,30	28,81
	3	7,05	26,60	17,90	32,71
	4	7,01	24,40	18,00	26,23
	5	6,73	23,70	16,30	31,22
Mittelwert		6,93	25,16	18,28	27,45
Standardabweichung		0,13	1,43	2,13	5,68
Charge 3	1	10,72	25,40	18,40	27,56
	2	11,22	26,10	21,40	18,01
	3	11,31	26,20	21,60	17,56
	4	10,53	29,20	23,40	19,86
	5	9,82	25,50	19,80	22,35
Mittelwert		10,72	26,48	20,92	21,07
Standardabweichung		0,60	1,56	1,90	4,09
Charge 4	1	15,05	25,40	22,80	10,24
	2	15,03	27,00	24,20	10,37
	3	14,85	26,00	23,10	11,15
	4	14,80	24,80	22,00	11,29
	5	15,50	22,50	19,80	12,00
Mittelwert		15,05	25,14	22,38	11,01
Standardabweichung		0,28	1,68	1,64	0,72
Charge 5	1	22,06	20,10	18,60	7,46
	2	20,47	21,00	19,70	6,19
	3	20,53	20,20	18,30	9,41
	4	21,78	20,20	18,40	8,91
	5	21,49	20,60	19,00	7,77
Mittelwert		21,27	20,42	18,80	7,95
Standardabweichung		0,73	0,38	0,57	1,27

Materialcharge	Probe	Feuchtigkeits- gehalt	Ausgangs- masse	Masse nach zwei Prozessdurchläufen	Masse- verlust
		%	g	g	%
Charge 6	1	24,86	20,40	18,70	8,33
	2	27,69	20,50	19,00	7,32
	3	24,73	21,70	20,00	7,83
	4	27,05	20,50	18,90	7,80
	5	27,02	20,80	19,30	7,21
Mittelwert		26,27	20,78	19,18	7,70
Standardabweichung		1,37	0,54	0,51	0,45
Charge 7	1	39,06	20,60	18,70	9,22
	2	41,22	20,30	18,40	9,36
	3	41,95	20,90	19,20	8,13
	4	38,56	20,70	18,70	9,66
	5	40,23	20,10	18,60	7,46
Mittelwert		40,20	20,52	18,72	8,77
Standardabweichung		1,42	0,32	0,29	0,93
Charge 8	1	52,46	21,10	18,10	14,22
	2	54,30	20,80	18,30	12,02
	3	52,90	20,10	17,30	13,93
	4	55,02	20,70	18,00	13,04
	5	53,69	20,50	18,10	11,71
Mittelwert		53,67	20,64	17,96	12,98
Standardabweichung		1,03	0,37	0,38	1,12

10.3 Kenngrößen des GPR-Verbundes und dessen Komponenten

<i>Eigenschaften der Verbundkomponenten</i>														
$E_{f\parallel}$	MPa	20000												
$E_{f\perp}$	MPa	3000 (geschätzt)												
$G_{f\perp\parallel}$	MPa	3000 (geschätzt)												
$\nu_{f\perp\parallel}$	-	0,2 (geschätzt)												
E_m	MPa	800	983	1167	1350	1533	1717	1900	2083	2266	2450	2633	2816	3000
ν_m	-	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200	0,225	0,250	0,275	0,300	0,325	0,350
φ	-	0,10	0,14	0,17	0,21	0,25	0,28	0,32	0,36	0,39	0,43	0,47	0,50	0,54
ρ	g/cm ³	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10
<i>Eigenschaften der UD-Schicht</i>														
E_{\parallel}	MPa	2720	3582	4431	5267	6088	6897	7692	8474	9242	9996	10738	11466	12180
E_{\perp}	MPa	865	1089	1317	1548	1778	2003	2221	2427	2617	2790	2942	3072	3179
$\nu_{\perp\parallel}$	-	0,065	0,092	0,117	0,141	0,162	0,182	0,200	0,216	0,230	0,243	0,253	0,262	0,269
$\nu_{\parallel\perp}$	-	0,021	0,028	0,035	0,041	0,047	0,053	0,058	0,062	0,065	0,068	0,069	0,070	0,070
$G_{\perp\parallel}$	MPa	417	517	619	721	825	930	1036	1142	1250	1357	1466	1575	1683
G_m	MPa	381	457	530	600	667	730	792	850	907	961	1013	1063	1111
<i>Invarianten und Elastizitätskenngrößen des Wirrfaserverbundes</i>														
Q_{11}	-	2724	3592	4449	5297	6136	6964	7782	8588	9383	10164	10930	11681	12414
Q_{22}	-	867	1091	1322	1557	1792	2023	2247	2460	2657	2837	2995	3130	3240
Q_{12}	-	56	101	155	219	291	368	449	531	612	689	758	820	872
Q_{66}	-	417	517	619	721	825	930	1036	1142	1250	1357	1466	1575	1683
U_1	-	1569	2040	2512	2986	3458	3927	4391	4847	5293	5726	6144	6546	6930
U_5	-	643	819	992	1163	1331	1496	1659	1819	1977	2132	2284	2433	2581
\bar{E}	MPa	1518	1961	2401	2840	3274	3705	4129	4546	4954	5352	5740	6115	6479
$\bar{\nu}$	-	0,180	0,197	0,210	0,221	0,230	0,238	0,244	0,249	0,253	0,255	0,257	0,257	0,255
\bar{G}	MPa	643	819	992	1163	1331	1496	1659	1819	1977	2132	2284	2433	2581

10.4 Materialdatenmatrix zum Erstellen von Materialsektionen in ANSYS

Verbundkomponenten: 1000 g/m² GPR-Halbzeug (65 Gew.-%), PUR-Harzsystem (35 Gew.-%)

Identifikationsnummer	E-Modul in MPa	Querkontraktionszahl	Wanddicke in mm	Zugfestigkeit in MPa
1	4900	0,2674	1,500	29,005
2	4868	0,2656	1,515	28,820
3	4836	0,2638	1,530	28,635
4	4804	0,2621	1,545	28,450
5	4772	0,2605	1,560	28,265
6	4740	0,2588	1,575	28,080
7	4708	0,2572	1,590	27,895
8	4676	0,2556	1,605	27,710
9	4644	0,2541	1,620	27,525
10	4612	0,2525	1,635	27,340
11	4580	0,2511	1,650	27,156
12	4548	0,2496	1,665	26,971
13	4516	0,2481	1,680	26,786
14	4484	0,2467	1,695	26,601
15	4452	0,2453	1,710	26,416
16	4420	0,2440	1,725	26,231
17	4388	0,2426	1,740	26,046
18	4356	0,2413	1,755	25,861
19	4324	0,2400	1,770	25,676
20	4292	0,2387	1,785	25,491
21	4260	0,2375	1,800	25,306
22	4228	0,2362	1,815	25,121
23	4196	0,2350	1,830	24,936
24	4164	0,2338	1,845	24,751
25	4132	0,2326	1,860	24,566
26	4100	0,2315	1,875	24,381
27	4068	0,2303	1,890	24,196
28	4036	0,2292	1,905	24,011
29	4004	0,2281	1,920	23,826
30	3972	0,2270	1,935	23,641
31	3940	0,2260	1,950	23,457
32	3908	0,2249	1,965	23,272
33	3876	0,2239	1,980	23,087
34	3844	0,2228	1,995	22,902
35	3812	0,2218	2,010	22,717
36	3780	0,2208	2,025	22,532
37	3748	0,2199	2,040	22,347
38	3716	0,2189	2,055	22,162
39	3684	0,2179	2,070	21,977
40	3652	0,2170	2,085	21,792

Verbundkomponenten: 1000 g/m² GPR-Halbzeug (65 Gew.-%), PUR-Harzsystem (35 Gew.-%)

Identifikationsnummer	E-Modul in MPa	Querkontraktionszahl	Wanddicke in mm	Zugfestigkeit in MPa
41	3620	0,2161	2,100	21,607
42	3588	0,2152	2,115	21,422
43	3556	0,2143	2,130	21,237
44	3524	0,2134	2,145	21,052
45	3492	0,2125	2,160	20,867
46	3460	0,2117	2,175	20,682
47	3428	0,2108	2,190	20,497
48	3396	0,2100	2,205	20,312
49	3364	0,2092	2,220	20,127
50	3332	0,2083	2,235	19,942
51	3300	0,2075	2,250	19,758
52	3268	0,2068	2,265	19,573
53	3236	0,2060	2,280	19,388
54	3204	0,2052	2,295	19,203
55	3172	0,2044	2,310	19,018
56	3140	0,2037	2,325	18,833
57	3108	0,2029	2,340	18,648
58	3076	0,2022	2,355	18,463
59	3044	0,2015	2,370	18,278
60	3012	0,2008	2,385	18,093
61	2980	0,2001	2,400	17,908
62	2948	0,1994	2,415	17,723
63	2916	0,1987	2,430	17,538
64	2884	0,1980	2,445	17,353
65	2852	0,1973	2,460	17,168
66	2820	0,1967	2,475	16,983
67	2788	0,1960	2,490	16,798
68	2756	0,1954	2,505	16,613
69	2724	0,1947	2,520	16,428
70	2692	0,1941	2,535	16,243
71	2660	0,1935	2,550	16,059
72	2628	0,1929	2,565	15,874
73	2596	0,1922	2,580	15,689
74	2564	0,1916	2,595	15,504
75	2532	0,1910	2,610	15,319
76	2500	0,1905	2,625	15,134
77	2468	0,1899	2,640	14,949
78	2436	0,1893	2,655	14,764
79	2404	0,1887	2,670	14,579
80	2372	0,1882	2,685	14,394

Verbundkomponenten: 1000 g/m² GPR-Halbzeug (65 Gew.-%), PUR-Harzsystem (35 Gew.-%)

Identifikationsnummer	E-Modul in MPa	Querkontraktionszahl	Wanddicke in mm	Zugfestigkeit in MPa
81	2340	0,1876	2,700	14,209
82	2308	0,1871	2,715	14,024
83	2276	0,1865	2,730	13,839
84	2244	0,1860	2,745	13,654
85	2212	0,1854	2,760	13,469
86	2180	0,1849	2,775	13,284
87	2148	0,1844	2,790	13,099
88	2116	0,1839	2,805	12,914
89	2084	0,1834	2,820	12,729
90	2052	0,1829	2,835	12,544
91	2020	0,1824	2,850	12,360
92	1988	0,1819	2,865	12,175
93	1956	0,1814	2,880	11,990
94	1924	0,1809	2,895	11,805
95	1892	0,1804	2,910	11,620
96	1860	0,1799	2,925	11,435
97	1828	0,1795	2,940	11,250
98	1796	0,1790	2,955	11,065
99	1764	0,1785	2,970	10,880
100	1732	0,1781	2,985	10,695

Verbundkomponenten: 1200 g/m² GPR-Halbzeug (65 Gew.-%), PUR-Harzsystem (35 Gew.-%)

Identifikationsnummer	E-Modul in MPa	Querkontraktionszahl	Wanddicke in mm	Zugfestigkeit in MPa
1	6000	0,2674	1,500	40,500
2	5975	0,2656	1,515	40,275
3	5950	0,2638	1,530	40,050
4	5925	0,2621	1,545	39,825
5	5900	0,2605	1,560	39,600
6	5875	0,2588	1,575	39,375
7	5850	0,2572	1,590	39,150
8	5825	0,2556	1,605	38,925
9	5800	0,2541	1,620	38,700
10	5775	0,2525	1,635	38,475
11	5750	0,2511	1,650	38,250
12	5725	0,2496	1,665	38,025
13	5700	0,2481	1,680	37,800
14	5675	0,2467	1,695	37,575
15	5650	0,2453	1,710	37,350
16	5625	0,2440	1,725	37,125
17	5600	0,2426	1,740	36,900
18	5575	0,2413	1,755	36,675
19	5550	0,2400	1,770	36,450
20	5525	0,2387	1,785	36,225
21	5500	0,2375	1,800	36,000
22	5475	0,2362	1,815	35,775
23	5450	0,2350	1,830	35,550
24	5425	0,2338	1,845	35,325
25	5400	0,2326	1,860	35,100
26	5375	0,2315	1,875	34,875
27	5350	0,2303	1,890	34,650
28	5325	0,2292	1,905	34,425
29	5300	0,2281	1,920	34,200
30	5275	0,2270	1,935	33,975
31	5250	0,2260	1,950	33,750
32	5225	0,2249	1,965	33,525
33	5200	0,2239	1,980	33,300
34	5175	0,2228	1,995	33,075
35	5150	0,2218	2,010	32,850
36	5125	0,2208	2,025	32,625
37	5100	0,2199	2,040	32,400
38	5075	0,2189	2,055	32,175
39	5050	0,2179	2,070	31,950
40	5025	0,2170	2,085	31,725

Verbundkomponenten: 1200 g/m² GPR-Halbzeug (65 Gew.-%), PUR-Harzsystem (35 Gew.-%)

Identifikationsnummer	E-Modul in MPa	Querkontraktionszahl	Wanddicke in mm	Zugfestigkeit in MPa
41	5000	0,2161	2,100	31,500
42	4975	0,2152	2,115	31,275
43	4950	0,2143	2,130	31,050
44	4925	0,2134	2,145	30,825
45	4900	0,2125	2,160	30,600
46	4875	0,2117	2,175	30,375
47	4850	0,2108	2,190	30,150
48	4825	0,2100	2,205	29,925
49	4800	0,2092	2,220	29,700
50	4775	0,2083	2,235	29,475
51	4750	0,2075	2,250	29,250
52	4725	0,2068	2,265	29,025
53	4700	0,2060	2,280	28,800
54	4675	0,2052	2,295	28,575
55	4650	0,2044	2,310	28,350
56	4625	0,2037	2,325	28,125
57	4600	0,2029	2,340	27,900
58	4575	0,2022	2,355	27,675
59	4550	0,2015	2,370	27,450
60	4525	0,2008	2,385	27,225
61	4500	0,2001	2,400	27,000
62	4475	0,1994	2,415	26,775
63	4450	0,1987	2,430	26,550
64	4425	0,1980	2,445	26,325
65	4400	0,1973	2,460	26,100
66	4375	0,1967	2,475	25,875
67	4350	0,1960	2,490	25,650
68	4325	0,1954	2,505	25,425
69	4300	0,1947	2,520	25,200
70	4275	0,1941	2,535	24,975
71	4250	0,1935	2,550	24,750
72	4225	0,1929	2,565	24,525
73	4200	0,1922	2,580	24,300
74	4175	0,1916	2,595	24,075
75	4150	0,1910	2,610	23,850
76	4125	0,1905	2,625	23,625
77	4100	0,1899	2,640	23,400
78	4075	0,1893	2,655	23,175
79	4050	0,1887	2,670	22,950
80	4025	0,1882	2,685	22,725

Verbundkomponenten: 1200 g/m² GPR-Halbzeug (65 Gew.-%), PUR-Harzsystem (35 Gew.-%)

Identifikationsnummer	E-Modul in MPa	Querkontraktionszahl	Wanddicke in mm	Zugfestigkeit in MPa
81	4000	0,1876	2,700	22,500
82	3975	0,1871	2,715	22,275
83	3950	0,1865	2,730	22,050
84	3925	0,1860	2,745	21,825
85	3900	0,1854	2,760	21,600
86	3875	0,1849	2,775	21,375
87	3850	0,1844	2,790	21,150
88	3825	0,1839	2,805	20,925
89	3800	0,1834	2,820	20,700
90	3775	0,1829	2,835	20,475
91	3750	0,1824	2,850	20,250
92	3725	0,1819	2,865	20,025
93	3700	0,1814	2,880	19,800
94	3675	0,1809	2,895	19,575
95	3650	0,1804	2,910	19,350
96	3625	0,1799	2,925	19,125
97	3600	0,1795	2,940	18,900
98	3575	0,1790	2,955	18,675
99	3550	0,1785	2,970	18,450
100	3525	0,1781	2,985	18,225

10.5 FE-Modell zur Optimierung der Wanddickenverteilung

ANSYS-Eingabedatei

```

1.  !=====
2.  !1. Deklaration der Designvariablen
3.  ! und die Startwertzuweisung
4.  !=====
5.  fini
6.  /CLEAR,NOSTART
7.
8.  *set,Par_1,100
9.  *set,Par_2,100
10. *set,Par_3,100
11. *set,Par_4,100
12. *set,Par_5,100
13. *set,Par_6,100
14. *set,Par_7,100
15. *set,Par_8,100
16. *set,Par_9,100
17. *set,Par_10,100
18. *set,Par_11,100
19. *set,Par_12,100
20. *set,Par_13,100
21. *set,Par_14,100
22. *set,Par_15,100
23. *set,Par_16,100
24. *set,Par_17,100
25. *set,Par_18,100
26. *set,Par_19,100
27. *set,Par_20,100
28. *set,Par_21,100
29. *set,Par_22,100
30. *set,Par_23,100
31. *set,Par_24,100
32. *set,Par_25,100
33. *set,Par_26,100
34. *set,Par_27,100
35. *set,Par_28,100
36. *set,Par_29,100
37. *set,Par_30,100
38. *set,Par_31,100
39. *set,Par_32,100
40. *set,Par_33,100
41. *set,Par_34,100
42. *set,Par_35,100
43. *set,Par_36,100
44. *set,Par_37,100
45. *set,Par_38,100
46. *set,Par_39,100
47. *set,Par_40,100
48. *set,Par_41,100
49. *set,Par_42,100
50. *set,Par_43,100
51. *set,Par_44,100
52. *set,Par_45,100
53. *set,Par_46,100
54. *set,Par_47,100
55. *set,Par_48,100
56. *set,Par_49,100
57. *set,Par_50,100
58. *set,Par_51,100
59. *set,Par_52,100
60. *set,Par_53,100
61. *set,Par_54,100
62. *set,Par_55,100
63. *set,Par_56,100
64. *set,Par_57,100
65. *set,Par_58,100
66. *set,Par_59,100
67. !=====
68. !2. Optimierungsschleife
69. !=====
70. *create,Optimierung
71. /prep7
72. !-----
73. !! Festlegen des Elementtyps
74. !-----
75. et,1,181
76. keyopt,1,8,1
77. !-----
78. !! Einlesen einer vorgefertigten
79. !! Materialdatenmatrix
80. !-----
81. *DIM,DMtable,Table,100,4,1,Mats
82. *TREAD,DMtable,mat_opti1000,txt,,
83. !-----
84. !! Definition von n: Anzahl der
85. !! verwendeten Materialsektionen
86. !-----

```

```

87. *set,n,100
88. !-----
89. !! Geometrieaufbau
90. !-----
91. k,1,0,0
92. k,2,25.32,-3.80
93. k,3,29.5,-7.94
94. k,4,38.71,-69.24
95. k,5,37.84,-88.46
96. k,6,18.57,-167.07
97. k,7,17.7,-186.28
98. k,8,24.03,-228.37
99. k,9,28.95,-232.61
100. k,10,104.77,-232.61
101. k,11,109.66,-238.37
102. k,12,103.78,-260.84
103. k,13,79.65,-326.86
104. k,14,74.68,-333.06
105. k,15,39.13,-355.78
106. k,16,33.77,-363.28
107. k,17,26.69,-392.18
108. k,18,23.21,-426.49
109. k,19,28.78,-571.21
110. k,20,24.78,-576.3
111. k,21,0,-580
112. k,22,0,0,375
113.
114. l,1,2
115.
116. larc,2,3,1,8
117. l,3,4
118. larc,4,5,1,40
119. l,5,6
120. larc,6,7,8,40
121. l,7,8
122. larc,8,9,1,8
123. l,9,10
124. larc,10,11,8,12
125. larc,11,12,1,45
126. l,12,13
127. larc,13,14,8,12
128. l,14,15
129. larc,15,16,13,16
130. l,16,17
131. larc,17,18,13,100
132. l,18,19
133. larc,19,20,1,10
134. l,20,21
135. l,1,22
136.
137. adrag,1,2,3,4,5,6,21
138. adrag,7,8,9,10,11,12,21
139. adrag,13,14,15,16,17,18,21
140. adrag,19,20,,,,,21
141. !-----
142. !! Anlegen von n-Materialsektionen
143. !-----
144. *do,Par_i,1,n
145. mp,ex,Par_i,dmtable((100/n)*(Par_i-1),1)
146. mp,prxy,Par_i,dmtable((100/n)*(Par_i-1),2)
147. mp,dens,Par_i,dmtable((100/n)*Par_i,4)
148. *enddo
149.
150. *do,Par_i,1,n
151. sectype,Par_i,shell,,Par_i
152. secdata,dmtable((100/n)*(Par_i-1),3),Par_i,0,3
153. secoffset,bot
154. *enddo
155. !-----
156. !! Vernetzung des Modells
157. !-----
158. esize,15
159. amesh,all
160. !-----
161. !! Zuweisung von Schichtdicken und
162. !! Materialkennwerten
163. !-----
164. esel,s,elem,,1,49,2
165. emodif,all,secnum,Par_1
166. allsel
167. esel,s,elem,,2,50,2
168. emodif,all,secnum,Par_2
169. allsel
170. esel,s,elem,,51,75,
171. emodif,all,secnum,Par_3
172. allsel
173. esel,s,elem,,76,196,5
174. emodif,all,secnum,Par_4
175. allsel
176. esel,s,elem,,77,197,5
177. emodif,all,secnum,Par_5
178. allsel
179. esel,s,elem,,78,198,5
180. emodif,all,secnum,Par_6

```

181. allsel
182. esel,s,elem,,79,199,5
183. emodif,all,secnum,Par_7
184. allsel
185. esel,s,elem,,80,200,5
186. emodif,all,secnum,Par_8
187. allsel
188. esel,s,elem,,201,249,2
189. emodif,all,secnum,Par_9
190. allsel
191. esel,s,elem,,202,250,2
192. emodif,all,secnum,Par_10
193. allsel
194. esel,s,elem,,251,395,6
195. emodif,all,secnum,Par_11
196. allsel
197. esel,s,elem,,252,396,6
198. emodif,all,secnum,Par_12
199. allsel
200. esel,s,elem,,253,397,6
201. emodif,all,secnum,Par_13
202. allsel
203. esel,s,elem,,254,398,6
204. emodif,all,secnum,Par_14
205. allsel
206. esel,s,elem,,255,399,6
207. emodif,all,secnum,Par_15
208. allsel
209. esel,s,elem,,256,400,6
210. emodif,all,secnum,Par_16
211. allsel
212. esel,s,elem,,401,449,2
213. emodif,all,secnum,Par_17
214. allsel
215. esel,s,elem,,402,450,2
216. emodif,all,secnum,Par_18
217. allsel
218. esel,s,elem,,451,523,3
219. emodif,all,secnum,Par_19
220. allsel
221. esel,s,elem,,452,524,3
222. emodif,all,secnum,Par_20
223. allsel
224. esel,s,elem,,453,525,3
225. emodif,all,secnum,Par_21
226. allsel
227. esel,s,elem,,526,550,
228. emodif,all,secnum,Par_22
229. allsel
230. esel,s,elem,,551,695,6
231. emodif,all,secnum,Par_23
232. allsel
233. esel,s,elem,,552,696,6
234. emodif,all,secnum,Par_24
235. allsel
236. esel,s,elem,,553,697,6
237. emodif,all,secnum,Par_25
238. allsel
239. esel,s,elem,,554,698,6
240. emodif,all,secnum,Par_26
241. allsel
242. esel,s,elem,,555,699,6
243. emodif,all,secnum,Par_27
244. allsel
245. esel,s,elem,,556,700,6
246. emodif,all,secnum,Par_28
247. allsel
248. esel,s,elem,,701,725
249. emodif,all,secnum,Par_29
250. allsel
251. esel,s,elem,,726,774,2
252. emodif,all,secnum,Par_30
253. allsel
254. esel,s,elem,,727,775,2
255. emodif,all,secnum,Par_31
256. allsel
257. esel,s,elem,,776,896,5
258. emodif,all,secnum,Par_32
259. allsel
260. esel,s,elem,,777,897,5
261. emodif,all,secnum,Par_33
262. allsel
263. esel,s,elem,,778,898,5
264. emodif,all,secnum,Par_34
265. allsel
266. esel,s,elem,,779,899,5
267. emodif,all,secnum,Par_35
268. allsel
269. esel,s,elem,,780,900,5
270. emodif,all,secnum,Par_36
271. allsel
272. esel,s,elem,,901,925,
273. emodif,all,secnum,Par_37
274. allsel

275. esel,s,elem,,926,998,3
276. emodif,all,secnum,Par_38
277. allsel
278. esel,s,elem,,927,999,3
279. emodif,all,secnum,Par_39
280. allsel
281. esel,s,elem,,928,1000,3
282. emodif,all,secnum,Par_40
283. allsel
284. esel,s,elem,,1001,1025,1
285. emodif,all,secnum,Par_41
286. allsel
287. esel,s,elem,,1026,1074,2
288. emodif,all,secnum,Par_42
289. allsel
290. esel,s,elem,,1027,1075,2
291. emodif,all,secnum,Par_43
292. allsel
293. esel,s,elem,,1076,1148,3
294. emodif,all,secnum,Par_44
295. allsel
296. esel,s,elem,,1077,1149,3
297. emodif,all,secnum,Par_45
298. allsel
299. esel,s,elem,,1078,1150,3
300. emodif,all,secnum,Par_46
301. allsel
302. esel,s,elem,,1151,1391,10
303. emodif,all,secnum,Par_47
304. allsel
305. esel,s,elem,,1152,1392,10
306. emodif,all,secnum,Par_48
307. allsel
308. esel,s,elem,,1153,1393,10
309. emodif,all,secnum,Par_49
310. allsel
311. esel,s,elem,,1154,1394,10
312. emodif,all,secnum,Par_50
313. allsel
314. esel,s,elem,,1155,1395,10
315. emodif,all,secnum,Par_35
316. allsel
317. esel,s,elem,,1156,1396,10
318. emodif,all,secnum,Par_52
319. allsel
320. esel,s,elem,,1157,1397,10
321. emodif,all,secnum,Par_53
322. allsel
323. esel,s,elem,,1158,1398,10
324. emodif,all,secnum,Par_54
325. allsel
326. esel,s,elem,,1159,1399,10
327. emodif,all,secnum,Par_55
328. allsel
329. esel,s,elem,,1160,1400,10
330. emodif,all,secnum,Par_56
331. allsel
332. esel,s,elem,,1401,1425
333. emodif,all,secnum,Par_57
334. allsel
335. esel,s,elem,,1426,1474,2
336. emodif,all,secnum,Par_58
337. allsel
338. esel,s,elem,,1427,1475,2
339. emodif,all,secnum,Par_59
340. allsel
341.
342. nummrg,node
343. !-----
344. !! Festlegen der Lagerungen
345. !-----
346. dl,23,,uy
347. dl,23,,ux
348. dl,23,,uz
349. dl,65,,ux
350. dl,65,,uy
351. dl,65,,uz
352. !-----
353. !! Lastaufbringung
354. !-----
355. nsel,s,node,,627
356. nsel,a,node,,657
357. nsel,a,node,,708,731
358.
359. f,all,fy,-9.5
360. f,all,fx,-3.4
361. allsel
362. !-----
363. !! Übertragung der Randbedingungen
364. !! von Geometrie auf Knoten
365. !-----
366. sbctran
367. allsel
368.

369. !-----
370. !! Lösen des angelegten FE-Modells
371. !-----
372. /solu
373. solve
374. !-----
375. !! Postprocessing
376. !-----
377. /post1
378. allsel
379. !-----
380. !! Sortieren der einzelnen
381. !! Knotenverschiebungen nach Größe
382. !-----
383. ETABLE,ux,U,x
384. Esort,etab,ux
385. *get,ux_max,sort,,min
386. !-----
387. !! Herauslesen der maximalen
388. !! Mises-Vergleichsspannung
389. !-----
390. esel,s,elem,,1,49,2
391. ETABLE,mises,s,eqv
392. nsort,s,eqv
393. *get,mi_ma_1,sort,,max
394.
395. esel,s,elem,,2,50,2
396. ETABLE,mises,s,eqv
397. nsort,s,eqv
398. *get,mi_ma_2,sort,,max
399.
400. esel,s,elem,,51,75,
401. ETABLE,mises,s,eqv
402. nsort,s,eqv
403. *get,mi_ma_3,sort,,max
404.
405. esel,s,elem,,76,196,5
406. ETABLE,mises,s,eqv
407. nsort,s,eqv
408. *get,mi_ma_4,sort,,max
409.
410. esel,s,elem,,77,197,5
411. ETABLE,mises,s,eqv
412. nsort,s,eqv
413. *get,mi_ma_5,sort,,max
414.
415. esel,s,elem,,78,198,5
416. ETABLE,mises,s,eqv
417. nsort,s,eqv
418. *get,mi_ma_6,sort,,max
419.
420. esel,s,elem,,79,199,5
421. ETABLE,mises,s,eqv
422. nsort,s,eqv
423. *get,mi_ma_7,sort,,max
424.
425. esel,s,elem,,80,200,5
426. ETABLE,mises,s,eqv
427. nsort,s,eqv
428. *get,mi_ma_8,sort,,max
429.
430. esel,s,elem,,201,249,2
431. ETABLE,mises,s,eqv
432. nsort,s,eqv
433. *get,mi_ma_9,sort,,max
434.
435. esel,s,elem,,202,250,2
436. ETABLE,mises,s,eqv
437. nsort,s,eqv
438. *get,mi_ma_10,sort,,max
439.
440. esel,s,elem,,251,395,6
441. ETABLE,mises,s,eqv
442. nsort,s,eqv
443. *get,mi_ma_11,sort,,max
444.
445. esel,s,elem,,252,396,6
446. ETABLE,mises,s,eqv
447. nsort,s,eqv
448. *get,mi_ma_12,sort,,max
449.
450. esel,s,elem,,253,397,6
451. ETABLE,mises,s,eqv
452. nsort,s,eqv
453. *get,mi_ma_13,sort,,max
454.
455. esel,s,elem,,254,398,6
456. ETABLE,mises,s,eqv
457. nsort,s,eqv
458. *get,mi_ma_14,sort,,max
459.
460. esel,s,elem,,255,399,6
461. ETABLE,mises,s,eqv
462. nsort,s,eqv

- 463. *get,mi_ma_15,sort,,max
- 464.
- 465. esel,s,elem,,256,400,6
- 466. ETABLE,mises,s,eqv
- 467. nsort,s,eqv
- 468. *get,mi_ma_16,sort,,max
- 469.
- 470. esel,s,elem,,401,449,2
- 471. ETABLE,mises,s,eqv
- 472. nsort,s,eqv
- 473. *get,mi_ma_17,sort,,max
- 474.
- 475. esel,s,elem,,402,450,2
- 476. ETABLE,mises,s,eqv
- 477. nsort,s,eqv
- 478. *get,mi_ma_18,sort,,max
- 479.
- 480. esel,s,elem,,451,523,3
- 481. ETABLE,mises,s,eqv
- 482. nsort,s,eqv
- 483. *get,mi_ma_19,sort,,max
- 484.
- 485. esel,s,elem,,452,524,3
- 486. ETABLE,mises,s,eqv
- 487. nsort,s,eqv
- 488. *get,mi_ma_20,sort,,max
- 489.
- 490. esel,s,elem,,453,525,3
- 491. ETABLE,mises,s,eqv
- 492. nsort,s,eqv
- 493. *get,mi_ma_21,sort,,max
- 494.
- 495. esel,s,elem,,526,550,
- 496. ETABLE,mises,s,eqv
- 497. nsort,s,eqv
- 498. *get,mi_ma_22,sort,,max
- 499.
- 500. esel,s,elem,,551,695,6
- 501. ETABLE,mises,s,eqv
- 502. nsort,s,eqv
- 503. *get,mi_ma_23,sort,,max
- 504.
- 505. esel,s,elem,,552,696,6
- 506. ETABLE,mises,s,eqv
- 507. nsort,s,eqv
- 508. *get,mi_ma_24,sort,,max
- 509.
- 510. esel,s,elem,,553,697,6
- 511. ETABLE,mises,s,eqv
- 512. nsort,s,eqv
- 513. *get,mi_ma_25,sort,,max
- 514. allsel
- 515.
- 516. esel,s,elem,,554,698,6
- 517. ETABLE,mises,s,eqv
- 518. nsort,s,eqv
- 519. *get,mi_ma_26,sort,,max
- 520.
- 521. esel,s,elem,,555,699,6
- 522. ETABLE,mises,s,eqv
- 523. nsort,s,eqv
- 524. *get,mi_ma_27,sort,,max
- 525.
- 526. esel,s,elem,,556,700,6
- 527. ETABLE,mises,s,eqv
- 528. nsort,s,eqv
- 529. *get,mi_ma_28,sort,,max
- 530.
- 531. esel,s,elem,,701,725
- 532. ETABLE,mises,s,eqv
- 533. nsort,s,eqv
- 534. *get,mi_ma_29,sort,,max
- 535.
- 536. esel,s,elem,,726,774,2
- 537. ETABLE,mises,s,eqv
- 538. nsort,s,eqv
- 539. *get,mi_ma_30,sort,,max
- 540.
- 541. esel,s,elem,,727,775,2
- 542. ETABLE,mises,s,eqv
- 543. nsort,s,eqv
- 544. *get,mi_ma_31,sort,,max
- 545.
- 546. esel,s,elem,,776,896,5
- 547. ETABLE,mises,s,eqv
- 548. nsort,s,eqv
- 549. *get,mi_ma_32,sort,,max
- 550.
- 551. esel,s,elem,,777,897,5
- 552. ETABLE,mises,s,eqv
- 553. nsort,s,eqv
- 554. *get,mi_ma_33,sort,,max
- 555.
- 556. esel,s,elem,,778,898,5

557. ETABLE,mises,s,eqv
558. nsort,s,eqv
559. *get,mi_ma_34,sort,,max
560.
561. esel,s,elem,,779,899,5
562. ETABLE,mises,s,eqv
563. nsort,s,eqv
564. *get,mi_ma_35,sort,,max
565.
566. esel,s,elem,,780,900,5
567. ETABLE,mises,s,eqv
568. nsort,s,eqv
569. *get,mi_ma_36,sort,,max
570.
571. esel,s,elem,,901,925,
572. ETABLE,mises,s,eqv
573. nsort,s,eqv
574. *get,mi_ma_37,sort,,max
575.
576. esel,s,elem,,926,998,3
577. ETABLE,mises,s,eqv
578. nsort,s,eqv
579. *get,mi_ma_38,sort,,max
580.
581. esel,s,elem,,927,999,3
582. ETABLE,mises,s,eqv
583. nsort,s,eqv
584. *get,mi_ma_39,sort,,max
585.
586. esel,s,elem,,928,1000,3
587. ETABLE,mises,s,eqv
588. nsort,s,eqv
589. *get,mi_ma_40,sort,,max
590.
591. esel,s,elem,,1001,1025,1
592. ETABLE,mises,s,eqv
593. nsort,s,eqv
594. *get,mi_ma_41,sort,,max
595.
596. esel,s,elem,,1026,1074,2
597. ETABLE,mises,s,eqv
598. nsort,s,eqv
599. *get,mi_ma_42,sort,,max
600.
601. esel,s,elem,,1027,1075,2
602. ETABLE,mises,s,eqv
603. nsort,s,eqv
604. *get,mi_ma_43,sort,,max
605.
606. esel,s,elem,,1076,1148,3
607. ETABLE,mises,s,eqv
608. nsort,s,eqv
609. *get,mi_ma_44,sort,,max
610.
611. esel,s,elem,,1077,1149,3
612. ETABLE,mises,s,eqv
613. nsort,s,eqv
614. *get,mi_ma_45,sort,,max
615.
616. esel,s,elem,,1078,1150,3
617. ETABLE,mises,s,eqv
618. nsort,s,eqv
619. *get,mi_ma_46,sort,,max
620.
621. esel,s,elem,,1151,1391,10
622. ETABLE,mises,s,eqv
623. nsort,s,eqv
624. *get,mi_ma_47,sort,,max
625.
626. esel,s,elem,,1152,1392,10
627. ETABLE,mises,s,eqv
628. nsort,s,eqv
629. *get,mi_ma_48,sort,,max
630.
631. esel,s,elem,,1153,1393,10
632. ETABLE,mises,s,eqv
633. nsort,s,eqv
634. *get,mi_ma_49,sort,,max
635.
636. esel,s,elem,,1154,1394,10
637. ETABLE,mises,s,eqv
638. nsort,s,eqv
639. *get,mi_ma_50,sort,,max
640.
641. esel,s,elem,,1155,1395,10
642. ETABLE,mises,s,eqv
643. nsort,s,eqv
644. *get,mi_ma_51,sort,,max
645.
646. esel,s,elem,,1156,1396,10
647. ETABLE,mises,s,eqv
648. nsort,s,eqv
649. *get,mi_ma_52,sort,,max
650.

651. esel,s,elem,,1157,1397,10
652. ETABLE,mises,s,eqv
653. nsort,s,eqv
654. *get,mi_ma_53,sort,,max
655.
656. esel,s,elem,,1158,1398,10
657. ETABLE,mises,s,eqv
658. nsort,s,eqv
659. *get,mi_ma_54,sort,,max
660.
661. esel,s,elem,,1159,1399,10
662. ETABLE,mises,s,eqv
663. nsort,s,eqv
664. *get,mi_ma_55,sort,,max
665.
666. esel,s,elem,,1160,1400,10
667. ETABLE,mises,s,eqv
668. nsort,s,eqv
669. *get,mi_ma_56,sort,,max
670.
671. esel,s,elem,,1401,1425
672. ETABLE,mises,s,eqv
673. nsort,s,eqv
674. *get,mi_ma_57,sort,,max
675.
676. esel,s,elem,,1426,1474,2
677. ETABLE,mises,s,eqv
678. nsort,s,eqv
679. *get,mi_ma_58,sort,,max
680.
681. esel,s,elem,,1427,1475,2
682. ETABLE,mises,s,eqv
683. nsort,s,eqv
684. *get,mi_ma_59,sort,,max
685.
686. *set,spa_1,(mi_ma_1)/((dmtable(Par_1,4))*0.99)
687. *set,spa_2,(mi_ma_2)/((dmtable(Par_2,4))*0.99)
688. *set,spa_3,(mi_ma_3)/((dmtable(Par_3,4))*0.99)
689. *set,spa_4,(mi_ma_4)/((dmtable(Par_4,4))*0.99)
690. *set,spa_5,(mi_ma_5)/((dmtable(Par_5,4))*0.99)
691. *set,spa_6,(mi_ma_6)/((dmtable(Par_6,4))*0.99)
692. *set,spa_7,(mi_ma_7)/((dmtable(Par_7,4))*0.99)
693. *set,spa_8,(mi_ma_8)/((dmtable(Par_8,4))*0.99)
694. *set,spa_9,(mi_ma_9)/((dmtable(Par_9,4))*0.99)
695. *set,spa_10,(mi_ma_10)/((dmtable(Par_10,4))*0.99)
696. *set,spa_11,(mi_ma_11)/((dmtable(Par_11,4))*0.99)
697. *set,spa_12,(mi_ma_12)/((dmtable(Par_12,4))*0.99)
698. *set,spa_13,(mi_ma_13)/((dmtable(Par_13,4))*0.99)

699. *set,spa_14,(mi_ma_14)/((dmtable(Par_14,4))*0.99)
700. *set,spa_15,(mi_ma_15)/((dmtable(Par_15,4))*0.99)
701. *set,spa_16,(mi_ma_16)/((dmtable(Par_16,4))*0.99)
702. *set,spa_17,(mi_ma_17)/((dmtable(Par_17,4))*0.99)
703. *set,spa_18,(mi_ma_18)/((dmtable(Par_18,4))*0.99)
704. *set,spa_19,(mi_ma_19)/((dmtable(Par_19,4))*0.99)
705. *set,spa_20,(mi_ma_20)/((dmtable(Par_20,4))*0.99)
706. *set,spa_21,(mi_ma_21)/((dmtable(Par_21,4))*0.99)
707. *set,spa_22,(mi_ma_22)/((dmtable(Par_22,4))*0.99)
708. *set,spa_23,(mi_ma_23)/((dmtable(Par_23,4))*0.99)
709. *set,spa_24,(mi_ma_24)/((dmtable(Par_24,4))*0.99)
710. *set,spa_25,(mi_ma_25)/((dmtable(Par_25,4))*0.99)
711. *set,spa_26,(mi_ma_26)/((dmtable(Par_26,4))*0.99)
712. *set,spa_27,(mi_ma_27)/((dmtable(Par_27,4))*0.99)
713. *set,spa_28,(mi_ma_28)/((dmtable(Par_28,4))*0.99)
714. *set,spa_29,(mi_ma_29)/((dmtable(Par_29,4))*0.99)
715. *set,spa_30,(mi_ma_30)/((dmtable(Par_30,4))*0.99)
716. *set,spa_31,(mi_ma_31)/((dmtable(Par_31,4))*0.99)
717. *set,spa_32,(mi_ma_32)/((dmtable(Par_32,4))*0.99)
718. *set,spa_33,(mi_ma_33)/((dmtable(Par_33,4))*0.99)
719. *set,spa_34,(mi_ma_34)/((dmtable(Par_34,4))*0.99)
720. *set,spa_35,(mi_ma_35)/((dmtable(Par_35,4))*0.99)
721. *set,spa_36,(mi_ma_36)/((dmtable(Par_36,4))*0.99)
722. *set,spa_37,(mi_ma_37)/((dmtable(Par_37,4))*0.99)
723. *set,spa_38,(mi_ma_38)/((dmtable(Par_38,4))*0.99)
724. *set,spa_39,(mi_ma_39)/((dmtable(Par_39,4))*0.99)
725. *set,spa_40,(mi_ma_40)/((dmtable(Par_40,4))*0.99)
726. *set,spa_41,(mi_ma_41)/((dmtable(Par_41,4))*0.99)
727. *set,spa_42,(mi_ma_42)/((dmtable(Par_42,4))*0.99)
728. *set,spa_43,(mi_ma_43)/((dmtable(Par_43,4))*0.99)
729. *set,spa_44,(mi_ma_44)/((dmtable(Par_44,4))*0.99)
730. *set,spa_45,(mi_ma_45)/((dmtable(Par_45,4))*0.99)
731. *set,spa_46,(mi_ma_46)/((dmtable(Par_46,4))*0.99)
732. *set,spa_47,(mi_ma_47)/((dmtable(Par_47,4))*0.99)
733. *set,spa_48,(mi_ma_48)/((dmtable(Par_48,4))*0.99)
734. *set,spa_49,(mi_ma_49)/((dmtable(Par_49,4))*0.99)
735. *set,spa_50,(mi_ma_50)/((dmtable(Par_50,4))*0.99)
736. *set,spa_51,(mi_ma_51)/((dmtable(Par_51,4))*0.99)
737. *set,spa_52,(mi_ma_52)/((dmtable(Par_52,4))*0.99)
738. *set,spa_53,(mi_ma_53)/((dmtable(Par_53,4))*0.99)
739. *set,spa_54,(mi_ma_54)/((dmtable(Par_54,4))*0.99)
740. *set,spa_55,(mi_ma_55)/((dmtable(Par_55,4))*0.99)
741. *set,spa_56,(mi_ma_56)/((dmtable(Par_56,4))*0.99)
742. *set,spa_57,(mi_ma_57)/((dmtable(Par_57,4))*0.99)
743. *set,spa_58,(mi_ma_58)/((dmtable(Par_58,4))*0.99)
744. *set,spa_59,(mi_ma_59)/((dmtable(Par_59,4))*0.99)

```

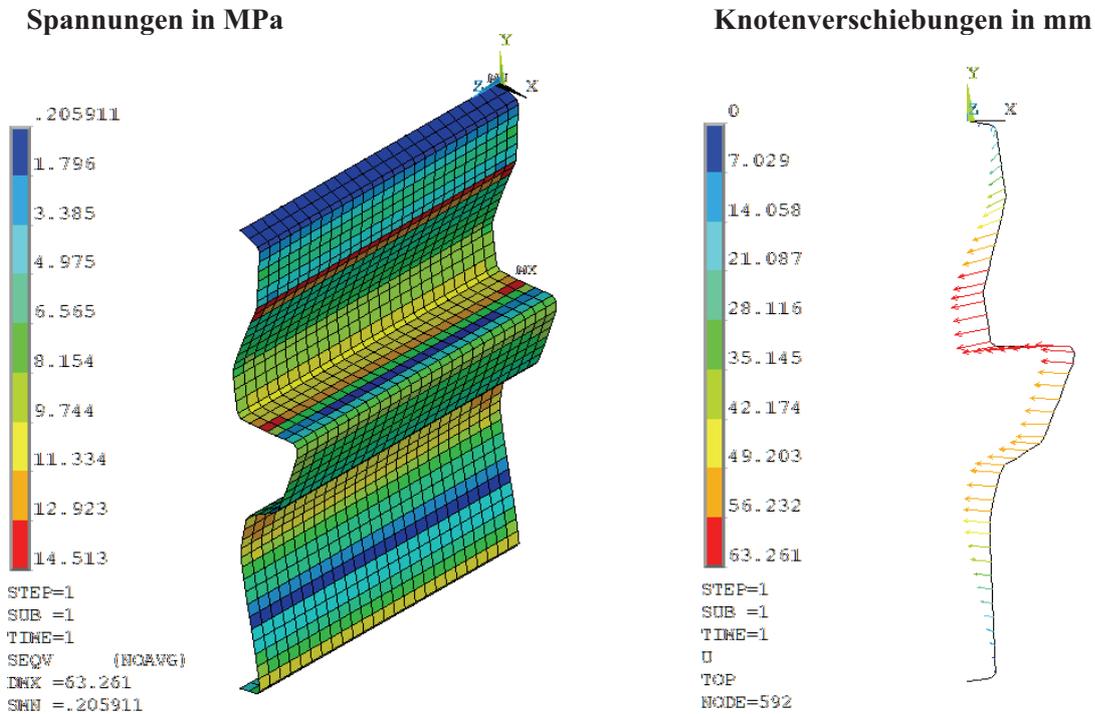
745. !-----
746. !! Herauslesen der betragsmäßig
747. !! größten Verschiebung
748. !-----
749. *set,ux,ux_max*(-1)
750.
751. etable,evol,volu
752. ssum
753. *get,vtot,ssum,,item,evol
754. *set,mass,vtot*1.5e-9
755.
756. finish
757. !-----
758. !! Ende der Optimierungsschleife
759. !-----
760. *end
761. !=====
762. !3. Start der Optimierung
763. !=====
764. *use,Optimierung
765. allsel
766. /opt
767. opanl,Optimierung
768. !-----
769. !! Festlegung des zulässigen Werte-
770. !! bereiches für die Designvariablen
771. !-----
772. opvar,Par_1,DV,1,100,0.01
773. opvar,Par_2,DV,1,100,0.01
774. opvar,Par_3,DV,1,100,0.01
775. opvar,Par_4,DV,1,100,0.01
776. opvar,Par_5,DV,1,100,0.01
777. opvar,Par_6,DV,1,100,0.01
778. opvar,Par_7,DV,1,100,0.01
779. opvar,Par_8,DV,1,100,0.01
780. opvar,Par_9,DV,1,100,0.01
781. opvar,Par_10,DV,1,100,0.01
782. opvar,Par_11,DV,1,100,0.01
783. opvar,Par_12,DV,1,100,0.01
784. opvar,Par_13,DV,1,100,0.01
785. opvar,Par_14,DV,1,100,0.01
786. opvar,Par_15,DV,1,100,0.01
787. opvar,Par_16,DV,1,100,0.01
788. opvar,Par_17,DV,1,100,0.01
789. opvar,Par_18,DV,1,100,0.01
790. opvar,Par_19,DV,1,100,0.01
791. opvar,Par_20,DV,1,100,0.01
792. opvar,Par_21,DV,1,100,0.01
793. opvar,Par_22,DV,1,100,0.01
794. opvar,Par_23,DV,1,100,0.01
795. opvar,Par_24,DV,1,100,0.01
796. opvar,Par_25,DV,1,100,0.01
797. opvar,Par_26,DV,1,100,0.01
798. opvar,Par_27,DV,1,100,0.01
799. opvar,Par_28,DV,1,100,0.01
800. opvar,Par_29,DV,1,100,0.01
801. opvar,Par_30,DV,1,100,0.01
802. opvar,Par_31,DV,1,100,0.01
803. opvar,Par_32,DV,1,100,0.01
804. opvar,Par_33,DV,1,100,0.01
805. opvar,Par_34,DV,1,100,0.01
806. opvar,Par_35,DV,1,100,0.01
807. opvar,Par_36,DV,1,100,0.01
808. opvar,Par_37,DV,1,100,0.01
809. opvar,Par_38,DV,1,100,0.01
810. opvar,Par_39,DV,1,100,0.01
811. opvar,Par_40,DV,1,100,0.01
812. opvar,Par_41,DV,1,100,0.01
813. opvar,Par_42,DV,1,100,0.01
814. opvar,Par_43,DV,1,100,0.01
815. opvar,Par_44,DV,1,100,0.01
816. opvar,Par_45,DV,1,100,0.01
817. opvar,Par_46,DV,1,100,0.01
818. opvar,Par_47,DV,1,100,0.01
819. opvar,Par_48,DV,1,100,0.01
820. opvar,Par_49,DV,1,100,0.01
821. opvar,Par_50,DV,1,100,0.01
822. opvar,Par_51,DV,1,100,0.01
823. opvar,Par_52,DV,1,100,0.01
824. opvar,Par_53,DV,1,100,0.01
825. opvar,Par_54,DV,1,100,0.01
826. opvar,Par_55,DV,1,100,0.01
827. opvar,Par_56,DV,1,100,0.01
828. opvar,Par_57,DV,1,100,0.01
829. opvar,Par_58,DV,1,100,0.01
830. opvar,Par_59,DV,1,100,0.01
831. !-----
832. !! Zuweisung neuer Grenzwerte
833. !! für die Zustandsvariablen
834. !-----
835. opvar,spa_1,SV,0,1,0.01
836. opvar,spa_2,SV,0,1,0.01
837. opvar,spa_3,SV,0,1,0.01
838. opvar,spa_4,SV,0,1,0.01

```

```
839. opvar,spa_5,SV,0,1,0.01
840. opvar,spa_6,SV,0,1,0.01
841. opvar,spa_7,SV,0,1,0.01
842. opvar,spa_8,SV,0,1,0.01
843. opvar,spa_9,SV,0,1,0.01
844. opvar,spa_10,SV,0,1,0.01
845. opvar,spa_11,SV,0,1,0.01
846. opvar,spa_12,SV,0,1,0.01
847. opvar,spa_13,SV,0,1,0.01
848. opvar,spa_14,SV,0,1,0.01
849. opvar,spa_15,SV,0,1,0.01
850. opvar,spa_16,SV,0,1,0.01
851. opvar,spa_17,SV,0,1,0.01
852. opvar,spa_18,SV,0,1,0.01
853. opvar,spa_19,SV,0,1,0.01
854. opvar,spa_20,SV,0,1,0.01
855. opvar,spa_21,SV,0,1,0.01
856. opvar,spa_22,SV,0,1,0.01
857. opvar,spa_23,SV,0,1,0.01
858. opvar,spa_24,SV,0,1,0.01
859. opvar,spa_25,SV,0,1,0.01
860. opvar,spa_26,SV,0,1,0.01
861. opvar,spa_27,SV,0,1,0.01
862. opvar,spa_28,SV,0,1,0.01
863. opvar,spa_29,SV,0,1,0.01
864. opvar,spa_30,SV,0,1,0.01
865. opvar,spa_31,SV,0,1,0.01
866. opvar,spa_32,SV,0,1,0.01
867. opvar,spa_33,SV,0,1,0.01
868. opvar,spa_34,SV,0,1,0.01
869. opvar,spa_35,SV,0,1,0.01
870. opvar,spa_36,SV,0,1,0.01
871. opvar,spa_37,SV,0,1,0.01
872. opvar,spa_38,SV,0,1,0.01
873. opvar,spa_39,SV,0,1,0.01
874. opvar,spa_40,SV,0,1,0.01
875. opvar,spa_41,SV,0,1,0.01
876. opvar,spa_42,SV,0,1,0.01
877. opvar,spa_43,SV,0,1,0.01
878. opvar,spa_44,SV,0,1,0.01
879. opvar,spa_45,SV,0,1,0.01
880. opvar,spa_46,SV,0,1,0.01
881. opvar,spa_47,SV,0,1,0.01
882. opvar,spa_48,SV,0,1,0.01
883. opvar,spa_49,SV,0,1,0.01
884. opvar,spa_50,SV,0,1,0.01
885. opvar,spa_51,SV,0,1,0.01
886. opvar,spa_52,SV,0,1,0.01
887. opvar,spa_53,SV,0,1,0.01
888. opvar,spa_54,SV,0,1,0.01
889. opvar,spa_55,SV,0,1,0.01
890. opvar,spa_56,SV,0,1,0.01
891. opvar,spa_57,SV,0,1,0.01
892. opvar,spa_58,SV,0,1,0.01
893. opvar,spa_59,SV,0,1,0.01
894. !-----
895. !! Speicherung des besten Designs
896. OPKEEP,ON
897. !-----
898. !! Definition der Optimierungsfunktion
899. opvar,ux,obj,,0.0001
900. !-----
901. !! Festlegen des Optimierungsalgorithmus
902. OPTYPE,first
903. OPFRST,100,100,1,
904. !-----
905. !! Ausführung der Optimierung
906. OPEXE ! Run optimization
907. !=====
908. !!4. Auflistung aller Optimierungsergebnisse
909. !=====
910. oplist,all
```

10.6 Simulationsergebnisse zur Optimierung der Bauteildickenverteilung

Detaillierte Angaben zu **Tabelle 13**, Ergebnisspalte „Variabel von 1,635 bis 2,835 mm“

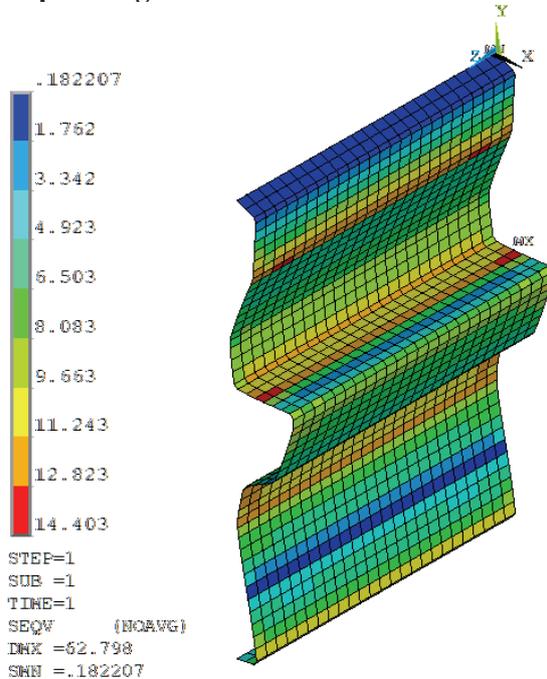


Designvariablen: Startwerte und optimierte Werte

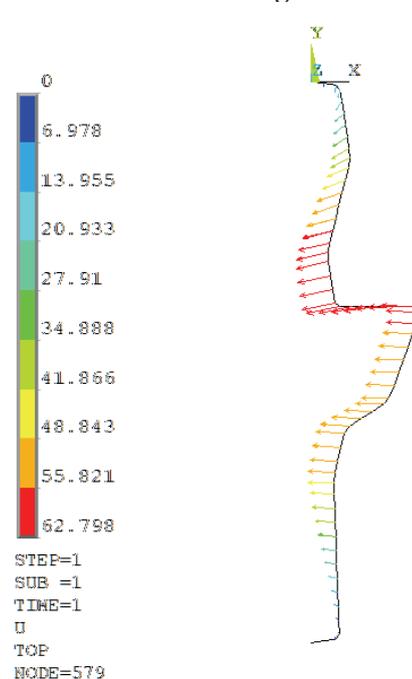
Design-variable	Startwert	Wert optimiert	Design-variable	Startwert	Wert optimiert	Design-variable	Startwert	Wert optimiert
PAR_1	10	3	PAR_21	30	91	PAR_41	50	89
PAR_2	20	2	PAR_22	40	91	PAR_42	60	88
PAR_3	30	1	PAR_23	50	91	PAR_43	70	88
PAR_4	40	1	PAR_24	60	89	PAR_44	80	88
PAR_5	50	1	PAR_25	70	78	PAR_45	90	89
PAR_6	60	1	PAR_26	80	93	PAR_46	10	88
PAR_7	70	20	PAR_27	90	95	PAR_47	20	88
PAR_8	80	60	PAR_28	10	78	PAR_48	30	80
PAR_9	90	88	PAR_29	20	91	PAR_49	40	56
PAR_10	10	1	PAR_30	30	93	PAR_50	50	33
PAR_11	20	13	PAR_31	40	93	PAR_51	60	42
PAR_12	30	80	PAR_32	50	93	PAR_52	70	52
PAR_13	40	90	PAR_33	60	93	PAR_53	80	91
PAR_14	50	90	PAR_34	70	93	PAR_54	90	93
PAR_15	60	91	PAR_35	80	93	PAR_55	10	93
PAR_16	70	91	PAR_36	90	94	PAR_56	20	93
PAR_17	80	90	PAR_37	10	78	PAR_57	30	93
PAR_18	90	91	PAR_38	20	57	PAR_58	40	92
PAR_19	10	91	PAR_39	30	33	PAR_59	50	52
PAR_20	20	91	PAR_40	40	88			

Detaillierte Angaben zu **Tabelle 13**, Ergebnisspalte „Einheitlich 1,8 mm“

Spannungen in MPa



Knotenverschiebungen in mm

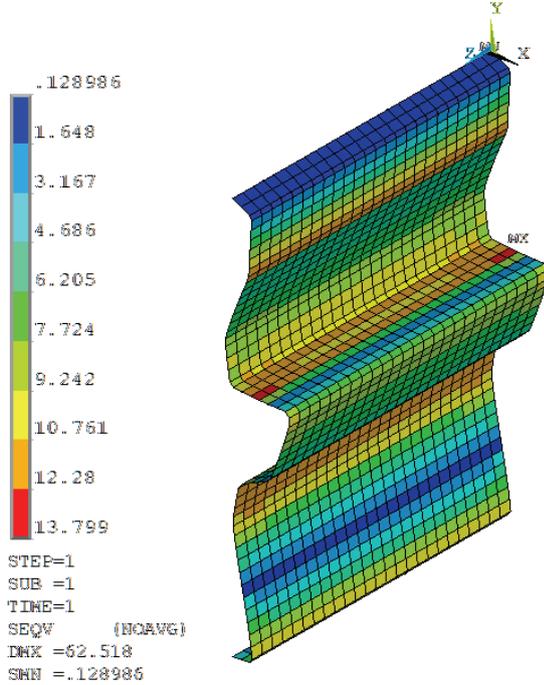


Designvariablen: Startwerte und optimierte Werte

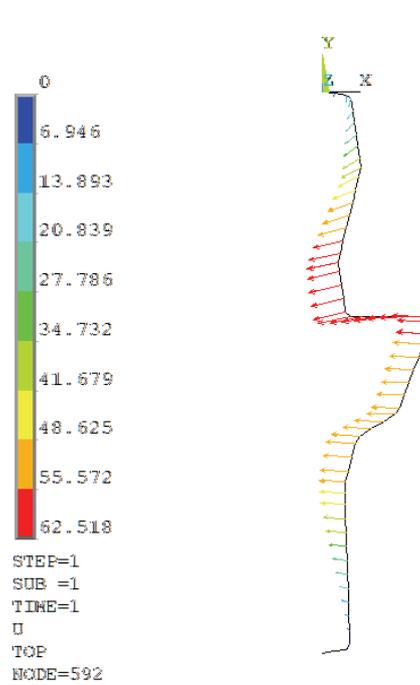
Design-variable	Startwert	Wert optimiert	Design-variable	Startwert	Wert optimiert	Design-variable	Startwert	Wert optimiert
PAR_1	21	1	PAR_21	21	90	PAR_41	21	89
PAR_2	21	2	PAR_22	21	81	PAR_42	21	88
PAR_3	21	2	PAR_23	21	91	PAR_43	21	89
PAR_4	21	1	PAR_24	21	89	PAR_44	21	89
PAR_5	21	3	PAR_25	21	78	PAR_45	21	79
PAR_6	21	1	PAR_26	21	92	PAR_46	21	89
PAR_7	21	1	PAR_27	21	61	PAR_47	21	87
PAR_8	21	1	PAR_28	21	74	PAR_48	21	74
PAR_9	21	2	PAR_29	21	87	PAR_49	21	49
PAR_10	21	4	PAR_30	21	94	PAR_50	21	23
PAR_11	21	58	PAR_31	21	94	PAR_51	21	22
PAR_12	21	84	PAR_32	21	94	PAR_52	21	55
PAR_13	21	91	PAR_33	21	94	PAR_53	21	79
PAR_14	21	91	PAR_34	21	94	PAR_54	21	92
PAR_15	21	90	PAR_35	21	93	PAR_55	21	94
PAR_16	21	86	PAR_36	21	91	PAR_56	21	93
PAR_17	21	90	PAR_37	21	70	PAR_57	21	92
PAR_18	21	90	PAR_38	21	49	PAR_58	21	92
PAR_19	21	91	PAR_39	21	34	PAR_59	21	45
PAR_20	21	90	PAR_40	21	86			

Detaillierte Angaben zu **Tabelle 13**, Ergebnisspalte „Einheitlich 2,235 mm“

Spannungen in MPa



Knotenverschiebungen in mm



Designvariablen: Startwerte und optimierte Werte

Design-variable	Startwert	Wert optimiert	Design-variable	Startwert	Wert optimiert	Design-variable	Startwert	Wert optimiert
PAR_1	50	30	PAR_21	50	91	PAR_41	50	89
PAR_2	50	2	PAR_22	50	90	PAR_42	50	88
PAR_3	50	6	PAR_23	50	89	PAR_43	50	89
PAR_4	50	1	PAR_24	50	89	PAR_44	50	89
PAR_5	50	1	PAR_25	50	82	PAR_45	50	88
PAR_6	50	1	PAR_26	50	93	PAR_46	50	85
PAR_7	50	1	PAR_27	50	87	PAR_47	50	88
PAR_8	50	1	PAR_28	50	90	PAR_48	50	84
PAR_9	50	1	PAR_29	50	92	PAR_49	50	69
PAR_10	50	8	PAR_30	50	93	PAR_50	50	50
PAR_11	50	62	PAR_31	50	93	PAR_51	50	53
PAR_12	50	86	PAR_32	50	94	PAR_52	50	76
PAR_13	50	90	PAR_33	50	94	PAR_53	50	91
PAR_14	50	90	PAR_34	50	93	PAR_54	50	94
PAR_15	50	90	PAR_35	50	94	PAR_55	50	93
PAR_16	50	91	PAR_36	50	94	PAR_56	50	93
PAR_17	50	91	PAR_37	50	86	PAR_57	50	92
PAR_18	50	91	PAR_38	50	73	PAR_58	50	92
PAR_19	50	89	PAR_39	50	50	PAR_59	50	68
PAR_20	50	91	PAR_40	50	77			

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Rinberg
Vorname	Roman
Geburtsdatum	15.04.1976
Geburtsort	Moskau, Russland
Familienstand	verheiratet, 1 Kind
Staatsangehörigkeit	usbekisch

Ausbildung

1983 – 1993	Mittelschule Nr. 13 mit Spezialisierung Deutsch, Tschirtschik, Usbekistan
1993 – 1998	Studium an der Staatlichen Technischen Universität in Taschkent, Usbekistan; Fachrichtung: Werkstoffkunde des Maschinenbaus
Abschluss:	Ingenieur für Mechanik (Diplom)

Beruflicher Werdegang

Feb. 99 – Mai 01	Ingenieur im Labor für Hartlegierungen und Werkzeug bei der wissenschaftlich-technologischen Firma „Mezon-Č“, Usbekistan
Aug. 01 – Feb. 02	Deutschsprachkurs bei DEB Sachsen e. V. in Chemnitz
März 02 – Aug 02	Wissenschaftliche Hilfskraft am Kompetenzzentrum Strukturleichtbau, Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik der TU Chemnitz
Sept. 02 – Okt. 02	Intensiv-Deutschsprachkurs am Herder-Institut der Universität Leipzig
Nov. 02 – Mai 05	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Kompetenzzentrum Strukturleichtbau e. V. der TU Chemnitz
seit Juni 05	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik und später am Institut für Strukturleichtbau der TU Chemnitz