



Ulrich Riedel  
(Vortragender)  
Jörg Nickel

## **Konstruktionswerkstoffe aus nachwachsende Rohstoffen (BioVerbunde)**

Structural materials from renewable  
resources (Biocomposites)

### Charakterisierung des Referats

Ausgewählte naturfaserverstärkte Biopolymere können glasfaserverstärkte Faserverbundstrukturen vielen Bereichen ersetzen.

### Characterization of the paper

Selected composites based on renewable resources are able to substitute glassfibre reinforced plastics in many applications.

## **Konstruktionswerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (BioVerbunde)**

Angesichts immer knapper werdender Ressourcen und zunehmender Umweltbelastungen müssen über Energieeinspareffekte durch Leichtbauweisen hinaus zunehmend auch Aspekte der Rohstoffgewinnung und stofflichen Verwertung nach dem Ende von Produktlebenszeiten betrachtet werden. Bei der Verwendung konventioneller Kunststoffe und Faserverbunde auf petrochemischer Basis sind Produktion, Nutzung und Entsorgung unter dem Gesichtspunkt der Umweltverträglichkeit oftmals sehr problematisch und mit erheblichem technischen Aufwand verbunden.

Einen Lösungsansatz bieten hier Konstruktionswerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Dabei handelt es sich um Pflanzenfasern wie z. B. Flachs, Hanf, Jute oder Ramie (Zellulosefasern), die in biopolymere Matrices, z. B. Zellulose-, Stärke-, Schellack-derivate oder pflanzenölbasierte Harze eingebettet werden. Solche Faserverbunde können nach ihrer Nutzungsdauer durch CO<sub>2</sub>-neutrale thermische Verwertung oder u. U. durch Kompostierung und durch klassisches Recycling umweltverträglich im Stoffkreislauf geführt werden.

## **Structural materials from renewable resources (Biocomposites)**

In view of the resources steadily running short, while ecological damages are increasing, and apart from energy saving effects by lightweight constructions, the aspects of the exploitation of raw materials and the recovery after the end of the lifetime of products have to be more and more taken into consideration. Making use of conventional, i.e. petrochemically based plastics and fibre reinforced polymers, the production, use and recovery are often very difficult and demand considerable technical resources.

An answer to solve all these problems may be given by natural fibre reinforced biopolymers based upon renewable resources, in the following called biocomposites. By embedding plant fibres, e.g. from flax, hemp or ramie (cellulose fibres) into biopolymeric matrices, e.g. derivatives from cellulose, starch, shellac or plant oils, fibre reinforced polymers are obtained that can environmentally friendly be integrated into natural cycles, e.g. by classic recycling, by CO<sub>2</sub>-neutral incineration (including recovery of energy) and possibly by composting.

## 1. Einleitung

Das ursprüngliche Einsatzgebiet für die Faserverbundwerkstoffe liegt vor allem in der Luft- und Raumfahrt. Mittlerweile werden diese Konstruktionswerkstoffe jedoch auch für zahlreiche andere technische Anwendungen eingesetzt. Die Verwendung von Faserverbundwerkstoffen ist immer dann besonders sinnvoll, wenn es darauf ankommt, hohe Festigkeiten und Steifigkeiten bei geringem Gewicht zu erzielen. Verantwortlich für die guten spezifischen, d. h. gewichtsbezogenen Eigenschaften sind die geringen Dichten der verwendeten Matrixharze (ungesättigte Polyester, Phenolharze, Epoxidharze) und der darin eingebetteten hochfesten und -steifen Fasern (Glas-, Aramid- und Kohlenstofffasern). Darüber hinaus wird bei der Herstellung die Möglichkeit ausgenutzt, durch eine beanspruchungsgerechte Ausrichtung der lasttragenden Verstärkungsfasern das jeweilige Bauteil auf den speziellen Anwendungsfall maßzuschneidern. Der eigentliche Verbundwerkstoff entsteht daher erst bei der Bauteilfertigung. Dazu sind die verschiedensten Fertigungstechnologien entwickelt worden.

Hinsichtlich der Verwertung nach Ablauf ihrer Nutzungsdauer werfen die klassischen Faserverbundwerkstoffe jedoch oftmals erhebliche Probleme auf. Hier erweist sich die Kombination eines solchen Werkstoffs aus verschiedenartigen und in der Regel sehr beständigen Fasern und Matrices als großes Erschwernis für das Recycling. Eine bloße Deponierung verbietet sich angesichts der wachsenden Umweltproblematik immer mehr. Deshalb wird nach Möglichkeiten wie dem Rohstoffrecycling, der CO<sub>2</sub>-neutralen thermischen Verwertung oder u. U. dem biologischen Abbau als umweltverträglicher Alternative gesucht. Die Entwicklung eines Konstruktionswerkstoffs auf der Basis nachwachsender Rohstoffe, bestehend aus Naturfasern, eingebettet in sog. Biopolymere, sowie die Bereitstellung ökonomisch und ökologisch vertretbarer Bauteilfertigungsverfahren sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten am Institut für Strukturmechanik des DLR.

## 2. Naturfaserverstärkte Konstruktionswerkstoffe

### 2.1. Naturfasern als Verstärkung

In einem Faserverbundwerkstoff nimmt die Faser die Aufgaben der Verstärkung wahr und muss daher eine hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit aufweisen, während die Matrix in der Regel ein zeit- und temperaturabhängiges Materialverhalten aufweist sowie eine deutlich geringere Zugfestigkeit und eine vergleichsweise höhere Dehnung besitzt. Das bedeutet, dass die mechanischen Eigenschaften der Faser das Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten des Verbundes entscheidend prägen. In der Regel werden sehr dünne Fasern eingesetzt, da diese ein großes Oberflächen/Volumen-Verhältnis aufweisen, welches sich günstig auf die Haftung zwischen Faser und Matrix auswirkt. Das Fasermaterial richtet sich nach dem gewünschten Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten des Verbundes (1-4). Weitere Auswahlkriterien zur Bestimmung der geeigneten Verstärkungsfasern sind:

- Bruchdehnung,
- Wärmebeständigkeit,
- Haftungsverhalten zwischen Faser und Matrix,
- Dynamisches Verhalten,
- Langzeitverhalten,
- Preis und Verarbeitungskosten.

Naturfasern lassen sich in pflanzliche, tierische und mineralische Fasern unterteilen. Alle pflanzlichen Fasern (Baumwolle, Jute, Flachs, Hanf usw.) sind aus Zellulose aufgebaut, Fasern tierischen Ursprungs dagegen aus Protein (Wolle, Seide, Haare). Pflanzenfasern werden nach ihrem Vorkommen in Bast- und Hartfasern eingeteilt. Bastfasern werden aus Pflanzenstengeln gewonnen; zu ihnen gehören z. B. Hanf, Jute, Ramie und Flachs. Hartfasern werden dagegen aus Blättern, Blattscheiden oder Früchten gewonnen; hierzu gehören Sisal und Kokos (6-16).

Wie bereits erwähnt sind für die Verwendung von Naturfasern in Verbundwerkstoffen deren spezifische mechanischen Eigenschaften ent-

scheidend. Dass die Naturfasern Hanf, Flachs und Ramie mit den technischen Fasern konkurrieren können, zeigt Abb. 1.

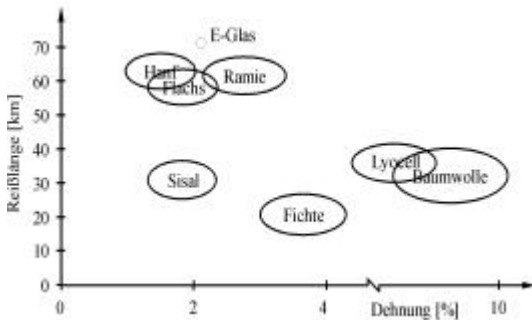


Abb. 1: Vergleich der Eigenschaften verschiedener natürlicher Verstärkungsfasern

Aus Diagramm 1 ist ersichtlich, dass die Ramie-, Flachs- und Hanffasern im Vergleich zu den anderen Naturfasern Sisal, Fichte und Baumwolle die größten Reißlängen besitzen. Aufgrund der deutlich höheren Bruchdehnung von bis zu 10 % ist die Eignung der Baumwollfaser als Verstärkungsfaser für Verbundwerkstoffe nicht gegeben. Als Referenzfaser wurde E-Glas (z. B. Al-B-Silikatglas (17)) in das Diagramm aufgenommen, weil es im Bereich der Faserverbundtechnik große Bedeutung besitzt (6,18).

## 2.2. Biopolymere als Matrixsysteme

Die beschriebenen Naturfasern werden in eine biopolymere Matrix gebettet, deren Aufgabe es ist, die Formstabilität zu gewährleisten, die mechanisch hochwertige Faser vor Strahlung und aggressiven Medien zu schützen und Schubkräfte zu übertragen. Dabei werden die Polymere in der Regel in Duroplaste und Thermoplaste unterteilt, die gleichermaßen als Matrix für den Konstruktionswerkstoff geeignet sind.

Biopolymere sind solche Polymere, deren Grundbausteine überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen. Dabei können die Grundbausteine sowohl von der Polymerkette als auch von der Seitenkette oder von den zum Polymer zu verknüpfenden Monomeren gebildet werden. Hieraus resultiert eine Vielzahl von Bildungsmöglichkeiten für Biopolymere.

Die natürlich synthetisierten Polymere wie z. B. Stärke und Zellulose müssen physikalisch oder chemisch umgewandelt werden, um als

Thermoplaste verarbeitet werden zu können. Stärke kann beispielsweise durch Destrukturierung mit Hilfsmitteln (z. B. Glycerin und Wasser) (19, 20) thermoplastifiziert werden. Häufig wird anschließend durch Zugabe von Copolymeren, die auch petrochemischen Ursprungs sein können, versucht, die Eigenschaften zu verbessern (ein Produkt ist z. B. Mater-Bi) (21). Aber auch durch partielle oder vollständige Veresterung der Seitenkettenhydroxylgruppen mit kurzkettigen organischen Säuren wie z. B. Essigsäure und evtl. Zugabe von Weichmachern kann dieser Effekt erzielt werden (ein Produkt ist z. B. Sconacell A) (22). Zusätzlich werden hierdurch auch andere physikalische, chemische, mechanische und thermische Eigenschaften des Biopolymers beeinflusst. Zur Thermoplastifizierung von Zellulose unter Erhalt der zellulosischen Kettenstruktur wird vornehmlich die Veresterung der Hydroxylgruppen an der Seitenkette vorgenommen (ein Produkt ist z. B. Bioceta) (23-25).

Auf dem Wege der biotechnischen Synthese, häufig fermentativ, werden vor allem durch Mikroorganismen aufgebaute Polymere gewonnen. Dabei dienen diese Polymere als Energiespeicher für die Mikroorganismen. Im Vergleich dazu wird die Aufgabe des Energiespeicherns in Pflanzen durch die Stärke erfüllt. Als wichtigstes Beispiel für fermentierte Biopolymere seien hier die Polyhydroxybuttersäure und deren Copolyester aufgeführt (ein Produkt ist z. B. Biopol) (26).

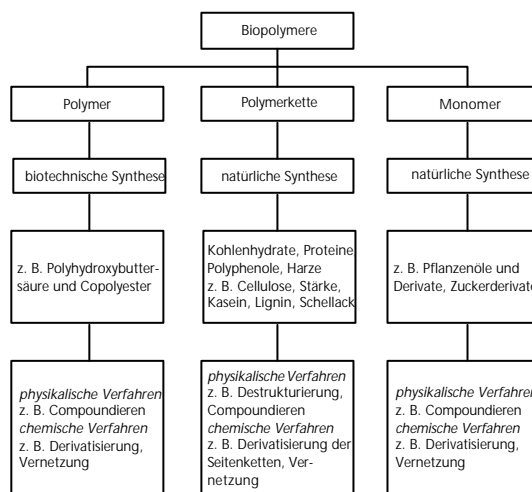


Abb. 2: Gliederung der Biopolymere

Durch chemische Synthese werden überwiegend kleine Bausteine zu Polymeren verknüpft. Solche Monomere werden wiederum

entweder gänzlich natürlich synthetisiert, zu nennen sei hier die Milchsäure, oder durch chemische Modifikation gering verändert, zu nennen sind hier verschiedene epoxidierte Sonnen-, Rüb-, Lein- oder Sojaöle. Die zuletzt genannten Grundbausteine werden bisher noch mit petrochemisch gewonnenen Härtern vernetzt (Produkte sind z. B. Tribest der 3000er Reihe, PTP oder Elastoflex) (27). Aber auch die anderen natürlichen Rohstoffe, wie Zellulose, Schellack und Lignin etc. können vernetzt werden, da sie entsprechende Funktionalitäten besitzen und weitere zusätzlich eingeführt werden können.

Die dargestellten Möglichkeiten der verfügbaren Matrices sind vielfältig (28-33), so dass eine auf die Anforderungen angepasste Werkstoffauswahl getroffen werden muss. Dabei erfolgt die Auswahl der Matrix für einen Hochleistungskonstruktionswerkstoff nach den Randbedingungen Einsatztemperatur, mechanische Belastung und Verarbeitungstechnologie etc. Eine wichtige Anforderung an die Matrix ist eine hinreichend geringe Viskosität, damit eine gute Durchtränkung der Verstärkungsfaser erreicht werden kann. Dabei müssen aber auch wichtige Eigenschaften wie z. B. die Bruchdehnung, die vorzugsweise im Bereich der der Naturfasern liegen sollte, und eine gute Haftung zur Naturfaser gewährleistet sein. Die genannten Charakteristika sind neben anderen Matrixeigenschaften Grundvoraussetzung für den Aufbau eines idealen Faserverbundwerkstoffs.

Im DLR werden die verfügbaren Biopolymere bezüglich Eignung für den Einsatz als Matrixwerkstoff in Verbunden beurteilt. Bewertet werden neben der Erfüllung der oben genannten Aufgaben die Möglichkeiten, diese Materialien in neuen Verfahren einzusetzen (z. B. Harzinjektionsverfahren, wie das im Institut entwickelte differential pressure resin transfer moulding (DP-RTM) Verfahren).

### 3. Werkstoffeigenschaften

In Abb. 3 werden am Beispiel der Zugeigenschaften ausgewählte Bio-Verbunde mit glasfaserverstärkten Verbunden (GFK) verglichen. Dabei zeigt sich deutlich, dass bei gleichem Faservolumengehalt die Eigenschaften von

GFK bereits jetzt annähernd erreicht werden können. Wird berücksichtigt, dass die Dichten der Naturfasern mit ca. 1500 kg/m<sup>3</sup> deutlich unterhalb der der Glasfasern mit ca. 2500 kg/m<sup>3</sup> liegen, so kann bei gleichem Bauteilgewicht ein höherer Faservolumenanteil bei den BioVerbunden eingestellt werden, der eine größere Verstärkung bewirkt.

**Biegeeigenschaften ausgewählter BioVerbunde**  
*normierte spezifische Kenndaten*

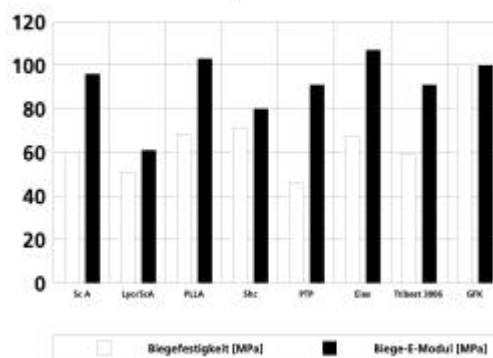


Abb. 3: Biegeeigenschaften ausgewählter naturfaserverstärkter BioVerbunde

In Anlehnung an die bewährten Verfahren in der Faserkunststofftechnik werden beim DLR Fertigungstechnologien zur Herstellung von Bio-Verbunden entwickelt, untersucht und optimiert. Dabei handelt es sich insbesondere um die Presstechnik, die Laminier- und die Wickeltechnologie sowie die Pultrusion, die mit nur leichten Modifikationen bei der Bauteilfertigung erprobt werden. Zur konstruktiven Ausnutzung der Anisotropie der Faserverbundwerkstoffe sind unidirektional (UD) verstärkte Laminat- oder Gewebesichten von Vorteil. Für weniger beanspruchte Bauteile oder Bauteilzonen genügen Vlieswerkstoffe.

## 4. Anwendungsforschung

Im folgenden wird ein Überblick über die seit 1989 begonnenen Entwicklungsarbeiten gegeben, wobei der Schwerpunkt auf ausgewählten Industriekooperationen liegt, aus denen erste marktreife Produkte hervorgegangen sind bzw. neue entstehen.

### 4.1. Designbürostühle

Eine der ersten Forschungsk Kooperationen auf dem Gebiet der BioVerbunde bestand mit der Firma Wilkhahn (gefördert durch das niedersächsische Ministerium für Wirtschaft, Tech-

nologie und Verkehr) und befasste sich mit der Entwicklung eines Designerbürostuhls, dessen Sitzschale aus einem bioabbaubaren Verbund herzustellen war. Neben der Erfüllung der im Lastenheft festgelegten sitzspezifischen Anforderungen war erklärtes Ziel, durch Verwendung eines ökologisch verträglichen Werkstoffs ein konsequentes Entsorgungskonzept, nämlich die Kompostierung zu ermöglichen, unter Gewährleistung größter gestalterischer Freiheiten des Werkstoffs. Dabei wurden mittels der Finiten Elemente Methoden erste Messergebnisse genutzt, um mechanische Voraussagen bezüglich der Machbarkeit treffen zu können. Neben der Eignungsuntersuchung aller marktverfügbaren Biopolymere wurde die Prozesstechnik grundlegend untersucht und notwendige Entwicklungen wurden durchgeführt, damit der neue Werkstoff industriell einsetzbar werden sollte. Zusammenfassend lässt sich zeigen, dass sowohl die mechanischen Eigenschaften näherungsweise erfüllt werden konnten als auch ein konsequentes Entsorgungskonzept dargestellt werden konnte. Die auftretenden Fertigungsprobleme ergaben sich aus den verwendeten Biopolymeren, so dass weitere Forschungen auf diesem Gebiet für die Umsetzung des Entwicklungskonzepts "BioVerbund" in weiteren Industrieanwendungen notwendig waren.



Abb. 4: Sitzschale aus BioVerbund

#### 4.2. Türseitenverkleidung

Einen weiteren Schritt zur Umsetzung des Konzepts konnte im Entwicklungsprojekt (gefördert durch das niedersächsische Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) mit der Firma Johnson Controls Interiors getan werden. Ziel der Entwicklung war es, eine Türseitenverkleidung aus einem Werk-

stoff zu gestalten, der zu 100 % aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen sollte, da eine ökologisch verträgliche Entsorgung angestrebt wurde. Neben der im Vordergrund stehenden Wirtschaftlichkeit sollte die etablierte Fertigungstechnik genutzt werden, um die geforderten Bauteilspezifikationen zu erreichen. Mit einem inzwischen neu entwickelten Biopolymer konnte der Naturfaserverbundwerkstoff die im Lastenheft verankerten Anforderungen erfüllen. Allerdings wurden aus wirtschaftlicher Sicht diese Entwicklungen bisher noch nicht industriell umgesetzt.



Abb. 5: Türseitenverkleidung aus BioVerbund

#### 4.3. Pultrudierte Federleisten

Einer Marktanalyse zur Folge werden in naher Zukunft hochwertige Buchenhölzer zur Fertigung von Federleisten nicht mehr zum derzeitigen Marktpreis verfügbar sein. Grund hierfür ist der im Osten Europas und auch in anderen Ländern betriebene Raubbau. Um trotzdem einen nachwachsenden Rohstoff verwenden zu können, aber auf petrochemisch basierte Komponenten, wie z. B. Phenolharzleime verzichten zu können, und dabei Profile ohne spanende Bearbeitung und ohne Einschränkung der designerischen Freiheiten fertigen zu können, bot sich die Pultrusion von Naturfasern, gebettet in Biopolymere, an. Dieses komplexe Forschungsthema wurde zusammen mit der Firma Thomas Technik & Innovation angegangen (gefördert durch das niedersächsische Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Verkehr).

Neben der Untersuchung verschiedenster Fasertypen und -aufmachungen wurde das Pultrusionsverfahren hinsichtlich der Verwen-

derung nachwachsender Rohstoffe optimiert ohne die Wirtschaftlichkeit zu vernachlässigen. Dabei konnten die geforderten mechanischen Eigenschaften erreicht werden. Obwohl für den zuletzt genannten Punkt besondere Maßnahmen ergriffen werden mußten, konnte eine umweltverträgliche Entsorgung gewährleistet werden. Solche Bettlattenroste sollen voraussichtlich zur Jahreswende 2000/2001 auf dem Markt verfügbar sein (34).

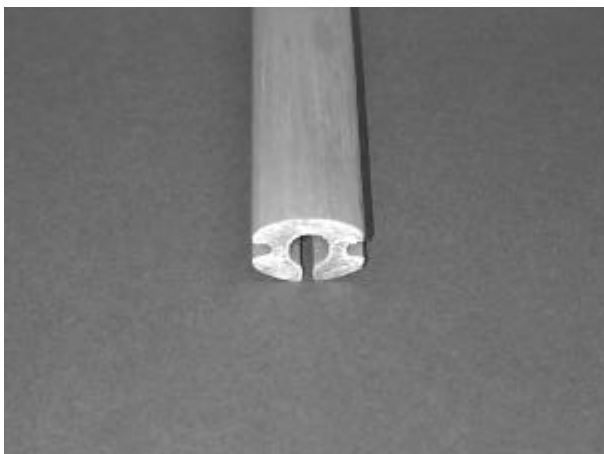


Abb. 6: BioVerbundprofil

#### 4.4. Neue pflanzenölbasierte Duroplaste

Die in einigen Projekten herausgearbeiteten Probleme der Matrixsysteme werden innerhalb eines derzeit laufenden Forschungsprojekts mit der Firma Cognis (gefördert von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe), bearbeitet. Hierzu werden neuartige pflanzenölbasierte Duroplaste entwickelt, deren Einsatz im Faserverbundbereich (Naturfasern als Verstärkungssysteme) gesehen wird. Diese Biopolymere sollen neben den Verarbeitungseigenschaften auch in ihren anderen, z. B. ihren mechanischen Kenndaten und ihren Beständigkeiten vergleichbar sein mit den Eigenschaftswerten ihrer petrochemischen Verwandten. Die Verwendung eines höchstmöglichen Einsatzes von nachwachsenden Rohstoffen nimmt dabei eine entscheidende Rolle ein. Erste Ergebnisse fließen bereits in derzeit laufende Projekte ein.

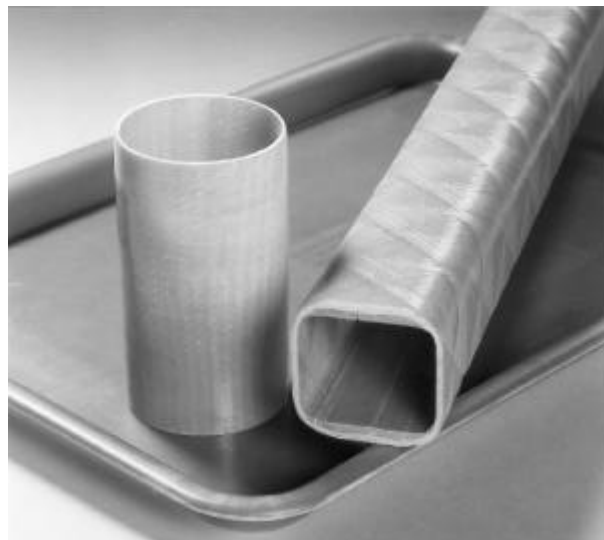


Abb. 7: Rohr und Kastenträger auf Tablett

#### 4.5. Arbeitsschutzhelme

Das Konzept Konstruktionswerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zeigt das enorme Potenzial dieser neuen Werkstoffklasse auf. Hierbei geht es im Forschungsprojekt (gefördert durch das niedersächsische Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) mit der Firma Schuberth Helme GmbH darum, einen Industrieschutzhelm zu entwickeln, der mindestens zu ca. 85 % aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen soll. Basierend auf dem Werkstoffkonzept der BioVerbundwerkstoffe wurde ein geeignetes Faser/Matrixsystem entwickelt, das die Anforderungen der für Industrieschutzhelme maßgeblichen Norm DIN EN 397 erfüllt. Parallel zu der Erarbeitung dieser rein werkstofflichen Grundlagen musste im Hinblick auf eine spätere Serienproduktion der Helmschalen ein in bezug auf Produktivität und Qualität geeignetes Herstellungsverfahren bereitgestellt werden.

Die Messergebnisse lassen erkennen, dass die Anforderungen der DIN EN 397 von den Helmschalen aus BioVerbund in jedem Fall erreicht bzw. übertroffen werden. Durch einen optimierten Lagenaufbau sowie die Ausnutzung des Leichtbaupotentials der Naturfasern ließ sich für die Helmschalen eine Gewichtsreduzierung von 5 – 10 % erreichen, was für den Tragekomfort der Schutzhelme eine wesentliche Verbesserung darstellt.



Abb. 8: Industrieschutzhelm

Zukünftige Arbeiten zielen darauf ab, das Werkstoffkonzept der BioVerbunde soweit zu optimieren, dass auch Bereiche mit höheren Sicherheitsanforderungen bedient werden können.

#### 4.6. Schienenfahrzeuginnenausbau

Für die Konzeptstudie „LIREX“ (leichter innovativer Regionalexpress, der erstmalig auf der Innotrans in Berlin der Öffentlichkeit präsentiert wird) der Firma Alstom LHB wurden mit Mitteln des niedersächsischen Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Luftsäulenverkleidungen (siehe Abb. 9) entwickelt, die sich als Verbindungselemente zwischen zwei Seitenfenstern im Sichtbereich des Zuges befinden. Damit konnte anschaulich demonstriert werden, wie leistungsfähig die BioVerbundwerkstoffe sind.

Es wurden erfolgreich die Richtlinien für DBAG-Fahrzeuge gemäß TL918413 eingehalten. In diesem Zusammenhang sind in erster Linie die für den Brandschutz in Schienenfahrzeugen maßgeblichen und erheblichen Anforderungen der DIN 5510 – 1 zu nennen. Der BioVerbund wurde mit halogenfreien Brandschutzmitteln ausgerüstet und konnte die Brennbarkeitsklasse S4, die Rauchentwicklungsklasse SR2 und die Tropfbarkeitsklasse ST2 erreichen.



Abb. 9: Luftsäulenverkleidung

## 5. Zusammenfassung

Die gewonnenen Erfahrungen haben gezeigt, dass sich der BioVerbund in hervorragender Weise zu Konstruktionsbauteilen verarbeiten lässt. Die gewichtsbezogenen mechanischen Eigenschaften lassen es zu, Anwendungsbereiche anzustreben, die heute von glasfaserverstärkten Kunststoffen beherrscht werden. Einschränkungen müssen zur Zeit noch in Bereichen mit extremen Umweltbedingungen akzeptiert werden. Wesentliche Zielgruppe sind somit z. B. Verkleidungselemente im Automobil- und Waggonbau, die Möbelindustrie sowie der gesamte Markt der Freizeitindustrie.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die langjährige Entwicklung unter Beibehalt des hochgesteckten Ziels, nämlich die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen mit einem Anteil von mindestens 80 % nicht zwingend zu Werkstoffunterschieden führen muss. Erste Produkte sind bereits im Markt, weitere werden in Kürze folgen. Um vielfältige industrielle Einsatzgebiete mit diesem neuen Werkstoff bedienen zu können, bedarf es noch weiterer Forschungsaktivitäten im Bereich Ferti-

gungstechnologie und Optimierung der Komponenten. Es wird erwartet, dass sich in naher Zukunft die Marktakzeptanz deutlich durch die Einführung der ersten Produkte aus BioVerbund erhöhen wird und neue Märkte erschlossen werden können.

## 6. Literaturverzeichnis

- (1) Michaeli, W.; Wegener M.: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe. Hanser Verlag, München 1990.
- (2) Carlsson, L.A., Byron Pipes R.: Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe- Herstellung und experimentielle Charakterisierung, B.G. Teubner-Verlag, Stuttgart 1989.
- (3) Moser, K.: Faser-Kunststoff-Verbund. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1992.
- (4) Ehrenstein, G.W.: Faserverbund-Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München 1992.
- (5) DIN 60 001: Textile Faserstoffe – Naturfasern. Deutsches Institut für Normung, Berlin 1990.
- (6) Wagner, E.: Teil T12: Die textilen Rohstoffe (Natur- und Chemiefaserstoffe). Handbuch für Textilingenieure und Textilpraktiker, Dr. Spohr-Verlag, Wuppertal-Elberfeld 1961.
- (7) Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen, Fasern und Matrices. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995, S. 155-179.
- (8) Kromer, K.-H.; Gottschalk, H.; Beckmann, A.: Technisch nutzbare Leinfaser. Landtechnik Bd. 6 (1995), S. 340-341.
- (9) Schliefer, K.: Zellulosefaser, natürliche. Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, 4. Auflage, Bd.9, Verlag Chemie, Weinheim 1975, S. 247-253.
- (10) Gessner, W.: Naturfasern Chemiefasern. Fachbuchverlag, Leipzig 1955.
- (11) N.N.: Band IV: Technik 1. Teil. Landolt-Börnstein, 6. Auflage 1955, S. 158-295.
- (12) N.N.: Band IV: Technik 1. Teil. Landolt-Börnstein, 6. Auflage 1955, S. 322-420.
- (13) N.N.: Flachs sowie andere Bast- und Hartfasern, Faserstoff-Tabellen nach P.-A. Koch. Sonderdruck aus Chemiefasern/Textilindustrie, 44./96. Jahrgang, Deutscher Fachverlag GmbH, Frankfurt/Main 1994.
- (14) Haudek, H. W.; Viti, E.: Textilfasern. Verlag Johann L. Bondi & Sohn, Wien-Perchtoldsdorf, Melliand Textilberichte KG, Heidelberg 1980, S. 15-73.
- (15) Haudek, H. W.; Viti, E.: Textilfasern. Verlag Johann L. Bondi & Sohn, Wien-Perchtoldsdorf, Melliand Textilberichte KG, Heidelberg 1980, S. 122-141.
- (16) Haudek, H. W.; Viti, E.: Textilfasern. Verlag Johann L. Bondi & Sohn, Wien-Perchtoldsdorf, Melliand Textilberichte KG, Heidelberg 1980, S. 156-161.
- (17) Ruge, J.: Technologie der Werkstoffe, Vieweg-Verlag, Braunschweig 1989.
- (18) Seifert, H.-J.: Fallschirmwerkstoffe. In. "Fallschirmtechnik und Bergungssysteme". (Hrsg.: H.-D. Melzig), Vorlesungsreihe des DGLR-DFVLR-AGARD, 1969.
- (19) Fritz, H.-G.: Innovative Polymerwerkstoffe unter Einbeziehung nachwachsender Rohstoffe. Tagungsband zum 1. Internatio-

- nenen Symposium, Rudolstadt, 3./4.9.1997, "Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen" (Hrsg. Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V.).
- (20) Aichholzer, W.:  
Bioabbaubare Faserverbundwerkstoffe auf der Basis nachwachsender Rohstoffe. Tagungsband zum 1. Internationalen Symposium, Rudolstadt, 3./4.9.1997, "Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen" (Hrsg. Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V.).
- (21) Bastioli, C.:  
Starch based bioplastics: Properties, applications and future perspectives. Tagungsband zum Symposium, Würzburg, 11./12.2.1998, "Biologisch abbaubare Werkstoffe (BAW)".
- (22) Rappthel, I.; Kakuschke, R.:  
Entwicklungen und Eigenschaften von Sconacell A als vollständig abbaubare Kunststoffe auf Basis teilacetylierter Naturstärke. Tagungsband zum 1. Internationalen Symposium, Rudolstadt, 3./4.9.1997, "Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen" (Hrsg. Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V.).
- (23) N.N.:  
Bioceta – Biologisch abbaubares Zellulosediacetat. Kunststoff + Kautschuk Produkte 97/98, Jahreshandbuch der Verarbeiter, Recyclingbetriebe, Zulieferer und Ausstatter, Verlag Hoppenstedt, Darmstadt Oktober 1997, S. 176-177.
- (24) Eicher, T.; Fischer, W.:  
Zelluloseester. Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 4. Auflage, Bd. 9, Verlag Chemie, Weinheim 1975, S. 227-246.
- (25) Kuhne, K.:  
Neue Thermoplaste auf Zellulosebasis. In : Proceedings of the symposium, Kassel, 29.06.-30.06.98, "International Wood and Natural Fibre Composites Symposium" (Hrsg. Universität Gesamthochschule Kassel), lecture 13.
- (26) Schack; D.:  
Polyhydroxybutyrat/valerat Copolymere. Tagungsband zum Symposium, Würzburg, 11./12.2.1998, "Biologisch abbaubare Werkstoffe (BAW)".
- (27) Scherzer, D.:  
Pflanzenfaserverstärkte Polyurethanschäume in industriellen Anwendungsbereichen. In: Branchendialog, Mainz, Juni 1997, "Neue Produkte aus pflanzlichen Fasern" (Hrsg. Bildungsseminar für die Agrarverwaltung Rheinland-Pfalz).
- (28) Utz, H.:  
Bioabbaubare Kunststoffe im Verpackungsbereich. Tagungsband zum Symposium Nr. 16105/56.253, Esslingen, 19./20.11.1992, "Biologisch abbaubare Kunststoffe".
- (29) Fritz, H.-G.; Seidenstücker, T.; Bölz, U.; Juza, M.; Schroeter, J.; Endres, H.-J.:  
Study on production of thermoplastics and fibres based on mainly biological materials. EUR 16102, Directorate-General XII Science, Research and Development, 1994.
- (30) Witt, U.; Müller, R.-J.; Klein, J.:  
Biologisch abbaubare Polymere, Studie des Franz-Patat-Zentrums für Polymerforschung e. V., Braunschweig 1997.
- (31) Herrmann, A. S.; Nickel, J.; Riedel, U.:  
Construction materials based upon biologically renewable resources – from components to finished parts. Polymer Degradation and Stability 59 (1998) 251–261.
- (32) Riedel, U., Nickel, J.:  
Natural fibre-reinforced biopolymers as construction materials - new discoveries. In: Die Angewandte Makromolekulare Chemie, Vol 272, (1999), S. 34-40.
- (33) Riedel, U.:  
Entwicklung und Charakterisierung von Faserverbundwerkstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe.

Fortschritt -Berichte VDI, 5, 575,  
(1999). – Dissertation

- (34) Riedel, U., Gensewich, C.: Pultrusion  
von Konstruktionswerkstoffen aus  
nachwachsenden Rohstoffen. In: Die  
Angewandte Makromolekulare Chemie,  
Vol 272, (1999), S. 11-16.