

# AUFBAU UND QUALIFIKATION EINER CHEMISCHEN BEHANDLUNGSMETHODE FÜR FLACHSFASERN

H. Antonowitz, F. Härtel, Prof. Dr. Peter Middendorf

Institut für Flugzeugbau (IFB), Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, Deutschland

## Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Verwendung von Flachsfasergarnen für die Herstellung von Faserverbundwerkstoffen (Endlosfaserverstärkung). Im Mittelpunkt der Untersuchung steht der Einfluss einer Faserbehandlung mit Natronlauge (Mercerisation) auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffes. Es wurden isometrische Behandlungen (schrumpffrei) mit folgenden Parametern durchgeführt: 5%/2min, 5%/10min, 20%/2min, 20%/10min (Konzentration der Natronlauge / Dauer der Behandlung). Die unbehandelten und behandelten Fasern wurden gestickt (bidirektional und unidirektional) und mit Epoxid-Harz infiltriert. Die Infiltration erfolgte mit einem Vakuum-Infusionsverfahren (VARI). Schließlich wurden die mechanischen Kennwerte für Zugbelastung, Druckbelastung und Schubbelastung in der Laminebene der Proben der verschiedenen Behandlungen ermittelt und verglichen. Durch die Behandlungen konnten Steigerungen der Festigkeit und Steifigkeit (Zug und Druck) der Verbunde von ca. 20% und eine Reduzierung der Bruchdehnung um ca. 25% erzielt werden.

## 1. EINFÜHRUNG

Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen für Anwendungen außerhalb der Luft- und Raumfahrttechnik hat in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. So profitieren zum Beispiel Produkte für Fahrzeuge, Sportgeräte oder Bauanwendungen vom Leichtbaupotential, das Faserverbundwerkstoffe durch ihre spezifischen Eigenschaften und neue Gestaltungsmöglichkeiten bieten. Andererseits wächst allgemein das Bestreben nach Energieeinsparung, Nachhaltigkeit und Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Ressourcen. Da konventionelle Faserverbundwerkstoffe derzeit energieaufwendig und unter Einsatz petrochemischer Ausgangsstoffe hergestellt werden, sowie die Verwertung am Ende des Produktlebens problematisch ist, erscheinen Faserverbundwerkstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe als interessante Alternative, die Leichtbau und ökologische Aspekte vereinen könnten. Neben erheblichen Energieeinsparungen und der prinzipiellen Unabhängigkeit vom Erdöl auf Seiten der Naturfasern bieten diese noch eine Reihe weiterer Vorteile. So wird während des Wachstums CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre gebunden und in Verbindung mit einer Biopolymermatrix besteht die Möglichkeit der Kompostierung am Ende des Produktlebens, d.h. ein geschlossener Stoffkreislauf, wobei jedoch eine Degradation während der Nutzung verhindert werden muss. Trotz aller bisher genannten Vorteile beschränkt sich der Einsatz von naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK) heutzutage überwiegend auf niedrig belastete Bauteile in der

Automobilindustrie (Verkleidungen, Hutablage, Reserveradmulde etc.), wobei fast ausschließlich Verfahren mit ungerichteten Kurzfasern (Formpressen, Fließpressen, Spritzgießen) eingesetzt werden [1]. Dabei sind die mechanischen Kennwerte bestimmter Bastfasern (Pflanzenstängelfasern) durchaus mit denen von Glasfasern vergleichbar, insbesondere unter Berücksichtigung der niedrigeren Dichte der Naturfasern (siehe TABELLE 1, Werte aus [2]).

TABELLE 1. Eigenschaften von Naturfasern im Vergleich zu Glasfasern, Werte aus [2]

	Hanf	Flachs	E-Glas
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,48-1,5	1,43-1,52	2,6
Zugfestigkeit [MPa]	500-1000	450-800	1800
E-Modul [MPa]	50000	45000	73000
Bruchdehnung [%]	1-1,6	1,5-4	2-3
spez. Festigkeit [km]	34-68	32-57	70,5

Um jedoch Bauteile aus Naturfasern herzustellen, die auch höheren Belastungen standhalten und so mit glasfaserverstärkten Kunststoffen konkurrieren können, ist es unerlässlich eine Endlosfaserverstärkung einzusetzen. Das setzt jedoch voraus, dass die endlich langen Naturfasern zunächst zu einem Garn versponnen werden, was zu Abweichungen der Faserorientierung von der gewünschten Verstärkungsrichtung führt. Im Gegensatz zu einem konventionellen Spinnfasergarn kann durch die Verwendung von Umwindungsgarn eine bessere Übereinstimmung der Faserorientierung mit der

Garnlängsachse erreicht werden, da hierbei die Einzelfasern durch einen Stützfaden zusammengehalten werden (siehe BILD 1) und so höhere Verbundkennwerte erzielbar sind [3].

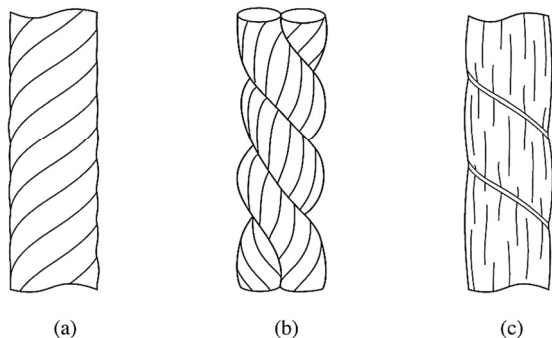


BILD 1. Garnstrukturen (a) Spinnfasergarn, (b) Zwirn, (c) Umwindungsgarn [3]

Allerdings ist auch dieser Garntyp nicht ideal, da durch den Stützfaden wiederum eine Abweichung der Faserrichtung von der Garnlängsachse entstehen kann. Besonders bei feinen Garnen entsteht durch den Stützfaden eine Einschnürung, sodass sich für das Garn eine Spiralförmigkeit ergibt. Neben der notwendigen Garnherstellung weisen Naturfasern einige weitere Nachteile auf, wie z.B. ungenügende Faser-Matrix-Haftung, Wasseraufnahme und eine große Inhomogenität der (mechanischen) Eigenschaften.

## 2. FASERBEHANDLUNG

In der Vergangenheit wurde bereits eine Vielzahl von Untersuchungen zur Behandlung von Naturfasern durchgeführt, die auf die Minimierung der Nachteile von NFK und somit auf eine Steigerung der mechanischen Kennwerte der Fasern oder des Verbundes abzielen, so etwa in [4], [5] und [6]. Im Wesentlichen wurden bisher folgende Ziele verfolgt:

- Reinigung der Faseroberfläche, Entfernung von Begleitsubstanzen
- chemische und/oder physikalische Beeinflussung der Oberfläche
- Reduzierung der Wasseraufnahme
- Erhöhung der Rauigkeit, Vergrößerung der Oberfläche
- Beeinflussung der Faserorientierung

Aus der Fülle der Behandlungsarten wurde im Rahmen einer Literaturrecherche die Behandlung der Fasern mit konzentrierter Lauge, die sogenannte Mercerisation, als vielversprechendstes Verfahren ausgewählt. Die Mercerisation ist seit Beginn des 20. Jahrhunderts eine

weit verbreitete Methode zur Behandlung von Baumwolle. Da neben einem seidenartigen Glanz und einer verbesserten Färbbarkeit auch die Festigkeit positiv beeinflusst wird, ist dieses Verfahren auch für die Herstellung von NFK interessant. Vorteilhafterweise ist durch die verbreitete industrielle Nutzung des Verfahrens für Baumwollgarne eine Verwendung der existierenden Anlagen auch für andere Garne denkbar. Die nachfolgende Beschreibung der ablaufenden Mechanismen orientiert sich an Untersuchungen von I. Van de Weyenberg [7] und J. Gassan [8], die einen detaillierten Einblick in die Thematik ermöglichen. Bei der Mercerisation werden die Fasern mit einer Lauge (z.B. Natriumhydroxid-Lösung) behandelt. Als Parameter stehen die Konzentration der Lauge, die Behandlungszeit, die Temperatur und die Faservorspannung bzw. Schrumpfung zur Verfügung. Eine niedrige Alkalikonzentration (<7%) führt zu einer Steigerung der Kennwerte der Fasern durch neugebildete Wasserstoffbrücken zwischen den Cellulose-Ketten, während bei höheren Konzentrationen Orientierungsänderungen der Fasern zu beobachten sind. Die Effektivität der Behandlung steigt mit abnehmender Temperatur und abnehmendem Schrumpf der Fasern. Während der Behandlung kommt es zu deutlich Änderungen an der Faseroberfläche und der Faserzusammensetzung [8]. Durch die Einwirkung der Lauge kommt es zu einer Gitterumwandlung von natürlicher Cellulose-I zu Cellulose-II. Beim Kontakt der Fasern mit der Lauge tritt sofort eine erhebliche Quellung der Fasern auf, bei der die natürliche Gitterstruktur entspannt wird. Die Parameter der Behandlung beeinflussen den Grad des Quellens und damit auch den Grad der Gitterumwandlung. Das Aufquellen ermöglicht das Eindringen der Natrium-Ionen und die Bildung von Na-Cellulose-I. Dieses Gitter besitzt einen relativ großen Abstand der Cellulose-Ketten untereinander, sodass Wassermoleküle in die Zwischenräume eindringen können. Weiterhin werden die OH-Gruppen der Cellulose umgewandelt in ONa-Gruppen, was die Ausdehnung der Moleküle vergrößert. Anschließendes Spülen mit Wasser entfernt dann die Na-Ionen und ermöglicht so die Umwandlung zur neuen Kristallstruktur, Cellulose-II [7]. Infolge einer isometrischen, d.h. schrumpffreien Behandlung kann eine Verringerung des Faserdurchmessers von bis zu 30% beobachtet werden. Weiterhin kommt es zu einer Zunahme der Poren an der Faseroberfläche durch den Verlust der obersten Faserschicht, da alkalisensitive Verbindungen zerreißen und so die Oberflächenrauigkeit erhöht wird. Der relative Cellulose-Gehalt steigt durch die Auslösung von Begleitsubstanzen wie Lignin und Hemicellulose. Trotz dieser erhöhten Rauigkeit ist bei der Herstellung von Verbunden ein schlechteres Benetzungsverhalten zu beobachten, was sich in niedrigerer Faser-Matrix-Haftung und geringerer Garntränkung äußert. Bei

isometrischer Mercerisation wird die Orientierung der Fasern in Längsrichtung erhöht. Diese Effekte führen bei optimaler Wahl der Behandlungsparameter zu einer Steigerung der statischen Garnfestigkeit und –steifigkeit (nicht des Verbundes) von bis zu 150%, sowie einer Erhöhung der dynamischen Kennwerte infolge der gesteigerten statischen Werte. Die Kennwertabnahme infolge von Feuchtigkeit ist vergleichbar mit der bei unbehandelten Fasern, allerdings auf höherem Niveau. Insgesamt können Verbundkennwertsteigerungen von bis zu 60% erreicht werden. Der Unterschied zwischen Garnkennwertsteigerung und Verbundkennwertsteigerung resultiert in erster Linie aus dem schlechteren Benetzungsverhalten infolge der Behandlung [8].

### 3. EXPERIMENTELLER TEIL

#### 3.1 Materialien

Als Ausgangsmaterial dienen Umwindungsgarne der Firma BIOTEX – COMPOSITE EVOLUTION mit einer Feinheit von 500tex. Bei diesem Garntyp werden die Flachfasern mit einer Länge von bis zu 120mm durch zwei gegenläufige Polypropylen-Garne gestützt, mit je ca. 1 Windung/cm.

Die Natronlauge wurde aus technischem Natriumhydroxid-Pulver und Leitungswasser hergestellt. Die Konzentration der hergestellten Lauge wurde mit einem Aräometer (Spindel) bestimmt und mittels einer Titration überprüft. Es wurden Lösungen mit 5 Gew.-% und 20 Gew.-% hergestellt.

Zur Infiltration wurde ein Infusionsharzsystem der Firma HEXION verwendet mit EPIKOTE Resin MGS RIMR 235 als Basisharz und EPIKURE Curing Agent RIMH 235 als Härter. Der Hersteller gibt als Gewichtsverhältnis (Harz:Härter)  $100:33,5 \pm 2$  an. Bei einer Infiltrationstemperatur von 45°C ergibt sich eine Viskosität von ca. 90mPas und eine Topfzeit von 3-4 Stunden.

#### 3.2 Faserbehandlungen

Die Faserbehandlungen wurden auf Garnträgern aus Polypropylen-Rohren (PP-HT) durchgeführt. Das Garn wurde mit Hilfe einer Umspulanlage von den Herstellerspulen auf die Garnträger gespult, sodass eine einschichtige Ablage und eine definierte Vorspannkraft von ca. 2,5N sichergestellt werden konnte. Die Behandlung erfolgte in großen Polypropylen-Kisten, sodass die Garnträger während des Eintauchens komplett von Lauge umgeben waren.

Es wurden isometrische Behandlungen (schrumpffrei) mit folgenden Parametern durchgeführt: 5%/2min,

5%/10min, 20%/2min, 20%/10min (Konzentration der Natronlauge / Dauer der Behandlung). Im Anschluss an das Laugenbad wurden die Garnträger sofort mit Wasser gespült, mit Salzsäure der Konzentration 1 Gew.-% neutralisiert und nochmals mit Wasser gespült. Die Trocknung erfolgte auf den Garnträgern an der Umgebungsluft. Anschließend wurde das Garn von den Garnträgern auf Spulen für die Stickmaschine umgespult.

#### 3.3 Probenherstellung

Die behandelten und unbehandelten Garne wurden mit einer Mehrkopfstickmaschine der Firma TAJIMA auf ein feines Glasgewebe als Trägermaterial gestickt. Dazu wurden mittels eines Zick-Zack-Stiches jeweils zwei Lagen übereinander gestickt, die dann später zusammengefaltet mit den Glaslagen nach außen das Halbzeug bildeten. Die bidirektionalen Gesticke hatten eine Größe von  $400 \times 800 \text{mm}^2$  und einen Lagenaufbau [Glas/0790] <sub>s</sub>. Die unidirektionalen Gesticke hatten eine Größe von  $350 \times 320 \text{mm}^2$  und einen Lagenaufbau [Glas/070] <sub>s</sub>.

Vor der Infiltration wurden die Halbzeuge jeweils für eine Stunde bei 105°C im Umluftofen getrocknet und anschließend sofort in den bereits vorbereiteten Vakuumaufbau platziert und evakuiert, um eine Feuchtigkeitsaufnahme aus der Umgebung zu verhindern. Der evakuierte Aufbau wurde zunächst für vier Stunden bei maximalem Unterdruck bei Umgebungstemperatur belassen, um anschließend für eine weitere Stunde bei 45°C in den Umluftofen ebenfalls bei maximalem Unterdruck gebracht zu werden.

Die Infiltration wurde mit dem Vakuum-Infusionsverfahren VARI bei 45°C im Ofen durchgeführt. Nach Abschluss der Infiltration wurde der Rücksaugdruck eingestellt und der Aufbau bis zum nächsten Tag so belassen. Einige Tage später wurde die Probenplatte bei 80°C für 15 Stunden getempert. Abschließend wurden die Platten nach Normvorgaben zugesägt und mit Aufleimern zur Kraffeinleitung versehen.

#### 3.4 Ermittlung der Kennwerte

Der Faservolumengehalt  $FVG$ , d.h. das Verhältnis des Faservolumens  $V_F$  zum Gesamtvolumen  $V_{Ges}$  der Probenplatten, wurde aus den Gewichtsanteilen von Fasern und Matrix berechnet. Dazu wurden vor der Infiltration das getrocknete Halbzeug und später das infiltrierte Laminat gewogen. Mit dem Gewicht der Fasern  $m_F$  und dem Gesamtgewicht des Halbzeugs  $m_{Ges}$ , sowie den Dichten von Fasern  $\rho_F$  und Matrix  $\rho_M$ , errechnet sich der Faservolumengehalt gemäß Gleichung (1).

$$(1) \quad FVG = \frac{V_F}{V_{Ges}} = \frac{m_F / \rho_F}{m_F / \rho_F + (m_{Ges} - m_F) / \rho_M}$$

Zur Ermittlung der mechanischen Kennwerte der unidirektionalen und bidirektionalen Proben wurden Zugversuche gemäß DIN EN ISO 527 durchgeführt. Weiterhin wurden mit bidirektionalen Probekörpern Druckversuche gemäß DIN EN ISO 14126 und Schubversuche (IPSS) gemäß DIN EN ISO 14129 durchgeführt.

#### 4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

##### 4.1 Faservolumengehalte

Die Faservolumengehalte für die unidirektionalen und bidirektionalen Platten bewegen sich jeweils in einem relativ engen Bereich. So haben die bidirektionalen Platten alle einen Faservolumengehalt von rund 36%, während die unidirektionalen Platten etwa 38% aufweisen, wobei jedoch diese etwas größeren Schwankungen unterworfen sind (siehe BILD 2).

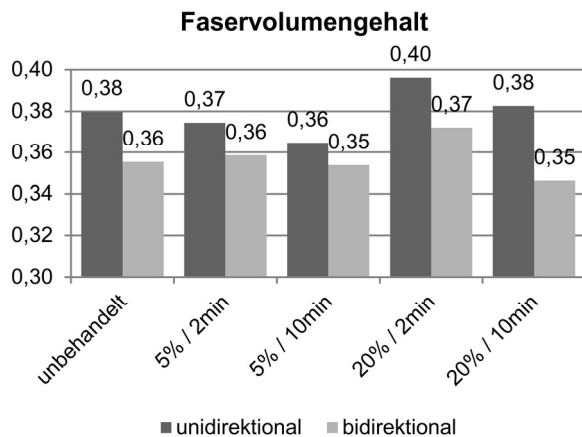


BILD 2. Faservolumengehalte der Probeplatten

Die erzielten Faservolumengehalte bewegen sich in einem ähnlichen Bereich wie Ergebnisse aus vorausgegangenen Versuchen mit ähnlichen Ausgangsmaterialien und Prozessbedingungen. Die Unterschiede zwischen unidirektionalen und bidirektionalen Halbzeugen resultieren vermutlich aus der Grenzfläche zwischen 0°-Lagen und 90°-Lagen. Während sich bei einem unidirektionalen Aufbau die Garne der verschiedenen Lagen an der Grenzfläche gut kompaktieren lassen, bleiben bei der Ablage einer 90°-Lage auf einer 0°-Lage Hohlräume übrig, die später mit Harz gefüllt werden. Insgesamt muss berücksichtigt werden, dass Faservolumengehalte von NFK im Vergleich zu z.B. GFK für dasselbe Herstellungsverfahren, d.h. auch mit identischen Parametern, niedriger ausfallen. Im Gegensatz zu synthetischen Fasern lassen sich Naturfasern aufgrund ihrer Gestalt nur unter wesentlich

höherem Druck kompaktieren und selbst dann werden die Werte von z.B. GFK noch nicht erreicht [9]. Üblicherweise werden für Glasfaser- und Kohlefaserverbunde Faservolumengehalte von ca. 60% angestrebt. In der Literatur finden sich jedoch Hinweise darauf, dass für Naturfaserverbunde deutlich niedrigere Werte zu optimalen mechanischen Eigenschaften führen. So geht beispielsweise aus [10] hervor, dass höhere Faservolumengehalte als ca. 40% (Hanf-PET) zu einer erheblichen Steigerung der Porosität des Verbundes führen und so die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen können. Die Ursache liegt darin, dass für höhere Faservolumengehalte das Halbzeug stärker kompaktiert werden muss und dadurch eine vollständige Benetzung durch die Matrix behindert wird. Der genaue Punkt des rapiden Anstiegs der Porosität ist für jede Faser-Matrix-Kombination verschieden und somit ergibt sich jeweils ein anderes Optimum für den Faservolumengehalt mit der mechanischen Eigenschaften.

##### 4.2 Zugversuche

In BILD 3 sind die normierten Festigkeiten aus den Zugversuchen dargestellt. In Abhängigkeit der Behandlungsparameter konnten Zugfestigkeitssteigerungen von 13% (unidirektional) bzw. 18% (bidirektional) erreicht werden. Die Standardabweichung betrug zwischen 1,73% und 4,24%.

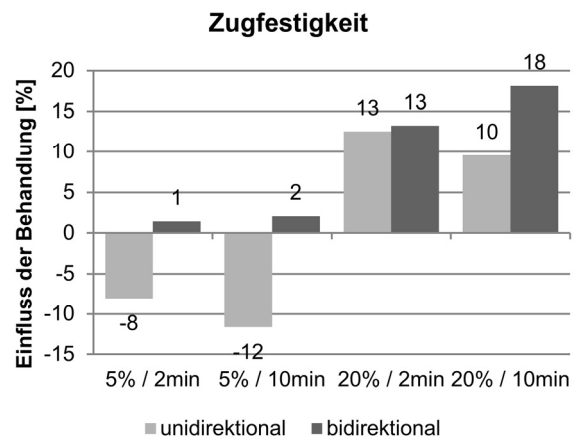


BILD 3. Einfluss der Behandlung auf die Zugfestigkeit

Während die Behandlung mit niedrig konzentrierter Lauge nur unwesentliche Steigerungen bei den bidirektionalen Proben bewirkt, ergeben sich für die unidirektionalen Proben sogar Verluste. Es wird vermutet, dass durch die niedrige Konzentration keine der beschriebenen Effekte aufgetreten sind, sondern nur wie durch eine aggressive Reinigung einige Bestandteile der Fasern gelöst worden sind und so die Festigkeit gemindert wurde. Die Tatsache, dass die unidirektionalen Werte

im Vergleich deutlich geringer ausfallen als die bidirektionalen, deutet darauf hin, dass im Wesentlichen die Festigkeit der Fasern negativ beeinflusst wurde, weniger aber die Faser-Matrix-Anbindung, da im Falle des bidirektionalen Aufbaus die 90°-Lagen quer zur Faserrichtung beansprucht werden und somit der Faser-Matrix-Haftung eine größere Rolle zukommt. Wäre die Faser-Matrix-Anbindung negativ beeinflusst, so wären vermutlich durch Risse an der Grenzfläche die Eigenschaften des bidirektionalen Verbundes negativ beeinflusst. Im Vergleich dazu sind bei den Proben, die mit hoher Konzentration hergestellt wurden, deutlich positive Effekte zu beobachten. Sowohl unidirektional als auch bidirektional sind zweistellige Zuwächse in der Festigkeit zu beobachten, sodass angenommen werden kann, dass die erwarteten Veränderungen in Zusammensetzung und Orientierung durch die Behandlung auch so eingetreten sind. Weiterhin scheint auch die Faser-Matrix-Haftung nicht negativ beeinflusst worden zu sein, möglicherweise sogar positiv für die lange Behandlungsdauer, da die bidirektionalen Werte geringfügig besser ausfallen.

In BILD 4 sind die normierten E-Moduli aus den Zugversuchen dargestellt. In Abhängigkeit der Behandlungsparameter konnten Zugmodulsteigerungen von 17% (unidirektional) bzw. 27% (bidirektional) erreicht werden. Die Standardabweichung betrug zwischen 0,66% und 3,92%.

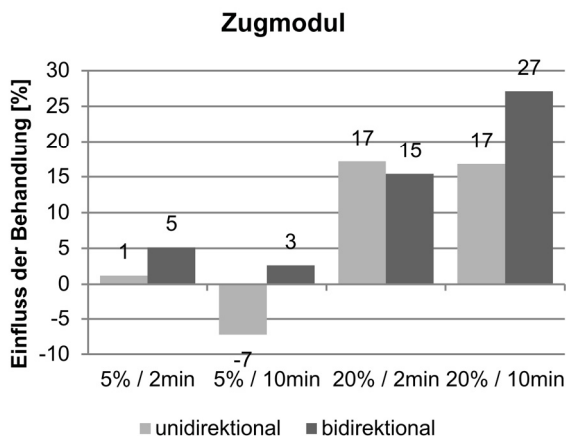


BILD 4. Einfluss der Behandlung auf den Zugmodul

Ein ähnliches Verhalten wie bereits bei der Zugfestigkeit beschrieben, ist auch bei der Steifigkeit zu beobachten. Während die Behandlungen mit der niedrigen Konzentration nur unwesentliche Veränderungen bewirken, sind die Auswirkungen bei den Behandlungen mit der hohen Konzentration deutlich positiv. Aus Untersuchungen des Einflusses der Faser-Matrix-Haftung von EP-Kohlefaserverbunden [11] ist bekannt, dass die Haftung einen geringen Einfluss

auf die Steifigkeit eines Verbundes hat. Daher ist zu vermuten, dass die Behandlung mit der hohen Konzentration die Steifigkeit der Fasern deutlich positiv beeinflusst hat, während die Behandlung mit der niedrigen Konzentration kaum Auswirkungen hatte.

In BILD 5 sind die normierten Bruchdehnungen aus den Zugversuchen dargestellt. In Abhängigkeit der Behandlungsparameter konnten Bruchdehnungsreduktionen von 24% (unidirektional) bzw. 28% (bidirektional) erreicht werden. Die Standardabweichung beträgt zwischen 2,13% und 3,78%.

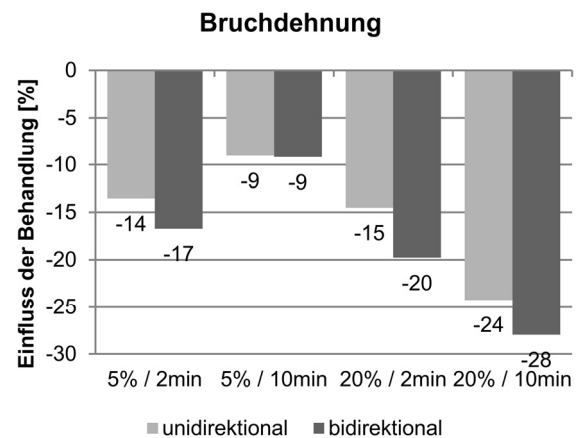


BILD 5. Einfluss der Behandlung auf die Bruchdehnung

Die Bruchdehnung wird durch alle Behandlungen deutlich erniedrigt. Auch bei den Behandlungen mit niedriger Konzentration ist die Bruchdehnung deutlich niedriger als bei den unbehandelten Proben. Noch stärker ist allerdings der Unterschied zu Proben, die mit hoher Konzentration behandelt wurden. Dieser Effekt scheint besonders bei den Proben mit der hohen Konzentration plausibel, wenn man bedenkt, dass durch die Behandlung die Filamentdurchmesser abnehmen und die Orientierung der Fasern in Längsrichtung zunimmt. In Verbindung mit der deutlich gesteigerten Steifigkeit ergeben diese Strukturänderungen die reduzierte Bruchdehnung.

### 4.3 Schubversuche

In BILD 6 sind die normierten Schubfestigkeiten und Schubsteifigkeiten in der Laminebene aus den Schubversuchen dargestellt. Je nach Behandlung konnten Schubfestigkeitssteigerungen von 3% und Schubmodulsteigerungen von 5% erreicht werden. Die Standardabweichung betrug zwischen 1,82% und 5,55%.



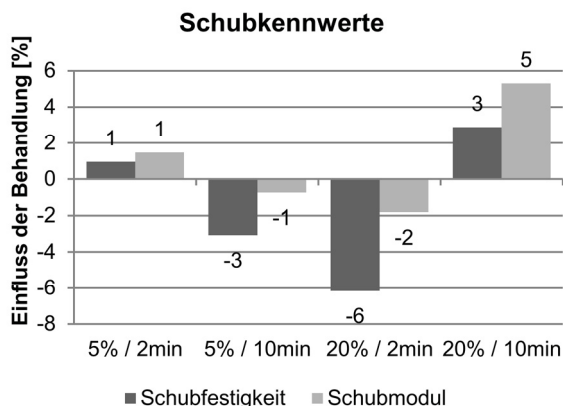


BILD 6. Einfluss der Behandlung auf die Schubkennwerte in der Laminatenebene

Die Einflüsse der Behandlungen auf die Schubkennwerte sind als gering einzuschätzen, da sich die Unterschiede in derselben Größenordnung wie die Standardabweichungen bewegen. Erstaunlicherweise schneidet die Probengruppe 20%/2min am schlechtesten ab, wobei angemerkt werden muss, dass ihre Standardabweichung der Festigkeit die größte ist. Da bereits in den Zugversuchen gezeigt werden konnte, dass die mechanischen Kennwerte der Fasern sowie die Faser-Matrix-Haftung gut sind, wird vermutet, dass es bei der Herstellung der Proben zu einer geringen Winkelabweichung gekommen ist.

**4.4 Druckversuche**

In BILD 7 sind die normierten Festigkeiten und Steifigkeiten aus den Druckversuchen dargestellt. Je nach Behandlung konnten Druckfestigkeitssteigerungen von 36% und Druckmodulsteigerungen von 45% erreicht werden. Die Standardabweichung betrug zwischen 1,93% und 24,58%.

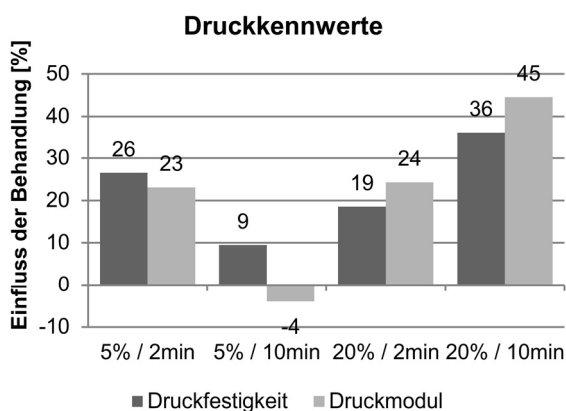


BILD 7. Einfluss der Behandlung auf die Druckkennwerte

Bei Betrachtung der Messwerte ist im Fall der Druckversuche die Berücksichtigung der Standardabweichung besonders wichtig. Wenn man die Standardabweichung mit in Betracht zieht und die Eigenschaften aus den anderen Versuchen berücksichtigt, wird schnell klar, dass die Messwerte der Probengruppe 5%/2min als unglaublich einzuschätzen sind. Plausibler erschien es, wenn die Werte der Behandlungen mit niedriger Konzentration auf dem Niveau der unbehandelten Proben lägen. Hingegen sind die Werte der Proben höherer Konzentration plausibel und vertrauenswürdig, da sich hier die bereits gezogenen Erkenntnisse bezüglich mechanischer Kennwerte und Faser-Matrix-Haftung bestätigt sehen. Für die Proben hoher Konzentration ergeben sich erhebliche Steigerungen in Festigkeit und Steifigkeit, wobei die Werte für die zehnminütige Behandlung noch deutlich besser ausfallen. Da die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen hoher Konzentration so groß ausfallen, wird vermutet, dass die durch die lange Behandlungsdauer sowohl die Festigkeit und Steifigkeit der Fasern deutlich verbessert und zusätzlich auch die Faser-Matrix-Haftung gesteigert wurde.

**4.6 Ermittelte Kennwerte im Vergleich zu GFK**

Bei einem Vergleich der besten Kennwerte, die in dieser Untersuchung erzielt wurden, mit Literaturwerten von bidirektionalen GFK-Gelegen wird schnell deutlich, dass trotz der erzielten Verbesserungen die Kennwerte der Flachfaserverbunde noch erheblich niedriger sind, als die der GFK-Gelege (siehe TABELLE 2, GFK-Werte aus [12]).

TABELLE 2. ermittelte Kennwerte von mercerisiertem Flachfasergestick im Vergleich zu Literaturwerten für GFK-Gelege aus [12]

Kennwerte	Dichte Verbund [g/cm <sup>3</sup> ]	Bruchdehnung [%]	Zugfestigkeit BD [MPa]	Zugmodul BD [MPa]
GFK-Gelege, FVG=57% [12]	1,93	2,5	675	23000
Flachsgestick mercerisiert 20%/10min, FVG=35%	1,23	1,32	121	13605

Dieser deutliche Vorteil für Glasfaserverbunde ist einerseits durch den fast doppelt so hohen Faservolumengehalt zu sehen, andererseits in der synthetischen Herstellung und letztlich dem jahrzehntelangen Entwicklungsvorsprung. Der Nachteil des niedrigen Faservolumengehaltes der Naturfaserverbunde lässt sich vermutlich noch etwas

reduzieren, da etwa durch Optimierung des Herstellungsprozesses Steigerungen auf ca. 45% für NFK möglich erscheinen. Der Einfluss der Gewinnung von Naturfasern auf die mechanischen Eigenschaften ist derzeit noch unzureichend erforscht, aber es ist anzunehmen, dass durch Prozessoptimierungen und Qualitätssicherungsmaßnahmen auch in diesem Bereich Verbesserungen möglich sind. Insgesamt ist es aber nicht zu erwarten, dass Naturfaserverbunde jemals die Zugfestigkeit von Glasfaserverbunden erreichen können. Ein etwas besseres Bild von den Eigenschaften von NFK im Vergleich zu GFK vermittelt ein Blick auf die Steifigkeit. Während bei der Zugfestigkeit die Eigenschaften von Glasfaserverbunden etwa um den Faktor fünf besser sind, ist es bei der Steifigkeit lediglich der Faktor zwei. Ebenso wie bereits bei der Zugfestigkeit beschrieben, sind auch für die Steifigkeit noch Steigerungen der Kennwerte von NFK zu erwarten, jedoch mit dem Unterschied, dass eine Annäherung der Kennwerte durchaus möglich erscheint.

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich rein auf die ermittelten Kennwerte für Festigkeit und Steifigkeit. Dabei blieb unberücksichtigt, dass die Dichte von Naturfasern deutlich niedriger ist als die von Glasfasern. Damit ergeben sich auch für die daraus hergestellten Verbundwerkstoffe unterschiedliche Dichten. Da im Leichtbau nicht Festigkeit und Steifigkeit allein entscheidend sind, sondern die dichtespezifischen Werte, sollen diese im Folgenden näher betrachtet werden. Weiterhin ist es üblich für die Auslegung von Faserverbundbauteilen eine maximale Dehnung von 0,25% zuzulassen, da unterhalb dieser Grenze die Ausbreitung von Delaminationen als unkritisch angesehen wird. Da die ermittelten Kennwerte bezüglich der Bruchdehnung angegeben sind und Naturfasern und Glasfasern unterschiedliche Bruchdehnungen besitzen, die deutlich oberhalb der zugelassenen Dehnung liegen, erscheint es sinnvoll, die Festigkeit diesbezüglich anzugeben. Eine Normierung auf einen gemeinsamen Faservolumengehalt macht aus Sicht der Verfasser keinen Sinn, da weder 60% Faservolumengehalt für NFK erreichbar sind, noch jemand vorsätzlich GFK mit 45% Faservolumengehalt für Leichtbauzwecke herstellen würde.

**Zugfestigkeit bidirektional, normiert mit Dichte bei max. Dehnung 0,25%**

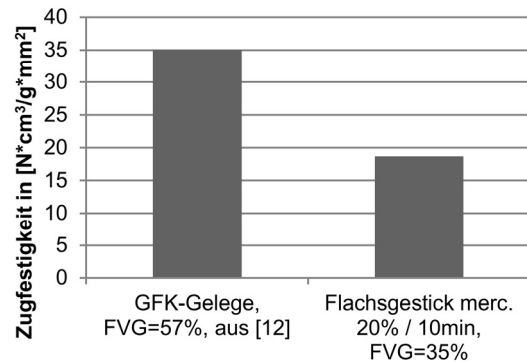


BILD 8. normierte Zugfestigkeit von GFK-Gelege im Vergleich zu mercerisiertem Flachsfasergestick

BILD 8 zeigt, dass durch Berücksichtigung von Dichte und Bruchdehnung der Nachteil von NFK gegenüber GFK deutlich geringer ausfällt. Dieser Unterschied resultiert aus der höheren Dichte von Glasfasern ( $2,5 \text{ g/cm}^3$ ) und deren höheren Bruchdehnung (2,5%), während die Dichte von Flachsgarn nur  $1,47 \text{ g/cm}^3$  beträgt und auch die Bruchdehnung deutlich niedriger ausfällt (1,32% für mercerisiert 20%/10min). Wenn man davon ausgeht, dass durch angepasste Prozesse für die jeweilige Faser-Matrix-Kombination optimale Faservolumenanteile erreicht werden und durch gezielte Faserbehandlungen die Eigenschaften von Naturfasern noch gesteigert werden, erscheint es möglich die gewichtsspezifischen Eigenschaften von GFK erreichen zu können. Noch positiver fällt der Vergleich der dichtenormierten Steifigkeit aus (siehe BILD 9). Durch den Dichtevorteil seitens der Naturfasern sind die Werte von GFK schon jetzt annähernd erreicht, sodass zukünftig diese sogar noch übertroffen werden könnten.

**Zugmodul normiert mit Dichte**

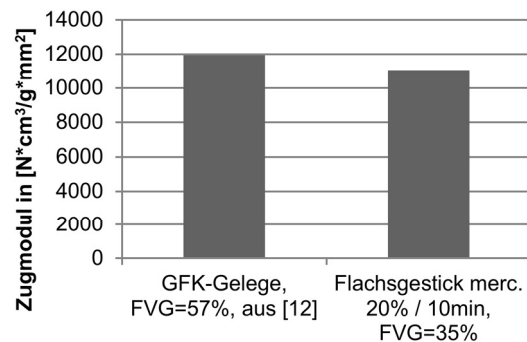


BILD 9. normierter Zugmodul von GFK-Gelege im Vergleich zu mercerisiertem Flachsfasergestick

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen deutlich, dass sich die mechanischen Eigenschaften von Flachsfaser-verbunden nennenswert durch eine Mercerisation beeinflussen lassen. Dabei hat eine Faserbehandlung mit niedriger Laugenkonzentration folgende Effekte:

- Senkung Verbundfestigkeit (Zug -10%)
- Senkung Faserfestigkeit
- Kein negativer Einfluss auf Faser-Matrix-Haftung
- Kein Einfluss auf Verbundsteifigkeit (Zug)
- Kein Einfluss auf Fasersteifigkeit
- Senkung Bruchdehnung
- Kein Einfluss auf Schubkennwerte

Eine Faserbehandlung mit hoher Laugenkonzentration wirkt sich folgendermaßen auf die Kennwerte aus:

- Steigerung Verbundfestigkeit (Zug 10 bis 15% und Druck 20 bis 35%)
- Steigerung Faserfestigkeit
- Steigerung Verbundsteifigkeit (Zug 10 bis 20% und Druck 25 bis 45%)
- Steigerung Fasersteifigkeit
- Kein negativer Einfluss auf Faser-Matrix-Haftung, möglicherweise sogar positiv
- Senkung Bruchdehnung des Verbundes (Zug -15 bis -30%)
- Senkung Faserbruchdehnung
- Kein Einfluss auf Schubkennwerte

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die Faserbehandlung mit hochkonzentrierter Natronlauge unter isometrischen Bedingungen eine geeignete Methode darstellt, die Eigenschaften von Flachsfaser-Epoxidharz-Verbunden in positiver Weise zu beeinflussen. Die Behandlung mit niedrigkonzentrierter Lauge hat keine nennenswerten Vorteile gezeigt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass bereits mit dem derzeitigen Kenntnisstand gute mechanische Eigenschaften von Naturfaserverbundwerkstoffen erzielt werden können. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass Naturfasern selbst beim Einsatz einfacher Methoden ein großes Potential für Verbesserung bieten. Auch wenn diese Erkenntnisse schon erfreulich sind, besteht noch ein großes Maß an Untersuchungsbedarf, damit Naturfaserverbunde zu einer ernsthaften Konkurrenz für Glasfaserverbunde werden können.

## 6. REFERENZEN

1. **M. Carus, C. Gahle, C. Pendarovski.** *Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaserwerkstoffen (Deutschland und EU).* s.l. :

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2008. Gülzower Fachgespräche Band 26.

2. **H. Hanselka.** *Technischer Leitfaden zur Anwendung von ökologisch vorteilhaften Faserverbundwerkstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen - am Beispiel eines Kastenträgers als Prototyp für hochbelastbare Baugruppen.* Aachen : Shaker Verlag, 1999.

3. **M. Miao, N. Finn.** *Conversion of Natural Fibres into Structural Composites.* 2008. Journal of Textile Engineering Vol. 54 No. 6 pp 165-177.

4. **S. Kalia, B.S. Kaith, I. Kaur.** *Pretreatments of Natural Fibers and their Applications as Reinforcing Material in Polymer Composites - A Review.* 2009. Polymer Engineering and Science - 2009 pp 1253-1272.

5. **M. Jacob John, R.D. Anandjiwala.** *Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites.* 2008. Polymer Composites - 2008 pp 187-207.

6. **I. Van de Weyenberg, J. Ivens, A. De Coster.** *Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites.* 2003. Composites Science and Technology 63 pp 1241-1246.

7. **I. Van de Weyenberg, T. Chi Truong, B. Vangrimde.** *Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre treatment.* 2006. Composites: Part A 37 pp 1368-1376.

8. **J. Gassan.** *Naturfaserverstärkte Kunststoffe - Korrelation zwischen Struktur und Eigenschaften der Fasern und deren Composites.* [Dissertation] Universität Kassel : s.n., 1997.

9. **B. Madsen.** *Properties of Plant Fibre Yarn Polymer Composites - An Experimental Study.* [Dissertation] Technical University of Denmark : s.n., 2004.

10. **B. Madsen, A. Thygesen, H. Lilholt.** *Plant fibre composites - porosity and volumetric interaction.* 2007. Composites Science and Technology 67 pp 1584-1600.

11. **L.T. Drzal, M. Madhukar.** *Fibre-matrix adhesion and its relationship to composite mechanical properties.* 1993. Journal of Materials Science 28 pp 569-610.

12. **C. Kindervater.** *Technologie- und Dimensionierungsgrundlagen für Bauteile aus Faserkunststoffverbunden.* [Vorlesungsunterlagen] Universität Stuttgart : s.n., 2010.