



Jörg Nickel
(Vortragender)

Prof. Frithjof Meinel
Stefanie Pranghofer

Synergien zwischen BioVerbund-Forschung und Produktdesign

Charakterisierung des Referates:

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit den gestalterischen Aspekten der naturfaserverstärkten Biopolymere / BioVerbundwerkstoffe vor dem Hintergrund der gegenwärtigen technischen, wirtschaftlichen und politischen Möglichkeiten und Grenzen und präsentiert Ergebnisse der erfolgreichen Zusammenarbeit zwischen Werkstoffforschung und Industriedesign.

Synergy effects – biocomposites research and product design

Characterisation of the paper:

This paper deals with design aspects of natural fibre reinforced biopolymers / biocomposites against the background of current technical, economical, and political options and restrictions and presents results of the successful cooperation of materials research and industrial design.

Kurzfassung

Ausgehend von einem Überblick über naturfaserverstärkte Biopolymere – kurz BioVerbundwerkstoffe – sowie ihre aktuellen technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten und Grenzen befasst sich der vorliegende Beitrag mit dem Werkstoff unter gestalterischen Gesichtspunkten. Präsentiert werden Ergebnisse der erfolgreichen Zusammenarbeit zwischen Werkstoffforschung und Industriedesign. So wurden im Rahmen einer Kooperation zwischen DLR und Burg Giebichenstein – Hochschule für Kunst und Design Halle – nicht nur schutzfähige Ideen geboren, sondern auch Prototypen entwickelt, die auf internationalen Fachmessen Beachtung fanden und mit Preisen ausgezeichnet wurden (AVK-TV Innovationspreis 2002, MATERIALICA Design Award 2003). Aktuelle Ergebnisse z.B. im Bereich lösbarer Verbindungen sowie akustische Anwendungen werden vorgestellt und Zielrichtungen für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aufgezeigt.

Abstract

Based on a survey of natural fibre reinforced biopolymers (biocomposites) as well as ongoing technical and economical options and restrictions, this paper deals with the material mainly regarding aspects of design. Results of the successful cooperation of materials research and industrial design are being presented. Within the collaboration of DLR and Burg Giebichenstein – University of Art and Design Halle, not only patentable ideas were developed, but prototypes were realised that have highly been recognised on international trade fairs and have been awarded prizes (AVK-TV Innovation Prize 2002, MATERIALICA Design Award 2003). New results e.g. in the field of detachable joints as well as acoustic applications are being presented and objectives of further research and development are being pointed out.

Synergien zwischen BioVerbund-Forschung und Produktdesign

1. Einführung

Naturfaserverstärkte Kunststoffe auf petrochemischer Polymergrundlage werden seit Jahren in großen Mengen erfolgreich in der Automobilindustrie eingesetzt. Sie dienen hier vorwiegend als kaschierter und damit unsichtbarer Trägerwerkstoff für Interieurbauteile. Zu dieser Entwicklung beigetragen haben u.a. die guten Werkstoffeigenschaften für den vorliegenden Anwendungsfall und die Wirtschaftlichkeit der verwendeten Naturfasern und Polymere. Hervorzuheben ist außerdem die positive Umweltbilanz, die sich aus der nachwachsenden Rohstoffkomponente der Naturfasern und den möglichen Gewichts- und damit Kraftstoffeinsparungen infolge der hohen Festigkeits- und Steifigkeitswerte bei geringer Dichte ergibt.

Letztere lässt sich bei Nutzung nachwachsender Rohstoffe – sogenannter Biopolymere – auch für die Matrixsysteme, in welche die Naturfasern eingebettet werden, erheblich verbessern. Dieser nachhaltige Ansatz ist aktuell aufgrund der höheren Rohstoffpreise mit Kostennachteilen verbunden, die mit wenigen Ausnahmen (DLR/INVENT-Entwicklungen: Arbeitsschutzhelm, zusammen mit Fa. Schuberth, Braunschweig; Schienenfahrzeuginterieur im Vorserieneinsatz, zusammen mit Fa. ALSTOM/LHB, Salzgitter) gegenwärtig einer weiteren Verbreitung naturfaserverstärkter Biopolymere in technisch-wirtschaftlichen Anwendungen entgegenstehen.

Dabei verfügen die naturfaserverstärkten Biopolymere – auch als BioVerbund bezeichnet – über besondere Eigenschaften im Hinblick auf die Materialästhetik, optische (Sichtflächen) und haptische Qualitäten sowie Freiheitsgrade und Möglichkeiten in der Gestaltung, die sie für Anwendungen im Produktdesign prädestinieren, die Eigenständigkeit dieses Werkstoffs herausstellen und gegen das Ersatzstoffimage antreten lassen. Dieses Innovationspotential für verschiedene Anwendungen zu nutzen und kreativ und gewinnbringend in Industriekooperationen umzusetzen, ist Ziel der mehrjährigen intensiven Zusammenarbeit zwischen dem DLR Institut für Strukturmechanik und der Burg Giebichenstein.

2. Überblick über bisherige BioVerbund-Forschungsaktivitäten und Entwicklungen

Faserverstärkte Kunststoffe wurden ursprünglich vor allem in der Luft- und Raumfahrttechnologie eingesetzt. Mittlerweile finden diese Werkstoffe jedoch zunehmend Eingang in zahlreiche andere technische Leichtbauanwendungen. Die guten spezifischen, d.h. gewichtsbezogenen Eigenschaften sind auf die geringen Dichten der verwendeten Matrixsysteme (z.B. ungesättigte Polyester-, Polyurethan-, Phenol- oder Epoxidharze und die darin eingebetteten hochfesten und hochsteifen Verstärkungsfasern (aus Glas, Aramid oder Kohlenstoff) zurückzuführen. Weitere Vorteile ergeben sich aus der Möglichkeit, Faserverbundbauteile während der Herstellung auf die spezifischen Anforderungen maßzuschneidern, indem die Verstärkungsfasern in Lastrichtung angeordnet werden.

Klassische Faserverbundwerkstoffe bereiten jedoch oftmals große Probleme bei Wiederverwendung oder Recycling am Ende ihrer Nutzungsdauer. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der Verbund aus verschiedenen und üblicherweise sehr beständigen Fasern und Matrices besteht. Die Deponierung bietet hier keine Alternative, da das wachsende Umweltbewusstsein immer strengere Gesetze und Regelungen zur Folge hat (z.B. Verpackungsverordnung, Kreislaufwirtschaftsgesetz, 1991). Umweltfreundliche Alternativen werden untersucht und erforscht, wie zum Beispiel die Rohstoffrückgewinnung, CO₂-neutrale thermische Verwertung oder biologischer Abbau in bestimmten Fällen.

Faserverbundwerkstoffe aus vollständig nachwachsender Rohstoffquelle stellen hier einen interessanten Ansatz dar, um den o.g. Anforderungen zu begegnen. Diese BioVerbundwerkstoffe bestehen aus gerichteten oder ungerichteten natürlichen Verstärkungsfasern, die in sogenannte Biopolymere eingebettet werden. Die Entwicklung schließt auch ökonomisch und ökologisch verträgliche Fertigungstechnologien ein. All diese Aspekte sind seit 1989 Forschungsthema am DLR Institut für Strukturmechanik.

In BioVerbundwerkstoffen müssen – wie in jedem anderen Faserverbundwerkstoff – die Verstärkungsfasern eine hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit aufweisen, während die umgebende Matrix die Form der Struktur gewährleistet, die Schubkräfte zwischen den Fasern überträgt und diese vor Strahlungseinflüssen und aggressiven Medien schützt. Die Auswahl geeigneter Fasern wird bestimmt durch die Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen an den Verbundwerkstoff [1-3]. Weitere Kriterien für die Auswahl geeigneter Verstärkungsfasern sind zum Beispiel die Bruchdehnung, Wärmestabilität, Faser-Matrix-Haftung, dynamisches und Langzeitverhalten, Preis und Herstellungskosten.

Naturfasern können eingeteilt werden in pflanzliche, tierische und mineralische Fasern. Alle Pflanzenfasern (z.B. Baumwolle, Flachs, Hanf, Jute etc.) sind aus Zellulose aufgebaut, während sich Fasern tierischen Ursprungs aus Proteinen zusammensetzen (z.B. Haare, Seiden, Wollen). Pflanzenfasern lassen sich abhängig von ihrer Herkunft wiederum untergliedern in Bast- und Blattfasern sowie Samenhaare [4-7, 17]. Bei Betrachtung des Potentials von Naturfasern im Hinblick auf ihre Verwendung in Verbundwerkstoffen und beim Vergleich von Zugfestigkeit, Steifigkeit und Bruchdehnung zeigt sich, dass beispielsweise Hanf-, Flachs- und Ramiefasern mit E-Glasfasern (Al-B-Silikatglas) [5], die wegen ihrer großen Bedeutung in der Faserverbundtechnologie als Referenz dienen, erfolgreich konkurrieren können [6].

Für die Herstellung von BioVerbundwerkstoffen sind Polymere und Grundbausteine erforderlich, die vorwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen und deshalb als Biopolymere bezeichnet werden. Ähnlich wie bei Polymeren petrochemischen Ursprungs werden Biopolymere (ohne Berücksichtigung von Elastomeren) in Duroplaste und Thermoplaste unterteilt, die sich beide als Matrixsysteme für BioVerbundwerkstoffe eignen [7-9]. Ausgehend von thermoplastisch zu verarbeitenden und biologisch abbaubaren Matrices mit begrenzten Eigenschaften wurden duroplastische Matrixsysteme entwickelt mit dem Ziel, Verarbeitungseigenschaften, Kennwerte und Beständigkeiten wie bei petrochemischen Duroplasten zu gewährleisten bei einem höchstmöglichem Anteil nachwachsender Rohstoffe [10-12]. Mit ihrem guten Eigenschaftsprofil und der Option einer weitgehend CO₂-neutralen thermischen oder stofflichen Verwertung z.B. Methanolgewinnung, bieten diese Werkstoffe für bestimmte Anwendungen eine umweltverträgliche und nachhaltige Alternative zu petrochemischen glasfaserverstärkten Kunststoffen.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an naturfaserverstärkten Biopolymeren werden erfolgreich fortgesetzt. Wesentliche Förderprojekte (Nds. Wirtschafts- bzw. Landwirtschaftsministerium, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe FNR) zur Weiterentwicklung des Werkstoffes wurden im Rahmen von Industriekooperationen durchgeführt, von denen nachfolgend die wichtigsten genannt seien.

- Sitzschale für Bürostühle, Thermoplast, bioabbaubar, Partner: Fa. Wilkhahn, Umweltpreis der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für Wilkhahn)
- Türseitenverkleidung, Thermoplast, bioabbaubar, 100 % nachwachsende Rohstoffe, Partner: Johnson Controls Interiors,
- Pultrudierte Federleisten für Bettlattenroste, div. biobasierte Matrices, Partner Fa. Thomas Technik & Innovation,
- Neue pflanzenölbasierte Duroplaste, Partner: Fa. COGNIS
- Industrieschutzhelme, Partner: Fa. Schubert Helme GmbH, IHK-Technologietransferpreis 2000, Markteinführung seit Beginn 2004: Ein besonders eindrucksvolles Beispiel für die Leistungsfähigkeit des BioVerbundes ist ein Industrieschutzhelm (Abb. 1), der gemeinsam mit den Partnern INVENT GmbH und Schubert Helme GmbH im Rahmen eines vom niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geförderten Projekts entwickelt worden ist. Das hervorragende Ergebnis wurde von der Industrie- und Handelskammer Braunschweig mit dem IHK-Technologietransferpreis 2000 ausgezeichnet.



Abb. 1: BioVerbund-Industrieschutzhelm

Der Industrieschutzhelm besteht zu etwa 85 % aus nachwachsenden Rohstoffen. Mit der verwendeten Baumwolle/Flachfaserverstärkung und dem pflanzenölbasierten Matrixsystem erfüllen die BioVerbund-Helmschalen die Anforderungen der maßgebenden Norm DIN EN 397 und übertreffen diese sogar. Der optimierte Lagenaufbau sowie die geringere Dichte der Naturfasern reduzieren das Gewicht der Helmschalen um etwa 10 % gegenüber der Referenz bei deutlich gesteigertem Tragekomfort. Ein verbessertes Herstellungsverfahren gewährleistet Produktivität und Qualität in der jetzt angelaufenen Serienfertigung der ersten 10.000 Helme. Seit Jahresbeginn 2004 sind die Produkte am Markt zum gleichen Preis wie die petrochemische Konkurrenz verfügbar, bieten aber wesentliche ökologische Vorteile bei Produktion, Nutzung und Entsorgung.

- Luftsäulenverkleidung für Konzeptstudie „LIREX“ (Leichter Innovativer Regional-EXpress, Fa. ALSTOM LHB) Gewährleistung des Brandschutzes mit halogenfreien Flammschutzmitteln (DIN 5510–1, S4, SR2, ST2)
- In einem ebenfalls geförderten Folgeprojekt ist mit der Fertigung von Sitzkasten- und Rückwandverkleidungen für fünf Nahverkehrszüge der Baureihe DT4 (Fa. ALSTOM LHB) die Weiterführung in eine Kleinserie gelungen, die sich zurzeit bei der Hamburger Hochbahn im rauen Alltagsbetrieb erfolgreich bewährt (Abb. 2). Außerdem konnte eine Gewichtseinsparung von 30 % gegenüber glasfaserverstärkten Kunststoffen erzielt werden. Damit ist neben dem Industrieschutzhelm ein zweites BioVerbundprodukt eingeführt.



Abb. 2: Sitzkastenverkleidung

Am DLR Institut für Strukturmechanik werden Fertigungstechnologien zur Herstellung von BioVerbundwerkstoffen entwickelt, analysiert und optimiert, die auf bewährten Verfahren der Faserverbundtechnologie beruhen. Dies sind im besonderen Press-, Handlaminier-, Faserwickel- und Harzinjektionsverfahren (differential pressure resin transfer moulding (DP-RTM), single line injection moulding (SLI) entwickelt am Institut für Strukturmechanik [13]) und die Pultrusion [14], die mit nur geringen Modifikationen zur Herstellung von Bauteilen getestet werden. Unidirektionale (UD) faserverstärkte Lamine oder Gelege kommen zum Einsatz um die Anisotropie von Faserverbundwerkstoffen zu nutzen. Vliesstoffe werden bei geringeren Anforderungen an die mechanischen Kennwerte verwendet. Für kurzfaserverstärkte Bauteile sind generell Spritzgießverfahren anwendbar. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die derzeit zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren:

Technologie	Beispiele, allgemein	Designbeispiele
Pressverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Türseitenverkleidungen, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Regal • h.l.p. handschmeichelndes Imageprodukt • Lautsprecher • Werkstoffscharnier
Harzinjektionsverfahren (LRI) / prototypische Simulation von Nasspressverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Hochleistungsflugzeugteile 	<ul style="list-style-type: none"> • Hocker (prototypisch) • Tisch (Eindhoven, prototypisch)
Pultrusion	<ul style="list-style-type: none"> • Stäbe, Profile, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Möbelbau • Stab(fach)werke
Faserwickeltechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Hochbeanspruchte Bauteile • Behälter • Biegebalken 	<ul style="list-style-type: none"> • Violine
Spritzgießverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexe Teile 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbinder
Handlaminieren (mit gewissen Einschränkungen)	<ul style="list-style-type: none"> • Verkleidungsteile geringer Stückzahl (z.B. Eisenbahnfahrzeugbau) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hartschalen-Rucksack mit Snowboard

Tab. 1: Übersicht Fertigungsverfahren für BioVerbundwerkstoffe

3. Zwischenbilanz

Erfahrungen zeigen, dass BioVerbundwerkstoffe mit Ausnahme extremer Umweltbedingungen sehr gut für Anwendungen geeignet sind, die heute von glasfaserverstärkten Kunststoffen beherrscht werden. Dies sind vor allem Verkleidungsteile im Automobil- und Waggonbau, die Möbel- und Freizeitindustrie. Der relativ hohe Preis der pflanzenölbasierten Matrices begrenzt u.a. derzeit noch die Markteinführung weiterer Produkte. Um das Werkstoffpotential auszuschöpfen, sind weitere Forschungsaktivitäten hinsichtlich Fertigungstechnologie und Optimierung der Komponenten erforderlich. Neue Produkte sowie günstigere umweltpolitische Rahmenbedingungen lassen eine Erhöhung der Marktakzeptanz und die Erschließung neuer Märkte erwarten.

4. Neue Ansätze – BioVerbundwerkstoffe unter Design-Aspekten

In einem interdisziplinären Ansatz werden daher zusammen mit der Burg Giebichenstein Produkte entwickelt, die nicht nur die Werkstoffkennwerte berücksichtigen, sondern auch gestalterische Aspekte einbeziehen. Dabei wurden neue und bisher so nicht in Anwendungen erprobte Werkstoffvarianten in gebrauchsbasiert gestalteten Produkten untersucht. Aus Produkt- und Prozessszenarien resultierende Anforderungen an die Materialeigenschaften lieferten neue Forschungsimpulse für die Werkstoffentwicklung. Die sich daraus ergebenden Synergien führten zur Optimierung ausgewählter Werkstoffeigenschaften. In Anerkennung dieser erfolgreichen Kooperation zwischen Werkstoffforschung und Industriedesign wurde beispielsweise das daraus entstandene h.l.p –

handschmeichelnde Imageprodukt zur Kommunikation des BioVerbundwerkstoffs mit dem AVK-TV Innovationspreis 2002 ausgezeichnet; dem BioVerbund-Hocker wurde der MATERIALICA Design Award 2003 verliehen.

Regal aus gespannten Flächen

Eine wirtschaftliche Technologie, mit der sich Produkte aus BioVerbundwerkstoffen konstituieren lassen, ist das Heißpressen von Platten. Das hier vorgestellte Leichtbauregal (Abb. 3) nutzt deren hohen Elastizitätsmodul. Quadratische Plattenzuschnitte, die mittels Profilstäben sphärisch verspannt werden, bilden in einander gesteckte Kuben. Das Raster orientiert sich an Büchern und Ordnern, es kann in horizontaler und vertikaler Richtung nahezu beliebig erweitert werden [18].



Abb. 3: Regal aus sphärisch verspannten Platten

h.I.p. – handschmeichelndes Imageprodukt

Naturfaserverstärkte Biopolymere – kurz BioVerbundwerkstoffe – ihre Eigenschaften, ihr Potential begreifen, zum Nachdenken anregen, Bewusstsein bilden, neue Anwendungen und Absatzmärkte finden – und all dies mit einem „Produkt“, das gleichzeitig eine konkrete, auch materielle Funktion, aber eben noch viel mehr und obendrein neu und originell bietet – so ähnlich, aber noch lange nicht allumfassend, ließe sich die Aufgabe für ein Imageprodukt aus BioVerbund definieren.

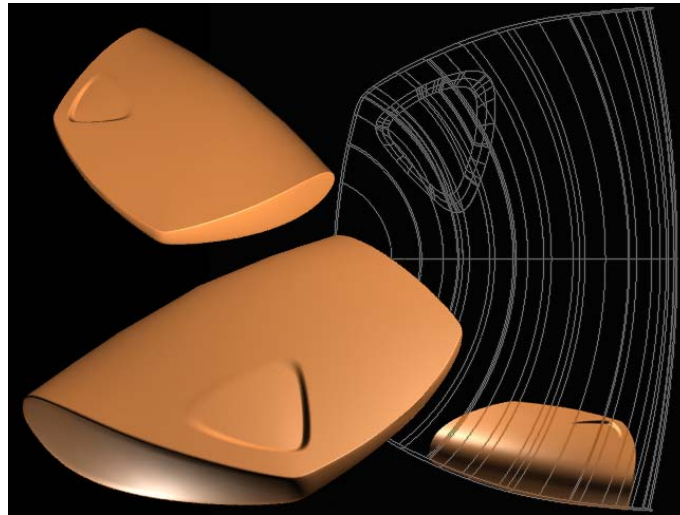


Abb. 4: h.i.p. handschmeichelndes Imageprodukt

Ergebnis der Zusammenarbeit zwischen dem DLR Institut für Strukturmechanik und der Burg Giebichenstein ist das **handschmeichelnde Imageprodukt** (Abb. 4, 5), bestehend aus zwei geometrisch identischen, im Nasspressverfahren hergestellten Formhälften, dazwischen eine Schnapp-Halterung zur Aufnahme einer ebenfalls im Rahmen der Kooperation gestalteten CD-ROM mit audiovisuellen Informationen zum Werkstoff. Das Gehäuse lässt sich gern anfassen, dazu ist es als „Handschmeichler“ geformt. Neben seiner Funktion als CD-Träger steht es beispielhaft für beliebige „Gehäuse“ wie z. B. Handy, tragbare CD- oder MP3-Spieler, PDA, etc. und macht so über sein Dasein als „Designprodukt“ hinaus den Werkstoff für vielfältige technische Anwendungen interessant. Der Betrachter kann das Material auf diese Weise mit allen Sinnen erfahren und begreifen und wird über die enthaltene direkte und indirekte Information hinaus angeregt, neue Anwendungen zu finden bzw. über bestimmte Werkstoffigenschaften neu nachzudenken.



Abb. 5: h.i.p. mit textilen Intarsien und Demo-CD

So weisen z.B. während des Fertigungsprozesses integrierte textile und graphische Strukturen gezielt auf die vielfältigen Möglichkeiten der Oberflächengestaltung hin. Da es sich um naturstoffbasierte Werkstoffe handelt, sind Abnutzungserscheinungen, die Ausbildung einer Patina, bewusst einkalkuliert. Bei Leder, Naturprodukten allgemein, steigern derartige Effekte gar den persönli-

chen Bezug; bei technischen Produkten hingegen wird bisher zumeist nur das perfekte Finish, das möglichst lange wie neu erscheinen muss, akzeptiert. Diese Tatsache bietet wiederum Ansatzpunkte für neue Produktüberlegungen.

Nach dem Abschluss des Projektes im Februar 2002 wurden Kleinserien von 120 Exemplaren dieser Imageprodukte und 1000 CD-ROM angefertigt und erstmals dem Fachpublikum auf der Hannover-Messe Industrie 2002 präsentiert. Dabei dient die CD-ROM als „Give-Away“ für interessierte Besucher, während die komplette Einheit wegen derzeit begrenzter Stückzahl potentiellen Kunden vorbehalten blieb. Parallel dazu wurden ausgewählte Imageprodukte in einer Vitrine ansprechend präsentiert. Die Resonanz des Fachpublikums war sehr positiv, was sich bei den Messekontakten deutlich gezeigt hat. Nun gilt es, die gefundenen Erkenntnisse weiter umzusetzen und auf konkrete Produkte auszudehnen.

Hocker

Nach der Identifikation der designrelevanten Parameter des Pressverfahrens entwarf eine Diplomandin ein Produkt, das nicht nur die Möglichkeiten der Formgebung und die ästhetischen Qualitäten des Werkstoffs zeigt sondern auch komplexe Gebrauchseigenschaften aufweist. Die Diplomandin untersuchte zunächst breite Gestaltungsmöglichkeiten der Oberflächen, um schließlich mit einem archetypischen Sitzmöbel die Festigkeitswerte des Werkstoffs unter dem Gesichtspunkt Leichtbau unter Beweis zu stellen. Der so entworfene Hocker (Abb. 6) musste dazu im DP-RTM (Differential-Pressure Resin Transfer Moulding) Verfahren in einem Autoklavprozess hergestellt werden. Dieses stellt auch ein ideales Verfahren für die Kleinserien- oder Prototypenfertigung und sogar zur Modellierung des Pressverfahrens dar, da es nur eine Formhälfte erfordert, die nicht besonders steif sein muss und z.B. aus Glasfaserverbundwerkstoff hergestellt werden kann, weil der Druck im Autoklaven die Form stabilisiert. Daher konnte die Form auf einfache Weise von der Studentin selbst hergestellt werden und war sehr kostengünstig, lieferte aber dennoch qualifizierte Ergebnisse und Prototypen.



Abb. 6: Hocker mit differenzierten Oberflächen

Mit diesen Prototypen und zahlreichen Oberflächenproben konnten Kontakte zu Firmen und Forschungsinstituten geknüpft, ein breites Messepublikum erreicht (MATERIALICA 2003, EUROMOLD 2003) (Abb. 7) und ein wirksames Presseecho erzeugt werden [19].



Abb. 7: Die Autorin auf der Materialica 2003 in München

Arbeits Tisch

Ein besonders unkonventionelles Beispiel aus einem Projekt mit Studierenden des Industrial Design der Technischen Universität Eindhoven stellt der Arbeitsplatz (Abb. 8) dar, bei dem eine Person in stark nach vorn geneigtem Winkel drehbar über der kreisförmigen Arbeitsfläche schwebt. Abgesehen von dem innovativen ergonomischen Konzept hat dieser Entwurf bei einem Wettbewerb deshalb Aufmerksamkeit erregt, weil nahezu alle Fertigungstechnologien, die das DLR nutzt, in den verschiedenen Komponenten vorkommen: Sandwichtischplatte, gepresste Tischplattenstützen und Körperkontaktflächen in zweidimensionaler Verformung, vakuuminjiziertes Mittelteil und pultrudiertes Rohr zur ergonomischen Anpassung.



Abb. 8: Arbeitsplatz für schwebende Position (Maßstabsmodell)

Lautsprecherbox

Akustische Messungen haben der Werkstoffklasse BioVerbund sehr gute Resonanz- und Dämpfungseigenschaften bescheinigt. Das liegt unter anderem an der Hohlfaserstruktur sowie an der Spezifik des Grenzflächensystems aus Matrix und Faser. Damit ist der Werkstoff prädestiniert für Zwecke der Raumakustik, der Schall- und Geräuschdämmung oder der Gehäusebildung für elektroakustische Wandler. Wenn die gesteuerte Matrix das Faservlies nur teilweise durchdringt, dann ergibt sich ein asymmetrischer Integralwerkstoff mit einer geschlossenen Tonmöbeloberfläche und einer Innenseite, die hohe Dämpfungseigenschaften aufweist [15]. Eine Anwendung signalisiert die Lautsprecherbox 'AURIS' (Abb. 9), ein Hornstrahler mit gekrümmter Resonanz- und Dämpf-

fungszone. Die Herausforderung an die Werkstoffwissenschaftler besteht in der Entwicklung einer industrietauglichen Technologie, die über den Labormaßstab hinaus geht, in dem heute unter Schwerkraftausnutzung Integralmaterial prototypisch erzeugt werden kann.

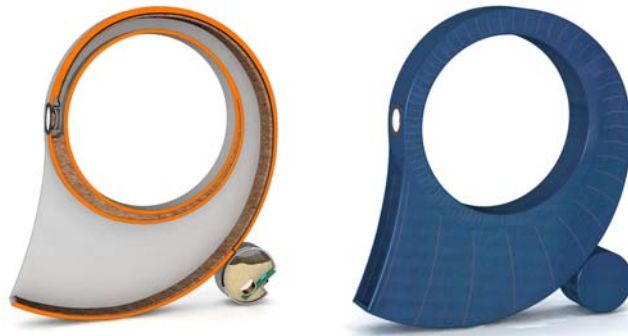


Abb. 9: Schnitt und Ansicht der Lautsprecherbox aus Integralmaterial

Verbinder mit Werkstoffscharnier

Für den Hersteller und Vertreiber InVIDO, der mit CNC-Technologien Möbel nach Maß herstellt, wurde ein kraftschlüssig wirkendes Konstruktionselement (Abb. 10) entworfen, das ein Zargensystem mit den genuteten und durchbrochenen Rück- und Deckflächen verbindet. Der Verbinder weist steife aber auch flexible Bereiche auf, wodurch ein so genanntes Werkstoffscharnier entsteht. Dazu ist – ähnlich der Laussprecherbox – eine Zone ohne bzw. mit reduzierter Matrix im gerichteten Faserverbund notwendig. Das Materialscharnier muss eine deutlich bessere Kraftübertragung gewährleisten als Filmscharniere in konventionellen unverstärkten Spritzgussteilen.



Abb. 10: Klemmverbinder mit Werkstoffscharnier

Verbinder 'junctio'

Dieser Verbinder (Abb. 11) ist eine beispielhafte Anwendung des Hanf-Polypropylen-Verbundwerkstoffes, die in Zusammenarbeit mit der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und mittelständischer Unternehmen entwickelt wurde [16]. Spritzgusstechnisch hergestellt, dient er im handwerklichen wie im semiprofessionellen Bereich der lösbaren Verbindung von Bauteilen aus Holz oder BioVerbund. Besonders gelungen ist an diesem Verbinder die weitgehende Umwandlung aller auf die Verbindung wirkenden Belastungen in Zugkräfte, da die Zugfestigkeit einen herausragenden Kennwert faserverstärkter Kunststoffe darstellt.



Abb. 11: Funktion des Verbinders 'junctio'

Eingang fand der Verbinder in ein Computerdisplay (Abb. 12) zur Kommunikation der Forschungsergebnisse auf Messen und Ausstellungen. Aus Buchenvoll- und Sperrholz hergestellt, enthält dieses Demonstrationsmöbel keine Metallteile und ist dennoch für Transport und Wiederaufstellung zu zerlegen.



Abb. 12: Computerdisplay zur Demonstration der Leistungsfähigkeit des Verbinders

5. Perspektiven

In Anbetracht der Ergebnisse aus Forschungs- und Entwicklungsprojekten wird deutlich, welche Herausforderung es darstellt, neue Werkstoffe am Markt zu platzieren. Es erwies sich als extrem schwierig, auch nur einige der heute verwendeten Werkstoffe in konventionellen Produkten zu substituieren. Deshalb setzt das interdisziplinäre Entwicklerteam darauf, Innovationen in solchen Unternehmen anzusiedeln, die flexible Technologien einsetzen oder mit zukunftsfähigen Fertigungsparadigmen arbeiten wie beispielsweise Mass Customisation. Diese Unternehmensmodelle erfordern die Kooperation anderer Akteure in neuen Netzwerken und betreiben intensiven Austausch zwischen Hersteller und Nutzer. Dort herrscht auch ein kreatives Klima für Erfindungen und vorbildlose Gestaltentwürfe, da diese neuen Anbieter am Markt Aufmerksamkeit erzeugen müssen und dies mit Hilfe ihrer elektronischen Kommunikationsmittel auch können.

Unter Berücksichtigung der zunehmenden Rücknahmeverpflichtungen (bes. der EU-Altauto-Verordnung, 2000) ergeben sich erhebliche Chancen für den Einsatz von BioVerbundwerkstoffen in marktfähigen Produkten. Politische Rahmenbedingungen sind auf der einen Seite hilfreich, aber auf der anderen Seite ziehen auch die Hersteller die Gesamtsystemkosten zunehmend in Betracht.

Die Schlussfolgerung lautet daher, die Forschung aktiv in die Veränderung der Rahmenbedingungen auf allen Ebenen einzubeziehen, um dieser neuen Werkstoffklasse zum Erfolg zu verhelfen. Zusätzlich werden neue Anwendungen für BioVerbundwerkstoffe erschlossen, in denen alle Qualitätsdimensionen zum Tragen kommen, also nicht nur die technischen Kennwerte, sondern auch die sinnlich wahrnehmbaren Eigenschaften der vielfältig gestaltbaren Oberflächen. Solche Anwendungen ergeben sich zum Beispiel in Möbeln und in anderen Bauteilen, die auch für Außenanwendungen geeignet sind. Darüber hinaus müssen Fertigungstechnologien kostengünstig gestaltet werden, um die Marktchancen über einen konkurrenzfähigen Werkstoffpreis beträchtlich zu vergrößern.

1. Introduction

For many years natural fibre reinforced polymers on a petrochemical basis have been used successfully and in large quantities in the automotive industry. As they are predominantly used for interior panelling elements, they serve as an invisible base material. Among other factors, this development can be attributed to their good material properties with respect to the above mentioned use

as well as the economic efficiency of the natural fibres and polymers processed. In this context special emphasis lies on their positive properties with regard to the environment: One of the two components of a biocomposite comes from renewable resources and the biocomposites' high strength and stiffness and at the same time low density enable weight saving and consequently fuel saving.

By using renewable resources (i.e. so-called biopolymers) the environmental balance sheet can also be considerably improved for the matrix systems in which the natural fibres are embedded. Currently, however, the disadvantage of this sustainable approach lies in the higher prices for raw materials. For this reason, the use of natural fibre reinforced biopolymers in technical and/or economic applications is currently restricted to only a few exceptions, e.g. developments by DLR/INVENT (industrial safety helmets in cooperation with Schuberth Helme GmbH in Brunswick and interior panelling elements for rail vehicles in pre-series production in cooperation with ALSTOM/LHB in Salzgitter).

Apart from this disadvantage, natural fibre reinforced biopolymers (also referred to as biocomposites) have special properties with regard to the material's aesthetic, optical qualities (visible surfaces) and haptic qualities as well as its design potential and the flexibility to tailor the material for its intended use. These properties make them the ideal candidate for applications in product design, place special emphasis on the material's independent presence and contradict its image as a mere "replacement material". For several years the objective of the intensive cooperation between the DLR Institute of Structural Mechanics and Burg Giebichenstein has been to use this innovation potential for various applications and to open the door to creative and profitable cooperation with industrial companies.

2. Survey of Previous Research Activities and Development on Biocomposites

Aerospace technology is the original application range of fibre reinforced polymers (FRP). In the meantime, however, these materials are also being used in numerous technical lightweight applications. The good specific, i.e. weight-related properties are due to the low densities of the applied matrix systems (e.g. unsaturated polyesters, polyurethanes, phenolic or epoxy resins) and to the embedded high-strength and high-modulus fibres (from glass, aramid or carbon). Further benefits result from the option to tailor a composite part to specific demands during production by orientating the reinforcing fibres in the load directions.

Classic fibre reinforced polymers, however, often cause considerable problems in terms of re-use or recycling at the end of their lifetimes, which are mainly due to the compound of miscellaneous and usually very stable fibres and matrices. A simple landfill disposal is no longer an option when regarding the increasing environmental sensitivity resulting in laws and regulations (e.g. "Regulation for the Prevention of Packaging Waste", "Recycling and Waste Management Law", 1991). Eco-friendly alternatives are being explored and examined such as the recovery of raw materials (e.g. gasification to methanol), CO₂-neutral thermal utilization, or biodegradation in certain circumstances.

An interesting option to meet these demands may be given by composite materials which are completely made from renewable resources and are therefore called biocomposites. They consist of directed or undirected natural reinforcing fibres embedded in so-called biopolymers. Economically and ecologically acceptable manufacturing technologies are involved as well. These are all subjects of current research at the DLR Institute of Structural Mechanics since 1989.

In biocomposites as well as in any other fibre composite materials the reinforcing fibres have to show a high tensile strength and stiffness, whereas the embedding matrix provides the shape of the composite structure, transmits the shear forces between the fibers, and protects them against radiation and aggressive media. The selection of suitable fibres is determined by the required values of the stiffness and tensile strength of a composite [1-3]. Further criteria for the choice of suitable reinforcing fibres are e.g. elongation at failure, thermal stability, adhesion of fibres and matrix, dynamic and long-term behaviour, price, and processing costs.

Natural fibres can be subdivided into vegetable, animal, and mineral fibres. All vegetable fibres (e.g. cotton, flax, hemp, jute, etc.) are composed of cellulose, whereas fibres of animal origin consist of proteins (e.g. hair, silk, wool). Vegetable fibres can be generally classified as bast, leaf, or seed-hair fibres, depending on their origin [4-7, 17]. When considering the potentials of natural fibres for composites and comparing the tensile strength, elasticity, and elongation at failure of both natural and synthetic fibres, it is obvious that especially hemp, flax, and ramie fibres can compete with E-glass fibres (Al-B-silicate glass [5]) that serve as a reference because of their great importance in composite technology [6].

For manufacturing biocomposites, polymers and their basic parts are required, which are predominantly made of renewable resources, and therefore are termed biopolymers. Similar to polymers of petrochemical origin, biopolymers (without considering elastomers) are subdivided into thermosets and thermoplastics, both suitable as matrix systems for biocomposites [7-9]. On the basis of matrices which can be processed like thermoplastics, are biodegradable and have limited properties, thermoset matrix systems were developed with the aim of ensuring the same processing and characteristic properties and stability as petrochemical thermosets, while using the maximum possible share of renewable resources [10-12]. Due to their good property profile and the opportunity of thermal recovery or recovery options such as gasification to methanol, to a very high degree CO₂ neutral, these materials offer an ecologically acceptable and sustainable alternative to petrochemical glass fibre reinforced polymers for certain applications.

Research and development for natural fibre reinforced biopolymers are being successfully continued. Important projects funded by the Lower Saxony Ministry of Economic Affairs, the Lower Saxony Ministry of Food, Agriculture and Forestry as well as the Agency for Renewable Resources (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, FNR), during which the material was further developed, were carried out in the framework of cooperation with industrial companies. The most important projects shall be listed as follows:

- Seats for office chairs, thermoplastic, biodegradable, partner: Wilkhahn, were awarded the Umweltpreis by Deutsche Bundesstiftung Umwelt (for Wilkhahn)
- Door panels for cars, thermoplastic, biodegradable, 100% renewable resources, partner: Johnson Controls Interiors

- Pultruded cross slats for slatted bed frames, various matrices on the basis of renewable resources, partner: Thomas Technik & Innovation
- New thermosets on the basis of vegetable oil, partner: COGNIS
- Industrial safety helmets (Fig. 1), partner: Schuberth Helme GmbH, were awarded the IHK-Technologietransferpreis 2000. Since the beginning of 2004 they have been launched onto the market. This impressive example for the performance of biocomposites was developed in cooperation with INVENT GmbH and Schuberth Helme GmbH in the framework of a project funded by the Lower Saxony Ministry of Food, Agriculture and Forestry. The outstanding result was awarded the IHK-Technologietransferpreis 2000 by the Chamber of Industry and Commerce, Braunschweig.

Fig. 1: Industrial Safety Helmet

The industrial safety helmet is made of about 85% renewable resources. With a fibre reinforcement of cotton and flax as well as a matrix system on the basis of vegetable oil the helmet shells not only meet the requirements of the relevant standards (DIN EN 397) but also surpass them. When compared to reference structures, the helmet shells' weight is reduced by approximately 10% due to an optimised lay-up sequence and the low density of the natural fibres. Furthermore, the comfort for the wearer is considerably improved. During the recently started series production of the first 10,000 helmets an improved manufacturing process ensures productivity and quality. Since the beginning of 2004 the products have been available on the market. Offered at the same price as their petrochemical competitor products, they additionally include important ecological advantages with respect to production, use and disposal.

- Air column panelling for concept study „LIREX“ (Light Innovative Regional-EXpress, ALSTOM LHB) equipped with halogen-free flame retardants attaining high levels of fire protection (class S4), smoke development (class SR2), fluidity (class ST2) according to DIN 5510-1 German Industrial Standard for fire protection.
- Another continued and funded project, i.e. biocomposite seat panelling elements (Fig. 2) for five suburban trains of the DT4 product line (ALSTOM LHB), reached small-lot production. The panelling elements are being successfully tested in the extreme conditions of the daily operation of Hamburg's Hochbahn trains. Additionally, a weight saving of 30% (when compared to glass fibre reinforced polymers) was achieved. Thus after industrial safety helmets, a second biocomposite product was introduced into the market.

Fig. 2: Seat Panelling Element

At the DLR Institute of Structural Mechanics, manufacturing techniques for the production of biocomposites are developed, analysed, and optimised based on commonly used procedures in composite technology. These, in particular, are press moulding, hand lay-up, the filament winding technique, new resin injection procedures (differential pressure resin transfer moulding (DP-RTM) and single line injection moulding (SLI) technologies developed at the DLR Institute of Structural Mechanics [13]), and pultrusion [14], which are tested with only slight modifications for the manufacture of components. Unidirectional (UD) fibre reinforced laminates or non-crimp fabrics have to be applied in order to take advantage of the anisotropy of the fibre reinforced composites. Nonwovens are used as reinforcements to meet minor requirements in terms of mechanical properties. With short fibre reinforced components, usually injection moulding is applicable. Table 1 shows an overview of the currently available manufacturing techniques:

Technique	General Examples	Design Examples
Press moulding	<ul style="list-style-type: none"> • Door panels for cars etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • h.i.p. (hand-friendly image products) • Shelves • Stools • Loudspeakers
Liquid resin injection (LRI) / prototype simulation of press moulding	<ul style="list-style-type: none"> • High-performance parts for aircraft 	<ul style="list-style-type: none"> • Stool (prototype) • Table (Eindhoven, prototype)
Pultrusion	<ul style="list-style-type: none"> • Rods, pultruded profiles etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Furniture industry • Framework constructions
Filament winding technique	<ul style="list-style-type: none"> • Highly stressed components • Containers • Beams subject to bending load 	<ul style="list-style-type: none"> • Violin
Injection moulding	<ul style="list-style-type: none"> • Complex parts 	<ul style="list-style-type: none"> • Connectors
Hand lay-up (restricted use only)	<ul style="list-style-type: none"> • Panelling elements of small scale manufacture (e.g. for trains) 	<ul style="list-style-type: none"> • Solid, moulded backpacks with snowboard

Table 1: Overview of Manufacturing Techniques for Biocomposites

3. Interim Results

Experience shows that except for extreme environmental conditions biocomposites are suitable for all applications which today are dominated by glass fibre reinforced polymers. This mainly applies to all panelling elements in the automotive, train, furniture and leisure industries. Currently, the relatively high price of matrices based on vegetable oil (among other factors) restricts more products being launched onto the market. In order to make optimal use of the material's potential, further research with regard to manufacturing techniques and optimisation of components is required. Thanks to new products and a more advantageous eco-political situation, it is expected that market acceptance will increase and that new markets will open up.

4. New Approach – Design Aspects of Biocomposites

The interdisciplinary approach of the cooperation with the Burg Giebichenstein therefore involves the development of products by not only taking material properties into consideration but also design aspects. In doing so new variants of the material that have not been applied before were examined in functionally designed products. Material requirements arising from product and process scenarios stimulate materials research. The resulting synergy effects yielded in an optimisation of selected material properties. In recognition of this successful cooperation of materials research and industrial design the so-called h.i.p. (hand-friendly image product, developed in order to introduce biocomposites), was awarded the AVK-TV-Innovationspreis 2002, and a biocomposite stool, was awarded the MATERIALICA Design Award 2003.

Shelf Made of Elastically Distorted Side Panels

An economic technology for the manufacture of products from biocomposites is given by press moulding of panels or plates. The lightweight shelf (Fig. 3) introduced here makes use of their high modulus of elasticity. Square plates, which are spherically deformed by means of profiled or round rods, build up interlocked cubes. The pattern is oriented towards the size of books and folders; it can be extended horizontally and vertically in almost any combination [18].

Fig. 3: Shelf from Spherically Deformed Panels

h.i.p – Hand-Friendly Image Products

Natural fibre reinforced biopolymers – biocomposite materials for short: How is it defined? Its properties, understanding its potential, making it an interesting topic to think about and creating awareness for such a material, finding new applications and sales markets; one “product” with both a specific and material function but one that also offers much more and, above all, is new and inventive... This could be a good definition but is still not comprehensive enough.

Fig. 4: h.i.p. - Hand-friendly Image Product

The result of a cooperation between the DLR Institute of Structural Mechanics and the Burg Giebichenstein School of Art and Design in Halle/Germany is **h.i.p.** - the **hand-friendly image product** (Fig. 4, 5). It consists of two geometrically identical mould parts made by hot pressing. Between these two mould halves is a snap fastener made to hold a CD-ROM, also a product of this cooperation, that contains audiovisual information on the material. The housing is nice to touch and is designed to be “hand-friendly”. In addition to its function as a CD holder, it is exemplary for any type of “housing” such as those for cellular phones, portable CD or MP3 players, personal digital assistants (PDA), etc. and, beyond its function as a “design product”, its material provides an interesting approach to a multitude of technical applications. The observer is therefore able to experience the material with all of his senses, understand it, and the direct and indirect information it contains will animate the observer to find new applications or to take a new look to certain material properties.

Fig. 5: h.i.p. with Textile Inlays and Demo-CD

The textile and graphic structures integrated during the manufacturing process directly point out the multitude of possibilities surface design has to offer. Since it is a natural material, signs of wear and tear and the formation of patina have deliberately been taken into account. These types of effects generally increase the personal value of leather and natural products. With technical products, however, usually only a perfect finish is acceptable that must look new for as long as possible. This fact, in turn, provides new approaches for new product ideas.

After termination of the project in February 2002, a small series of 120 samples of this image product and 1,000 CD-ROMs were manufactured and presented for the first time at the Hanover Industrial Fair 2002. The CD-ROM was a “give away” for interested visitors whereas the complete unit was reserved for potential customers due to their limited number. At the same time, selected image products were displayed in a show case. The response of the public was very positive which was clearly reflected by contacts made at the fair. Now the next step is to continue realizing these insights and to apply them to specific products.

Stool

After having identified the parameters of the press moulding procedure that are relevant for the design process, a student who was about to take her diploma, created a product which does not only feature options of shaping the material and its aesthetic qualities but also shows complex usage properties. First of all, the student examined the various options of surface design in order to finally prove the material's strength under the aspect of lightweight construction by an archetypical seat. The stool (Fig. 6) designed that way had to be manufactured making use of the DP-RTM (Differential-Pressure Resin Transfer Moulding) procedure in an autoclave

process. This is also an ideal method for small serial or prototype manufacture and even for modelling the press moulding process as it requires just one single not even very stiff mould that can be made of e.g. glass fibre reinforced polymers, since the autoclave pressure stabilises the shape. So the mould could easily be made by the student herself and therefore was very cost-effective, yet yielded in qualified results and prototypes.

Fig. 6: Stools showing Sophisticated Surface Structures

In presenting these prototypes and numerous surface samples, contacts to business companies and research institutes were made, an international public was attracted (MATERIALICA 2003, EUROMOLD 2003) (Fig. 7) and a relevant echo in the media was generated [19].

Fig. 7: The Author (left) at the MATERIALICA 2003 Trade Fair in Munich

Desk

This workplace (Fig. 8) represents an unconventional and free-spirited example that resulted from a design project with industrial design students of the Technical University in Eindhoven. The worker floats in a highly forward tilted position turntable above the desktop. Apart from the ergonomic concept this example was remarkable in a competition because of its ability to demonstrate all manufacturing technologies used by the German Aerospace Centre. These are the sandwich desktop, the press moulded curved supports and the body contact areas, the vacuum-injection moulded centre part and the pultruded tube for ergonomic adjustment.

Fig. 8: Workplace for Floating Position (scale model)

Loudspeaker Cabinet

Acoustic measurements have shown that biocomposite materials have very good properties in terms of resonance and absorption. This is due to the hollow structure of the fibres and to the speciality of the interface between fibres and matrix. That is why the material is predestined to purposes of room acoustics, sound and noise protection, and to loudspeaker cabinets. When nonwoven fibres are only partly embedded into the matrix, an unsymmetrical material will be obtained with a closed surface on the outside and a surface providing high noise absorption [15] on the inside. The loudspeaker 'AURIS' (Fig. 9) represents a typical application of the focussed material featuring a horn type emitter with a curved resonance and absorption area. The challenge for the material scientists is to develop an industrial technology that extends the present gravity-based laboratory-size results.

Fig. 9: Cross Section and Side View of Loudspeaker Cabinet from Integral Composite Material

Fastener with Integral Hinge

By order of the manufacturer and distributor InVIDO that produces mass customised furniture using CNC technologies, a friction-locked construction component (Fig. 10) was designed, which joins a frame system with the grooved and perforated front and back panels. The fastener consists of stiff but also flexible areas forming a so-called material hinge. As in the case of the loudspeaker cabinet there has to be a zone in the directed fibre composite, which is either resin-free or filled with an elastic matrix. The material hinge has to provide a definitely better force transmission than a film hinge does in conventional injection moulded parts.

Fig. 10: Clamp Fastener with Integral Material Hinges

Connector 'junctio'

This connector (Fig. 11) is an exemplary application of composites from hemp and polypropylene, which has been developed in cooperation with the Martin-Luther-University Halle-Wittenberg and medium-sized enterprises [16]. Made by injection moulding, it is used as a detachable connection for parts from wood or biocomposites in workmanship or semi-professional applications. The positive effect of the connector is the almost complete conversion of all loads which are introduced into the connection into tensile loading, as the tensile strength is an outstanding property of fibre reinforced composites.

Fig. 11: Work Principle of the 'junctio' Connector

The connector was first introduced in a computer display stand (Fig. 12) to communicate the research results on trade fairs and exhibitions. Made from massive beech wood and plywood, this demonstration article of furniture does not contain any metal part and yet is dismantlable for easy transport and re-assembly.

Fig. 12: Computer Display Stand demonstrating the Performance of the Connector

5. Perspectives

Considering the results of the R&D projects, it becomes evident how challenging it is to launch new products onto the market. At that point it was extremely difficult to replace at least some of the materials currently being used. Therefore the interdisciplinary developmental team focuses on establishing innovations in such business companies that are using flexible technologies or are applying paradigms for a sustainable manufacture as e.g. mass customisation. These business concepts demand a close cooperation with additional partners in new networks and practise an intensive communication between manufacturers and end-users. This is also dominated by a creative atmosphere for inventions and unparalleled designs, as these new suppliers have to attract attention on the market and can actually do so with the help of electronic communication media.

Regarding the increase in retraction obligations (esp. EU end-of-life vehicle directive, 2000), the chance of using biocomposites in market products is significant. Political specifications are helpful on the one hand but, on the other hand, producers are increasingly taking life cycle costs into account.

The conclusion is that research must actively be involved in changing the boundary conditions on all levels in order to help make these new materials successful. In addition to this aspect, new applications for biocomposites are being identified in which the whole dimension of attributes appears, thus not only the technical properties but also the sensuously noticeable qualities of multi-fariously designable surfaces. Such kind of applications can be found e.g. in furniture and in other components that are also suitable for outdoor applications. Furthermore, cost-effective manufacturing technologies have to be developed in order to significantly increase marketing chances at competitive material costs.

6. Literaturverzeichnis / References

- [1] Michaeli, W.; Wegener, M.: *Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe*, Carl Hanser Verlag (1990)
- [2] Carlsson, L.A.; Byron Pipes, R.: *Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe - Herstellung und experimentelle Charakterisierung*, B.G. Teubner-Verlag (1989)
- [3] Ehrenstein, G.W.: *Faserverbund-Kunststoffe*, Carl Hanser Verlag (1992)
- [4] DIN 60 001: *Textile Faserstoffe – Naturfasern*, Deutsches Institut für Normung, Berlin (1990)
- [5] Flemming, M., Ziegmann, G.; Roth, S.: *Faserverbundbauweisen, Fasern und Matrices*, Springer-Verlag (1995)
- [6] Satlow, G., et al., Faserstoff-Tabelle: Flachs sowie andere Bast- und Hartfasern, *Chemiefasern/Textilindustrie* (1994) **96** (44), 765-785
- [7] Fritz, H.-G., et al.: *Study on production of thermoplastics and fibres based on mainly biological materials*, EUR 16102, Directorate-General XII Science, R&D (1994)
- [8] Witt, U., et al.: *Biologisch abbaubare Polymere*, Franz-Patatzentrum für Polymerforschung e.V. (1997)
- [9] Raschke, M., et al.: *Technische Kennwerte und Verarbeitungsparameter von bioabbaubaren Kunststoffen für das Spritzgießen*, Institut für Recycling Wolfsburg (2000)
- [10] Herrmann, A.S., Nickel, J.; Riedel, U.: Construction materials based upon biologically renewable resources – from components to finished parts, *Polymer Degradation and Stability* (1998) **59**, 251–261
- [11] Riedel, U., Nickel, J., Natural fiber reinforced biopolymers as construction materials - new discoveries, *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, (1999) **272**, 34-40.
- [12] Riedel, U.: *Entwicklung und Charakterisierung von Faserverbundwerkstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe*, Fortschritt-Berichte VDI, (1999) **5**, 575
- [13] Kleineberg, M.; Nickel, J.; Pabsch, A.; Sigle, C.; Schöppinger, C.: *Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen bzw. Kunststoffbauteilen nach einem modifizierten RTM-Verfahren*, Patent DE 198 53709 C1, (2000)
- [14] Riedel, U.; Gensewich, C.: Pultrusion von Konstruktionswerkstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, (1999) **272**, 11-16.
- [15] Nickel, J., Meinel, F.: Gehäuse für akustische Geräte. Deutsches Patent DE 103 01 115.3-35 (2002)
- [16] Richter, H.: Fester und lösbarer Verbinder für Konstruktionselemente aus natürlichem und synthetischem Material. Deutsches Gebrauchsmuster DE 201 16 087.0 (2002)
- [17] Haudek, H.W.; Viti, E.: *Textilfasern*. Verlag Johann L. Bondi & Sohn, Wien-Perchtoldsdorf, Melland Textilberichte KG, Heidelberg (1980)
- [18] Nickel, J.: Modulares Möbelbausystem. DE 203 05 056.8 (2003)
- [19] Pranghofer, S.: Naturkost für Industrie – Werkstoff zwischen Natur- und Kunststoff. Holz- und Möbelindustrie, Kuhn-Verlag, Villingen-Schwenningen (2004), 62