



Abschlussbericht Nr.: 1/A285/15

VERBUNDVORHABEN

NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR LIGHTWEIGHT GENERIC COMPONENTS OF ELECTRIC LOW-EMISSION CON- CEPT VEHICLES – MATLEV

Teilvorhaben

Entwicklung von naturfaserbasierten Verbundwerkstoffen und effizienten Fertigungsprozessen zur Herstellung von Leichtbaukomponenten für Low-Emission Concept Vehicles

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. M. Gude

Projektteam: Dr.-Ing. A. Czulak, Dipl.-Ing. S. Geller, Dipl.-Ing. O. Weißenborn, Dipl.-Ing. B. Przybyszewski, Dipl.-Ing. R. Gottwald

Projektnummer / 01MX12021

Förderkennzeichen:

Seiten: 65

Abbildungen: 41

Tabellen: 07

Anlagen: -

Datum: 30.09.2015

Förderungszeitraum: 01.07.2012 – 31.08.2015



INHALTSVERZEICHNIS

1	AUFGABENSTELLUNG	5
1.1	Gesamtziel des Vorhabens	5
1.2	Wissenschaftlich-technische Teilziele.....	5
2	VORAUSSETZUNGEN.....	7
3	PLANUNG UND ABLAUF.....	9
4	WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND ZU BEGINN DES VORHABENS	12
5	ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN.....	16
6	ERZIELTE ERGEBNISSE	17
6.1	Verfügbarkeit und Einteilung natürlicher Werkstoffe	17
6.2	Untersuchungen zur Integration von Kurz- und Langfasern	19
6.3	Untersuchungen zur Integration textiler Halbzeuge.....	25
6.4	Modifizierung polymerer Werkstoffe zur Verbesserung der Flammbeständigkeit	28
6.5	Integration von Holzfurnieren zur Verbesserung der Oberflächenqualität	30
6.6	Entwicklung angepasster Prozesse und Technologien	33
6.7	Design und Konstruktion prototypischer Demonstratorstrukturen	40
6.8	Prozesstechnologische Umsetzung von Technologiedemonstratoren	44
7	VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE	50
7.1	Erfindungen/Schutzrechte.....	50
7.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten.....	50
7.3	Wissenschaftlich/technische Erfolgsaussichten nach Projektende	51
7.4	Wissenschaftlich/wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	52
8	DARSTELLUNG DES WÄHREND DER LAUFZEIT BEKANNT GEWORDENEN FORTSCHRITTS AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN	54
9	GEPLANTE UND ERFOLGTE VERÖFFENTLICHUNGEN, STUDENTISCHE ARBEITEN, MESSEBEITRÄGE	60
10	LITERATUR	63

KURZZUSAMMENFASSUNG

Gesamtziel des Vorhabens war die Erforschung und Verarbeitung naturfaserbasierter Verbundwerkstoffe sowie die Entwicklung zugehöriger innovativer und effizienter Fertigungsprozesse zur Herstellung generischer Leichtbaustrukturen für ein elektrisch betriebenes Low-Emission Concept Vehicle (LEV). Ein Teilziel bestand darin, die Einsatzpotentiale dieser neuartigen Werkstoffe anhand ausgewählter Demonstratorkomponenten wie Sandwichelementen für Bodensegmente, Türverkleidungen sowie Sitzstrukturen aufzuzeigen. Diese zielen vor allem auf einen Einsatz in elektrisch betriebenen Mehrzweck-Fahrzeugen, sogenannten Multi Purpose Vehicles (MPV) ab, bieten darüber hinaus jedoch Einsatzmöglichkeiten in weiteren Anwendungen, insbesondere im Bereich der Mobilität. Mit der wachsenden Nachfrage nach solchen MPV, etwa für den Einsatz in der Land- und Forstwirtschaft, auf Flughäfen, großen Ladenflächen, in Krankenhäusern oder fahrerlosen Taxis wird ein enormes Einsatzpotential für modular konfigurierbare, elektrisch betriebene LEV generiert. Aufgrund der Fokussierung auf diese außerhalb des Straßenverkehrs einsetzbaren Mehrzweck-Fahrzeuge und den in diesem Zusammenhang geringeren Restriktionen ist ein größerer Gestaltungsspielraum für Werkstoff- und Prozessinnovationen gegeben.

Im Rahmen des Vorhabens wurden zunächst umfassende Recherchen zu verfügbaren naturbasierten Verstärkungsstoffen durchgeführt und diese nach Verstärkungsart (Kurz-, Lang-, Endlosfaser) und funktionalen Faktoren klassifiziert. Unter Einsatz ausgewählter Verstärkungsstoffe und Matrixsysteme erfolgten Prozessuntersuchungen zur deren Verarbeitungseigenschaften sowie anschließende Charakterisierungen zur Evaluation des mechanischen Eigenschaftsprofils. Weiterhin wurden Untersuchungen zur Verbesserung spezifischer Eigenschaften durchgeführt. Hierbei stand etwa die Modifikation von Naturfasern zur Realisierung höherer Festigkeiten oder die Integration von Füllstoffen in Polyurethan-Matrixsysteme zur Verbesserung der Brandschutzeigenschaften im Fokus. Als Ergebnis der umfassenden Untersuchungen wurden Vorzugshalbzeuge und Matrixwerkstoffe identifiziert, auf deren Basis die Auslegung und Fertigung von Demonstratorkomponenten erfolgte.

Parallel wurden Arbeiten zur Adaption des Polyurethan-Sprühverfahrens für die Verarbeitung von Naturfasern durchgeführt. Im Vordergrund standen hierbei die Entwicklung eines angepassten Schneidwerks und die automatisierte Verarbeitung von textilen Halbzeugen. Ein weiterer Schwerpunkt der Prozessentwicklungen bestand in der Untersuchung neuartiger pulverförmiger Matrixsysteme mit thermoplastischen Verarbeitungseigenschaften auf Basis von Epoxidharzen und der Erarbeitung angepasster Verarbeitungs-

technologien. Hierbei wurden mit dem Resin Powder Moulding (RPM) und Thermoset Sheet Forming (TSF) zwei bevorzugte neuartige Prozessvarianten etabliert.

Mittels der gemeinsam mit dem Projektpartnern definierten und entwickelten Demonstratorkomponenten wurden die erarbeiteten Ergebnisse und Entwicklungen in anwendungsnahe Strukturen überführt, die das Einsatzpotential naturfaserverstärkter Leichtbaukomponenten anschaulich demonstrieren. Die Auswahl und Entwicklung der Komponenten erfolgte in einem umfassenden Ansatz unter Berücksichtigung von Designanforderungen, zweckmäßigen Materialien sowie effizienten Fertigungstechnologien. Obwohl die in diesem Vorhaben anvisierten Komponenten für Elektrofahrzeuge aufgrund der hier besonders stark ausgeprägten Motivation zu Leichtbaulösungen entwickelt wurden, ist die Übertragbarkeit auf weitere Fahrzeugtypen auch mit konventionellen Antrieben und darüber hinaus auf weitere Industriebereiche und Branchen gegeben.

1 AUFGABENSTELLUNG

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Der Einsatz faserverstärkter Kunststoffe in mobilen, tragenden Strukturbauteilen ermöglicht die Substitution herkömmlicher Materialsysteme auf Basis metallischer Rohstoffe, wie etwa Stahl oder Aluminium. Mit der damit einhergehenden Gewichtsreduktion kann den allgegenwärtigen Forderungen nach Verminderung von Kraftstoffverbräuchen sowie die reduzierter Emission von Schadstoffen Rechnung getragen werden. In diesem Zusammenhang zeigen Naturfasern ein besonders hohes Potenzial, da sie neben den hohen Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften auch den Aspekt eines nachwachsenden Rohstoffs erfüllen und somit zur Umsetzung einer weniger erdölabhängigen Industrie beitragen. Die breite industrielle Anwendung wird jedoch vorrangig durch den Mangel an validierten Werkstoffkennwerten und insbesondere von effizienten, werkstoffgerechten Fertigungs- und Verarbeitungstechnologien verhindert. Diese Aspekte greift das Vorhaben MATLEV mit der Erforschung naturfaserbasierter Verbundwerkstoffe und der Entwicklung innovativer und effizienter Fertigungs- und Verarbeitungsprozesse auf.

Dabei kann mit der Umsetzung generischer Leichtbaustrukturen für ein elektrisch betriebenes Low-Emission Concept Vehicle (LEV) das Einsatzpotenzial der verwendeten Werkstoffe und der angepassten Fertigungsverfahren aufgezeigt werden. Obwohl die in diesem Vorhaben anvisierten Komponenten für Elektrofahrzeuge aufgrund der hier besonders stark ausgeprägten Motivation zu Leichtbaulösungen entwickelt werden, ist die Übertragbarkeit auf weitere Fahrzeugtypen auch mit konventionellen Antrieben gegeben.

1.2 Wissenschaftlich-technische Teilziele

Ein wesentliches Teilziel der Forschungsarbeiten bestand in der Identifizierung und Charakterisierung geeigneter naturbasierter Verstärkungsstoffe für den Einsatz in ökologisch effizienten Verbundkomponenten in der Elektromobilität. Aufbauend auf umfangreichen Recherchen zu potentiellen natürlichen Verstärkungsstrukturen sowie deren Klassifizierung und Charakterisierung sollten Vorzugsmaterialien und -halbzeuge identifiziert und im weiteren Projektverlauf erforscht werden. Hierbei galt es, neben bereits kommerziell verfügbaren Verstärkungsstoffen auch bisher nicht für den Einsatz in Verbundwerkstoffen betrachtete Materialien, beispielsweise Reststoffe und Abfallprodukte in die Arbeiten einzubeziehen. Die umfassende Charakterisierung der gewählten Materialien im Hinblick auf deren Verarbeitungseigenschaften und mechanischem Eigenschaftsspektrum war ein weiteres Teilziel des Vorhabens.

Im Hinblick auf den Einsatz in öffentlichen Transportsystemen kam der Modifizierung der Verbundstrukturen zur Verbesserung der Brandschutzeigenschaften eine besondere Bedeutung zu. Hierzu sollte unter Einsatz geeigneter Füllstoffe das Brandverhalten ausgewählter Matrixsysteme insbesondere unter Berücksichtigung der Rauchgasentwicklung sowie des Sauerstoffindex verbessert werden.

Begleitend stand die Adaption etablierter Fertigungstechnologien (insbesondere des Flechtverfahrens sowie des Polyurethan-Sprühverfahrens) bzw. die Entwicklung neuartiger effizienter Verarbeitungstechnologien für Naturfaserverbundwerkstoffe im Vordergrund der Arbeiten. Beispielhaft sollte die Integration von Naturfasern (NF) im Langfaserinjektionsverfahren (LFI) unter Einsatz von Polyurethan-Matrixwerkstoffen (PUR) untersucht werden. Hierbei galt es, werkstoffspezifische Modifikationen der Prozesstechnik (angepasstes Schneidwerk, automatisiertes Handlingsystem) zu erarbeiten.

Auf Basis der umfassenden Charakterisierungen von Naturfaserverbunden erfolgte ferner die Auslegung generischer Demonstratorkomponenten für den Einsatz in LEV. Mit deren technologischer Umsetzung in effizienten Prozessen sollte das Einsatzpotential von Naturfasern für beanspruchungsgerechte Leichtbaukomponenten unter besonderer Berücksichtigung von Anforderungen der Elektromobilität anschaulich dargestellt werden.

Die skizzierten Forschungsarbeiten sind ausgerichtet auf ein neuartiges Bauweisenkonzept für Elektrofahrzeuge auf Basis naturfaserverstärkter Polymerverbunde, dessen serientaugliche Machbarkeit bisher noch nicht nachgewiesen worden ist. Aufbauend auf den Erfahrungen des Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden aus verschiedenen durch das BMBF oder die DFG geförderten Projekten sollen angepasste werkstoff-, werkzeug- und fertigungstechnische Ansätze zur Umsetzung von naturfaserverstärkten Strukturkomponenten für den Einsatz in der Elektromobilität entwickelt werden. Die Komplexität der gestellten Aufgabenstellung und die damit verbundenen Forschungsaufgaben waren als besonders risikobehaftet einzuschätzen. Zur Sicherstellung einer hohen Erfolgswahrscheinlichkeit haben sich ausgewiesene Verbundprojektpartner mit ihren entsprechenden Kernkompetenzen zusammengefunden, wobei das ILK als öffentliche Forschungseinrichtung die notwendigen wissenschaftlichen Beiträge zum Verbundvorhaben und auch die Maßnahmen zum Ergebnistransfer nicht ohne eine vollständige Förderung erbringen konnte.

2 VORAUSSETZUNGEN

Das im Rahmen der transnationalen Förderinitiative „ERA-NET Plus on Electromobility“ angesiedelte Verbundvorhaben fokussiert auf das im Themenfeld Elektromobilität formulierte Schwerpunktthema „Technologiebasierte Innovationen“. Im Hinblick auf den steigenden Bedarf an hochintegrativen Leichtbaukomponenten, die darüber hinaus verstärkt den Aspekt der Ökologie erfüllen müssen, weisen naturfaserbasierte Verbundwerkstoffe ein außerordentlich hohes Einsatzpotenzial auf. Die breite industrielle Anwendung wird dabei maßgeblich durch fehlendes Wissen bezüglich der mechanischen Eigenschaften, der Verbundcharakteristik sowie durch den Mangel an effizienten Verarbeitungs- und Fertigungsprozessen beschränkt. Durch den Zusammenschluss namhafter Projektpartner auf den Gebieten der grundlagenorientierten Material- und Ingenieurwissenschaften können die Aspekte der Werkstoffentwicklung bzw. Modifikation, deren Charakterisierung und der anwendungsorientierten Entwicklung effizienter Fertigungsverfahren durchgängig abgedeckt werden (Abbildung 1).



Abbildung 1: Zusammenschluss und Austausch der am Projekt MATLEV beteiligten Partner

Im Rahmen von MATLEV brachten alle Projektpartner ihre Erfahrungen und ihr spezifisches Know-how in die Bearbeitung und Lösung der Fragestellungen ein. Die folgende Übersicht stellt die projektspezifischen Kompetenzen der Projektpartner dar:

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden (ILK)

Das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik führt umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet beanspruchungsgerechter Leichtbaustrukturen durch. Dabei wird ein werkstoff- und produktübergreifender Ansatz zu Grunde gelegt, der durchgängig die gesamte Entwicklungskette – Werkstoff, Konstruktion, Simulation, Fertigung, Prototyp, Qualitätssicherung, Kosten – umfasst. Die Kernkompetenz des ILK liegt hierbei in der Entwicklung, Auslegung und Optimierung von Komponenten und Systemen des Hochleistungsleichtbaus, wobei verschiedene Verstärkungsstrukturen berücksichtigt werden. Das Eigenschaftsspektrum der verwendeten Verstärkungsfasern reicht dabei von rein synthetischen Fasern über Kunststofffasern bis hin zu Strukturen aus natürlichen Rohstoffen, die vorrangig im Rahmen von MATLEV verarbeitet wurden.

Technische Universität Warschau (Warsaw University of Technology, WUT)

Die Technische Universität Warschau und dabei insbesondere das Institut für Werkstoffwissenschaften ist ein herausragender Partner auf dem Gebiet der Werkstoffcharakterisierung sowie der Modifikation von technischen Materialien. In Anlehnung an die im Gebrauch der Leichtbaukomponenten geforderten Randbedingungen erfolgte die Entwicklung und Untersuchung geeigneter Flammenschutzmittel auf Basis von Nanopartikeln. Sowohl die Bewertung des Eigenschaftspotentials natürlicher und modifizierter Verbundstrukturen als auch die Entwicklung eines reproduzierbaren Prozesses zur Modifikation der Matrixsysteme stellen fachliche Schwerpunkte im Rahmen von MATLEV dar.

S.Z.T.P. „TAPS“

Das Unternehmen TAPS mit Sitz in Lodz (Polen) ist ein innovativer Hersteller von Sitzstrukturen für den Einsatz in einer Vielzahl von Transportsystemen, wie etwa der Schienenfahrzeug- und der Luftfahrtindustrie. Darüber hinaus ist TAPS spezialisiert auf die Entwicklung, Fertigung und Installation von Sitzstrukturen in öffentlichen Bereichen (Theater, Kino, Auditorium). Damit einhergehend müssen die gefertigten Produkte eine hohe Qualität hinsichtlich geltender Normen und Regularien zum Brandschutz einhalten, gleichzeitig jedoch einen hohen Komfort und für den Einsatz in mobilen Systemen einen möglichst gewichtsreduzierten Aufbau aufweisen. Der Einsatz innovativer Werkstoffe auf Basis von naturfaserverstärkten Verbundwerkstoffen gewährleistet ein hohes Verwertungspotential und die Fokussierung auf den Einsatz in der Elektromobilität bietet das Potential zur Erweiterung der Geschäftsfelder des Industriepartners. Mit der Definition von anwendungsorientierten Anforderungen und Spezifikationen seitens TAPS können bereits frühzeitig bestehende Herausforderungen bei der Umsetzung naturfaserbasierter Leichtbaustrukturen identifiziert und gelöst werden.

3 PLANUNG UND ABLAUF

Das Verbundvorhaben MATLEV wurde mit einer Projektlaufzeit von 36 Monaten geplant. Beginn des Vorhabens war der 01.07.2012 und das sich aus der Laufzeit ergebende Ende auf den 30.06.2015 datiert. Bedingt durch die verzögerte Fertigstellung und Auslieferung des finalen Demonstratorwerkzeugs durch den Werkzeughersteller wurde mit dem Projektträger eine kostenneutrale Verlängerung um 2 Monate bis zum 31.08.2015 vereinbart.

Die im Vorhaben MATLEV angestrebten Arbeiten sind eng mit den Grundlagen der Material- und der Ingenieurwissenschaft verknüpft, sodass auf Basis der iterativen Herangehensweise ein enger Austausch und steter Dialog der Projektpartner erfolgte (Abbildung 2).

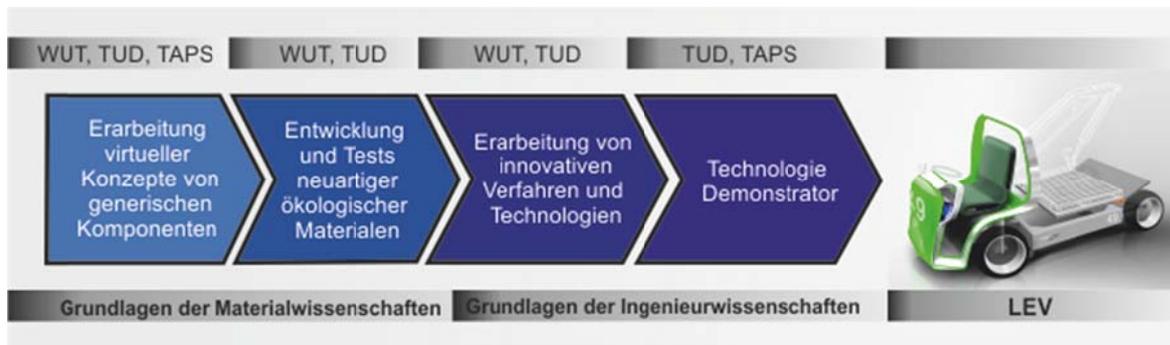


Abbildung 2: Zusammenarbeit der Projektpartner entsprechend ihrer fachlichen Expertise

Durch die Aufteilung der Arbeitspakete entsprechend der fachlichen Expertise der Projektpartner wurde sowohl die Gesamtkoordination als auch die Zusammenarbeit der Partner untereinander so effizient wie möglich gehalten. Dazu wurde für jedes Arbeitspaket ein führender Partner definiert, der für die Koordination der Arbeiten und das Zusammentragen der Ergebnisse verantwortlich ist. Regelmäßige Projekttreffen dienten dabei zum Austausch und zur Diskussion aktueller Forschungsergebnisse sowie zur Abstimmung und Koordination weiterer Arbeiten.

Hauptverantwortlich für die Erarbeitung virtueller Konzepte von generischen Komponenten war das ILK, wobei die Auswahl möglicher Demonstratorstrukturen gemeinsam von allen Partnern erfolgte. Unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Fertigungstechnologien wurden daher Sitzstrukturen, tragende Stützelemente und großflächige Sandwich-Verbunde entsprechend ihres möglichen Einsatzes in einem Low-Emission-Vehicle ausgewählt (Abbildung 3).

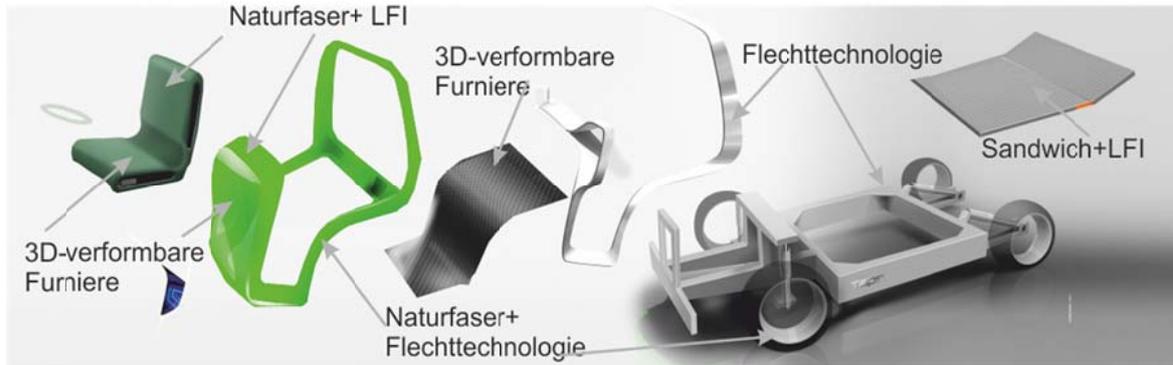


Abbildung 3: Auswahl generischer Technologiedemonstratoren unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Fertigungstechnologien

Im weiteren Projektverlauf erfolgte die Auslegung der ausgewählten Komponenten, wobei umfangreiche numerische Studien für ein beanspruchungsgerechtes Design durch das ILK durchgeführt wurden. Aufbauend auf den durch die Partner definierten Anforderungen an den Konstruktionswerkstoff, erfolgte im zweiten Arbeitspaket die Entwicklung, Charakterisierung und Modifizierung neuartiger ökologischer Materialien. Insbesondere die Auswahl und Charakterisierung geeigneter naturbasierter Verstärkungsstoffe sowie Untersuchungen zum Brandverhalten ausgewählter Matrixsysteme bildeten den Schwerpunkt der Arbeiten. Auf Basis der spezifischen Werkstoffeigenschaften galt es daraufhin, geeignete Fertigungstechnologien zu entwickeln bzw. bereits etablierte Verfahren derart anzupassen, dass eine werkstoffgerechte Verarbeitung ermöglicht wurde. Als Projektabschluss erfolgte die Umsetzung zahlreicher Technologiedemonstratoren zur Verdeutlichung des Anwendungspotentials naturbasierter Verbundwerkstoffe.

Entsprechend der komplexen Aufgabenstellung und umfangreichen Forschungsarbeiten sowohl theoretischer als auch praktischer Natur wurden Personalmittel für angemessen qualifiziertes wissenschaftliches und nichtwissenschaftliches Personal sowie Hilfskräfte beantragt und bewilligt. Für die umfassenden Untersuchungen zur Verarbeitung und Charakterisierung verschiedener naturbasierter Verstärkungsstoffe sowie die zugehörigen Prozessuntersuchungen standen Sachmittel für Verbrauchsmaterialien, Prozesshilfsmittel und ein Plattenwerkzeug zur Verfügung. Weiterhin wurden Sachmittel für die Adaption vorhandener Anlagentechnik und nicht zuletzt für die Beschaffung eines Demonstratorwerkzeugs bewilligt, in welchem die erarbeiteten Projektergebnisse zusammengeführt und veranschaulicht werden konnten.

Insgesamt hat sich der Zeitplan durch die verzögerte Fertigstellung und Auslieferung der finalen Demonstratorstruktur um zwei Monate nach hinten verlagert. Dabei ist festzuhal-

3 Planung und Ablauf

ten, dass der durch den jeweiligen Arbeitsplan der Projektpartner festgeschriebene Projektstand zu allen übrigen Meilensteinen sicher erreicht wurde (Abbildung 4).

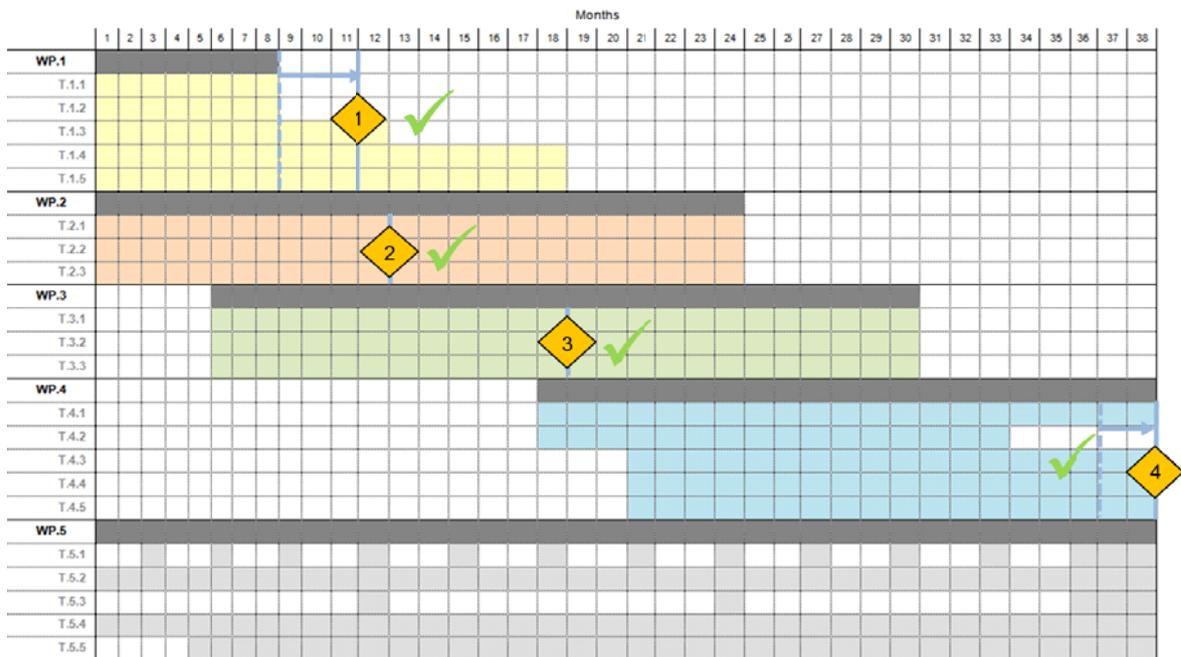


Abbildung 4: Zeitplan des Verbundvorhabens mit angepasster Laufzeit und Erreichen der Meilensteine

4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND ZU BEGINN DES VORHABENS

Effizienter Leichtbau ist ein Schlüsselfaktor für die Entwicklung ressourcenschonender Fahrzeugsysteme. Aufgrund der spezifischen, engen Verknüpfung von Fahrzeugmasse und Reichweite, gilt dies insbesondere für die Elektromobilität. Daher liegt in der Entwicklung innovativer Leichtbaukomponenten die einmalige Chance für die europäische Automobilindustrie, dieses Marktsegment mit hohem Wertschöpfungspotential mit einer weltweiten Führungsrolle zu entwickeln. Hierzu müssen vorhandene Materialien und Technologien deutlich verbessert und gleichzeitig bahnbrechende Innovationen in den einzelnen Segmenten eingeleitet werden. Für neuartige Systemlösungen in Multi-Material-Design unter Einbeziehung ökologischer, naturbasierter Verbundwerkstoffe gilt es, deren Eigenschaftsspektrum umfassend zu charakterisieren, um eine Überführung in technische Anwendungen der Elektromobilität zu ermöglichen.

Bei der Entwicklung zukünftiger Elektrofahrzeuge ist verstärkt auf den Einsatz lokal verfügbarer nachwachsender oder recycelter Werkstoffe zu fokussieren. So wird neben der Verwendung zurückgewonnener Faserstoffe der Einsatz von Naturfasern, die aus im EU-Raum wachsenden Pflanzen wie Hanf oder Flachs gewonnen werden können, eine verstärkte Rolle spielen. Zur weiteren Verbesserung der ökologischen und ökonomischen Effizienz ist die Reduzierung der Teileanzahl und damit verbunden eine stark ausgeprägte Modulbauweise ein wichtiger Entwicklungsschwerpunkt. Die entsprechenden leichten Module müssen mit standardisierten Schnittstellen flexibel konfigurierbar sein. Neben einer beschleunigten Entwicklung weiterer Fahrzeugderivate sowie vereinfachter Montage- und Reparaturarbeiten ist dies vor allem Grundvoraussetzung für eine effiziente Demontage und das anschließende Recycling zum Ende der Nutzungsphase. Dies bedingt eine weitgehend integrale Verarbeitung in wirtschaftlich effizienten Prozessen.

Die Verarbeitung von Naturfasern erfolgte bisher nahezu ausschließlich in Form von Matten oder Kurz- bzw. Langfasern. Diese werden bevorzugt in Kombination mit thermoplastischen Press- oder Spritzgussmassen zu entsprechenden Verbundkomponenten weiterverarbeitet, was das Anwendungsspektrum sowohl aufgrund der Faserlänge als auch aufgrund der geringen Wärmeformbeständigkeit beschränkt. Bedingt durch den derzeitigen Mangel an robusten Herstellungsverfahren für duroplastische Naturfaserverbunde mit Endlosfaserverstärkung ist die Entwicklung serienfähiger Produktionstechnologien ein Schlüsselfaktor. Hierzu bieten zwei im Vorhaben fokussierte Fertigungstechnologien ein besonderes Entwicklungspotential:

- Ein angepasste, großserienfähiges PUR-Sprühverfahren auf Basis des Langfaserinjektionsverfahren (LFI) unter Einsatz von Naturfasern (NLFI) für großflächige Leichtbaustrukturen aus naturfaserverstärkten Polyurethanverbunden,
- Ein hochflexibler 3D-Flechtprozess zur Herstellung endkonturnaher beanspruchungsgerechter Preformen aus Hybridgarnen und Naturfasern für komplexe Profil- und Rahmenstrukturen.

Das LFI-Verfahren ist eine vergleichsweise junge Fertigungstechnologie zur Herstellung langfaserverstärkter Polyurethan-Leichtbauteile. Es wurde vor allem als kostengünstige Alternative zum Structural Reaction Injection Moulding (SRIM) entwickelt, bei welchem die Faserverstärkung in der Regel durch Glasmatten realisiert wird [1-3]. Dagegen werden beim LFI-Verfahren Glasfasern direkt vom Roving in ein spezielles Schneidwerk oberhalb des Sprühmischkopfes eingezogenen und dort auf eine definierte Länge geschnitten [4-6]. Dabei sind je nach Schneidwerkkonfiguration Faserlängen von 12,5 mm bis 200 mm möglich, wobei in der Regel jedoch Faserlängen bis maximal 100 mm verwendet werden. Die geschnittenen Glasfasern werden mittels Blasluft zum Mischkopfausgang gefördert und dort vom austretenden PUR-Komponentenstrom benetzt. Während des Austrages können sowohl der Glasgehalt als auch die Faserlänge lokal angepasst und variiert werden. In Automobilanwendungen wird das LFI-Verfahren vor allem für großflächige Leichtbauteile sowohl im Interieur als auch im Exterieur eingesetzt [7-10]. Hierbei werden die material- und verfahrensspezifischen Vorteile wie etwa das gute Haftungsvermögen der PUR-Matrixsysteme gezielt ausgenutzt, indem beispielsweise Dekoroberflächen wie genarbte Kunststofffolien oder hochglänzende Thermoplastfolien als Lackersatz für Anwendungen mit Class A-Qualität direkt hinterschäumt werden. Die guten Haftungseigenschaften werden auch beim Umschäumen von Krafteinleitungselementen oder sonstigen Inserts genutzt. Um das Potential des Verfahrens auch für die Verarbeitung von Naturfasern nutzen zu können, wurde von der Firma KraussMaffei bereits im Jahre 2004 ein spezielles Schneidwerk entwickelt [11]. Bei der Verarbeitung von Naturfasern im LFI-Verfahren analog der bisher eingesetzten Glasfasern stellt insbesondere der Schneidprozess eine hohe technologische Herausforderung dar, da Naturfasern im Gegensatz zu den spröden anorganischen Glasfasern nicht gebrochen werden können. Die hierzu von KraussMaffei entwickelte Lösung zeichnet sich durch einen abgewandelten Schneidprozess mit zwei ineinandergreifenden Zahnrädern aus. Zwar konnte die prinzipielle Tauglichkeit damit nachgewiesen werden, jedoch sind keine Anwendungen bekannt, bei der diese Technologie zum Einsatz kommt. Eine weitere Möglichkeit zum Einsatz von Naturfasern im LFI-Verfahren stellt die Verwendung von textilen Naturfaserhalbzeugen dar. Diese können vor dem Materialeintrag im Werkzeug platziert oder zwischen zwei Sprühschichten integriert werden. Bei dieser Verfahrensvariante kommen in der Regel Naturfasermatten mit wahl-

loser Faserorientierung zum Einsatz, woraus eine vergleichbar geringe Materialeffizienz resultiert [12].

Das LFI-Verfahren wird in einer weiteren Verfahrensvariante auch zur Herstellung von Sandwichbauteilen angewendet. Dabei stellt das Glasfaser-Polyurethan-Gemisch die Deckschichten dar und als Kernmaterial werden in der Regel Papierwaben eingesetzt. Anwendungen für derartige Sandwichbauteile sind beispielsweise Hutablagen oder Kofferraumladeböden. Aufgrund der Deckschichten mit Langfaserverstärkung können auch hierbei nur vergleichbar geringe mechanische Eigenschaften erzielt werden. Der im Forschungsvorhaben fokussierte Ansatz sieht den Einsatz von Naturfaserhalbzeugen mit Endlosfaserverstärkung zur Erzeugung der Deckschichten in Kombination mit einem (faserverstärkten) Schaumkern vor. Somit kann das Leichtbaupotential der Sandwichbauweise wesentlich besser ausgenutzt werden.

Ein wesentlicher Vorteil des LFI-Verfahrens ist die hohe Variabilität hinsichtlich Faserlänge, Faserverteilung, Fasermasseanteil und nicht zuletzt Kompaktierungsgrad der eingesetzten Polyurethanmatrix. Allerdings sind die Einflüsse der jeweiligen Prozessparameter auf die resultierende Werkstoffcharakteristik bisher nur unzureichend erforscht. Daher sollen im Rahmen des Vorhabens die Einflüsse der Prozessführung konsequent hinsichtlich einer möglichst hohen Materialeffizienz erschlossen und auf den hier fokussierten Naturfasereinsatz übertragen werden. Darüber hinaus soll das Einsatzspektrum durch Integration dreidimensional geformter Furniere sowohl für zusätzliche Strukturverstärkungen als auch für dekorative Funktionen erweitert werden.

Untersuchungen zum Einfluss von Faserlänge und -massegehalt auf die werkstoffmechanischen Eigenschaften langfaserverstärkter Polyurethanverbunde sind aus [13] bekannt. Jedoch werden hierbei nur Faserlängen bis max. 12 mm und Massegehalte bis max. 30 % betrachtet. Darüber hinaus werden in [14] die Auswirkungen verschiedener Prozessparameter auf die resultierende Faserverteilung und -orientierung im Verbund charakterisiert. Hierbei wird festgestellt, dass mit allen untersuchten Parametervariationen eine wahllose Faserablage und somit quasi-isotrope Materialeigenschaften erzielt werden. Eigene Arbeiten des Antragstellers zeigen, dass durch gezielte Variation der Prozessparameter Blas- und Oszillierluft beim LFI Verfahren eine Vorzugsrichtung bei der Ablage der Langfasern realisiert werden kann [15]. Somit lassen sich die mechanischen Eigenschaften Festigkeit und Steifigkeit deutlich steigern. Trotz des somit verbesserten Eigenschaftsspektrums bleibt das Anwendungspotential aufgrund, der Langfaserverstärkung auf mittlere Beanspruchungen beschränkt. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollen durch den Einsatz textiler Naturfaserhalbzeuge mit orientierter Faserausrichtung (Gewebe, Gelege, Geflechte) die werkstoffmechanischen Eigenschaften deutlich erhöht und somit der Leichtbaugrad entschieden verbessert werden.

Während das LFI-Verfahren für großflächige Leichtbaukomponenten prädestiniert ist, bietet die Flechttechnologie die Möglichkeit, komplexe 3D-Hohlprofile beispielsweise für Rahmenstrukturen ökonomisch herzustellen. Das Flechten gehört zu den klassischen textilen Verfahren und kommt verstärkt auch in der Faserverbundtechnik zum Einsatz, wo es sich als Alternative zum Wickelverfahren etabliert hat. Es ermöglicht die flexible Anpassung der Faserstruktur an die Beanspruchung durch beliebige Einstellung des Faserwinkels im Bereich von 5° bis 86° [16-19]. Durch Kombination einer Radial-Flechtanlage mit einem 5-Achs-Roboter können komplexe textile Naturfaserpreformen gefertigt werden (Abbildung 5).

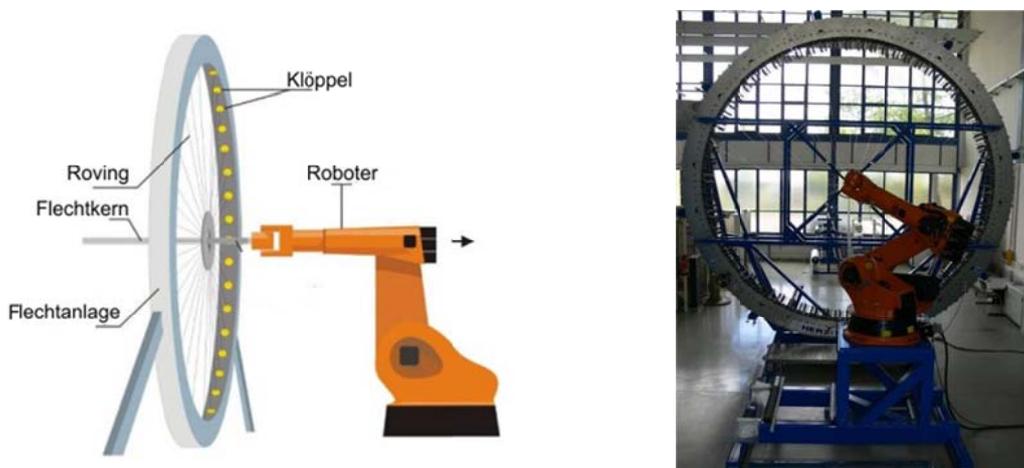


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Radialflechtanlage mit zugehörigem Industrieroboter (links) und Flechtsystem am ILK (rechts)

Sowohl der Querschnitt als auch die Geometrie in Längsrichtung können entlang der Flechtachse beliebig variieren. Unter Einsatz eines flexiblen Inliners zur Formgebung während der Konsolidierung können komplex geformte Hohlprofile, auch mit Mehrkammerquerschnitt hergestellt werden. Die erreichbaren Garnarchitekturen reichen von einer UD-Verstärkung bis hin zu dreidimensionalen Verstärkungsstrukturen. Weiterhin ermöglicht die Flechttechnologie die Integration funktionaler Elemente zwischen den einzelnen Flechtlagen. Die Übertragbarkeit des für die etablierten Verstärkungsfasern (Glasfaser, Kohlenstofffaser) erarbeiteten Technologie-Know-Hows auf Naturfaserwerkstoffe steht derzeit noch aus.

5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Neben den MATLEV-Projektpartnern (Warsaw University of Technology, S.Z.T.P. „TAPS“) wurde aufgabenspezifisch die Expertise weiterer Forschungsstellen und Industriepartner einbezogen. So erfolgten Untersuchungen zur Verarbeitung neuartiger, pulverförmiger Matrixsysteme mit thermoplastischen Verarbeitungseigenschaften und die Entwicklung zugehöriger Fertigungstechnologien in enger Kooperation mit der Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH, dem Institut für Polymerforschung der Technischen Universität in Stettin und dem polnischen Start-up Unternehmen „New Era Materials“. Darüber hinaus sind nachhaltige Beziehungen TU Rzeszow entstanden, insbesondere auf dem Gebiet Auswahl und Entwicklung von Füllstoffen zur Verbesserung der Brandschutzeigenschaften von Polyurethanen.

Im Zuge von Patentrecherchen und der Beantragung von Patenten wurden das Sachgebiet 5.3 Transfer der TU Dresden und die Anwaltskanzlei Kailuweit & Uhlemann Patentanwälte Partnerschaft mbB einbezogen. Die Arbeiten zur Werkzeug-, Anlagen- und Prozessentwicklung erfolgte in enger Abstimmung mit einschlägigen Industriepartnern, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht der Entwicklungspartner und zugehörigen Themengebiete

Firma	Thema
KrausMaffei Technologies GmbH	Schneidwerkentwicklung für Naturfasern
J. Schmalz GmbH	Greifertechnologien für Naturfaserhalbzeuge
August Herzog Maschinenfabrik GmbH & Co. KG	Adaption Flechtverfahren
Mühlmeier GmbH & Co. KG	Aufbereitung und Modifikation von Naturfasern
RÜHL PUROMER GmbH	Angepasste PUR-Systeme
BASF Polyurethanes GmbH	Angepasste PUR-Systeme
SWAP (Sachsen) GmbH	Angepasste Sandwich-Kernstrukturen

6 ERZIELTE ERGEBNISSE

Mit der ansteigenden Relevanz ökologischer und ressourcenschonender Aspekte bei der Herstellung und Nutzung innovativer Leichtbaustrukturen gewinnen naturbasierte Verstärkungsstrukturen zunehmend an Bedeutung. Die reine Substitution synthetischer Fasern ist in den meisten Fällen jedoch nicht ausreichend, da sowohl prozesstechnologische Aspekte als auch werkstoffspezifische Besonderheiten berücksichtigt werden müssen. Daher ist die ganzheitliche und durchgängige Entwicklung von Verbundstrukturen mit Naturfasern, beginnend mit der Aufbereitung der Fasern über die Fertigung bis hin zu den Verbundeigenschaften unter definierten Lasten, Gegenstand aktueller und auch zukünftiger Forschungsarbeiten. Im Rahmen des Vorhabens MATLEV wurden die Erforschung und Verarbeitung nachwachsender Naturfasern sowie die Entwicklung zugehöriger innovativer und effizienter Fertigungsprozesse zur Herstellung naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe fokussiert. Damit einhergehend wurden umfassende Kenntnisse zur werkstoffspezifischen Gestaltung der Prozess- und Fertigungskette sowie zur Auslegung und Simulation von naturbasierten Verbundstrukturen erarbeitet. Anhand ausgewählter Leichtbaukomponenten für ein elektrisch betriebenes Low-Emission Concept Vehicle (LEV) und deren technologischer Umsetzung in seriennahen Prozessen am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der Technischen Universität Dresden (TUD) wurde das Leichtbaupotenzial von Naturfaserverbundwerkstoffen dargestellt und validiert. Nachfolgend werden die unter Verwendung der Zuwendung erarbeiteten, wesentlichen Projektergebnisse erläutert.

6.1 Verfügbarkeit und Einteilung natürlicher Werkstoffe

Mit dem Einsatz von natürlichen Werkstoffen in Verbundstrukturen ist zunächst die Auswahl zweckmäßiger Verstärkungsfasern unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften und der Verarbeitbarkeit nötig. Im Rahmen umfassender Recherche-Tätigkeiten konnte eine Vielzahl an potenziellen Verstärkungsstrukturen identifiziert werden, die aufgrund ihrer Morphologie für verschiedene Anwendungsszenarien geeignet sind. Insbesondere für Leichtbaustrukturen mit moderaten Lastfällen sind Kurz- bzw. Langfasern oftmals ausreichend, um die Kunststoffmatrix ausreichend zu verstärken. Gängige Fasern unterschiedlichen Ursprungs sind dabei kommerziell verfügbar (Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht der verfügbaren Kurz- und Langfaserverstärkungen und Lieferanten

	Technische Kurzfaser (< 5mm)	Technische Langfaser (> 5mm)
Faserart	Baumwolle, Zellulose, Flachs, Hanf, Holz, Jute, Kenaf, Abacá	Abacá, Flachs, Hanf, Sisal
Hersteller	STW, BaFa, Flachsshop, JRS, Ecco, Sachsenleinen	STW, BaFa, Flachsshop, JRS, Ecco, Sachsenleinen

Oftmals erlauben die pflanzlichen Strukturen jedoch nicht die direkte Herstellung von Verstärkungskomponenten in Faserform. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von Füllstoffen, die als Nebenprodukt aus industriellen Prozessen anfallen und zunächst keine weitere Verwendung als die thermische Verwertung haben. Dennoch gibt es eine große Bandbreite an Füll- und Reststoffen, die zur Verstärkung einer Kunststoff-Matrix beitragen oder auch durch thermische Formgebung verarbeitet werden können. Ein Auszug der recherchierten Rest- und Füllstoffe ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht der verfügbaren natürlichen Abfall- und Nebenprodukte und Lieferanten

Nebenprodukt	Pflanzenart	Hersteller/Vertreiber
Pulver	Hanf, Holz, Getreide	Bausep, Jeluplast, Strohlos etc.
Schäben, Schalen	Flachs, Hanf, Holz, Lupine, Getreide, Sonnenblume, Schwarzkümmel, Reis, Schilf, Mais, Walnuss	Kuhmichel, Strohlos, Pro-Lupin, Bausep, Jeluplast, BAFA, Flaxbox etc.
Platten, Presskuchen	Getreide, Baumwolle, Bambus, Hanf, Reis, Nessel, Schilf, Zuckerrohr, Schwarzkümmel, Soja, Sonnenblume, Kokos	Strohlos, Leco, STW, Jeluplast, Aceites de Semillas etc.

Zur Verarbeitung natürlicher Verstärkungsstrukturen mit bereits etablierten Prozessen der Faserverbundtechnik ist eine Formgebung analog den synthetischen, technischen Halbzeugen notwendig. Auch aus mechanischer Sicht können nur Faserverstärkungen mit einem hohen Grad an Orientierung zu einer signifikanten Steigerung der Bauteileigenschaften führen. In diesem Zusammenhang konnten sich zahlreiche Hersteller am Markt etablieren, die sich jeweils auf verschiedene Halbzeugarten spezialisiert haben (Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht verfügbarer textiler Naturfaserhalbzeuge und Lieferanten

Halbzeugart	Faserart	Hersteller/Vertreiber
Gelege	Flachs, Leinen	Lineo, R&G etc.
Gewebe	Baumwolle, Flachs, Leinen, Hanf, Jute	Leco, Jules Tournier et fils, Composites Evolution, TimeOut, Hoffmann etc.
Vlies/Matte	Flachs, Leinen, Hanf	Norafin, Thermo-Hanf etc.
Endlofaser	Sisal, Jute, Hanf, Flachs, Leinen, Baumwolle, Bambus	Carl Kohl, Flachs und Leinen, Leco, Garn Connexion etc.

6.2 Untersuchungen zur Integration von Kurz- und Langfasern

Die Auswahl von geeigneten Naturfaserhalbzeugen orientierte sich im Rahmen von MATLEV unter Berücksichtigung der hierfür beantragten und bewilligten Sachmittel vorrangig an kommerziell verfügbaren Produkten, wobei neben den im europäischen Raum produzierten Naturfasern, wie etwa Hanf und Leinen, auch Faserstrukturen aus Bambus untersucht wurden. Trotz der Tatsache, dass die typische Vegetationszone der Bambuspflanze außerhalb Europas liegt, zeigt die Bambusfaser einige charakteristische Eigenschaften, die sie für die zukünftige Anwendung in Verbundwerkstoffen prädestiniert. Neben einer generell hohen Faserqualität mit für Naturfasern vergleichsweise hohen Steifigkeiten und Festigkeiten ist die hohe Verfügbarkeit, unter anderem bedingt durch das schnelle Wachstum der Pflanze, ein wichtiger Aspekt und verstärkt die ökonomische und ökologische Bedeutung dieses Werkstoffs. Die resultierenden mechanischen Eigenschaften eines mit Bambusfasern verstärkten Kunststoffes und dabei insbesondere die Tränkung mit Hilfe einer expandierenden PUR-Matrix sowie die sich daraus ergebenden prozesstechnologischen Herausforderungen bildeten die Schwerpunkte erster Arbeiten. Zur reproduzierbaren Herstellung plattenförmiger Verbundstrukturen wurde unter Einsatz des hierfür beschafften Plattenwerkzeugs ein Prozesspfad entsprechend der Verfahrenscha-

rakteristik des Long-Fibre-Injection-(LFI)-Prozesses entwickelt und umgesetzt (Abbildung 6).

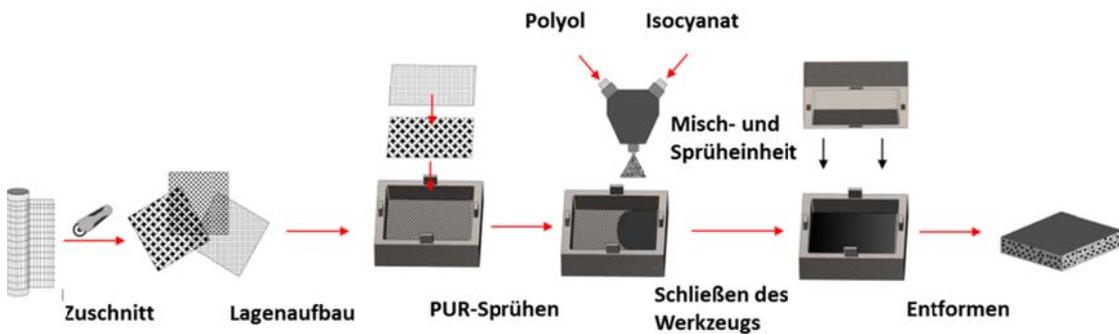


Abbildung 6: Prozesspfad zur Herstellung naturfaserbasierter Verbundstrukturen im Polyurethan-Sprühverfahren

Zugeschnittene Halbzeuge bzw. Faserstrukturen werden in dem geöffneten Werkzeug positioniert und mit einer Polyurethan-Matrix besprüht. Zur Gewährleistung eines vergleichbaren Fasermassegehaltes wurde die Lagenanzahl/Flächengewicht der jeweils verwendeten Zuschnitte entsprechend angepasst. Nach Beendigung des Sprühvorgangs erfolgt das Schließen des Werkzeugs, sodass nun die eingelegten Strukturen von der expandierenden Matrix imprägniert werden. In Abhängigkeit des verwendeten PUR-Systems sind charakteristische Prozessparameter, wie etwa Schließzeit des Werkzeugs oder Werkzeugtemperatur, einstellbar. Einen Überblick hierzu erlaubt Tabelle 5, die eine Zusammenfassung der wichtigsten Parameter für das verwendete PUR-System *Elastoflex E3851/102* der Firma BASF darstellt.

Tabelle 5: Verarbeitungseigenschaften des PUR-Systems Elastoflex E3851/102 von BASF und gewählte Prozessparameter zur Herstellung von Verbundstrukturen

Parameter	Einheit	Polyol	Isocyanat
Dichte (bei 25°C)	[g/cm ³]	1,07	1,23
Viskosität (bei 25 °C)	[mPas]	1600	220
Mischungsverhältnis	[g]	100	215
Polyurethan-Mischung			
Freie Schaumdichte	[kg/m ³]	125	
Startzeit	[s]	85	
Steigzeit	[s]	135	
Prozessparameter			
Werkzeugtemperatur	[°C]	80	
Verarbeitungstemperatur PUR	[°C]	23	

Reaktionszeit	[s]	300
Plattenmaße	[mm]	650 x 650 x 2
Matrixmasse	[g]	500

Beginnend mit dem Rohmaterial der Bambusfasern, das zunächst in Form einer kompakter Faserstoffmasse vorlagen, erfolgte die Herstellung einer geeigneten Preform (Abbildung 7). Dabei mussten die kompakten Faserbereiche, die sonst nur mit einer unzureichenden Qualität zu tränken wären, aufgelöst und homogenisiert werden.



Abbildung 7: Rohmaterial der Bambusfaser mit hohem Anteil von kompakten Faserbereichen (links) sowie aufgelöste und homogenisierte, flächige Preform (rechts)

Einhergehend mit der Aufbereitung der Preform ergaben sich zahlreiche prozesstechnologische Herausforderungen. Bedingt durch die lockere Packungsdichte des Fasermaterials und der zusätzlich geringen Faserdichte wird die Preform durch den Druck des Matrix-Sprühstrahls in ihrer Position und Form derart verändert, dass die Herstellung qualitativ hochwertiger Verbundbauteile nur eingeschränkt möglich war. Preformstrukturen mit deutlich erhöhtem Flächengewicht von über 300 g/m² konnten hingegen gleichmäßig besprüht werden und zeigten vergleichsweise geringe Faserverschiebungen. Zur reproduzierbaren Verarbeitung von Preformen mit geringem Flächengewicht wurden diese mit einer dünnen Schicht eines Sprühklebstoffs benetzt. Die sich damit einstellende Fixierung der Fasern stabilisierte die Preform insgesamt, sodass nunmehr ein gleichmäßiger Matrixauftrag möglich wurde. Die Bewertung der Verbundstruktur erfolgte über computertomographische Aufnahmen (CT), die einen Einblick auf die Verteilung der Bambusfasern innerhalb der Versuchsplatte zuließen (Abbildung 8).

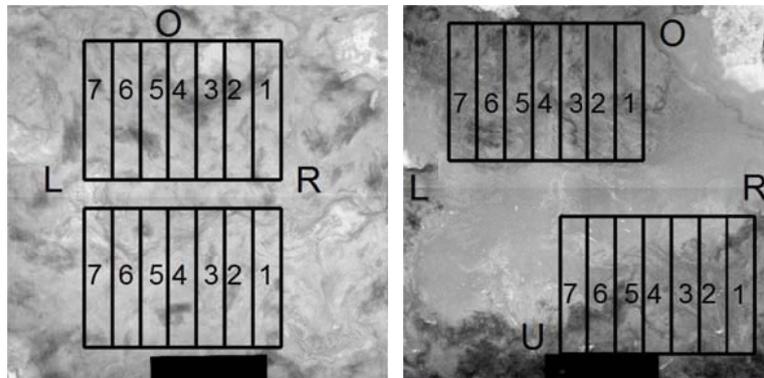


Abbildung 8: CT-Aufnahmen einer Bambusfaser-Verbundstruktur mit ungereinigter (links) und gereinigter, chemisch vorbehandelter Verstärkungsfaser (rechts)

Insgesamt zeigten die Aufnahmen eine vergleichsweise inhomogene Verbundstruktur mit zahlreichen dunklen und hellen Bereichen. Diese farblichen Unterschiede resultieren aus verschiedenen Absorptionsgraden der Struktur, die somit auf lokale und zum Teil starke Streuung der Werkstoffdichte schließen lassen. Als Ursache ist die nicht ausgereifte Aufbereitung des kompakten Rohmaterials zu einer homogenen Preform-Struktur anzuführen, sodass sich eine Vielzahl von lokal verdichteten und unverdichteten Faserbereichen einstellt. Damit einhergehend wird auch die Fasertränkung lokal beeinflusst, da in Bereichen hoher Faserdichte ein Eindringen der Matrix erschwert wird. Zur Bewertung dieser Inhomogenitäten im Hinblick auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften wurden den Versuchsplatten Probekörper entnommen und vorrangig hinsichtlich ihrer Zugeigenschaften untersucht. Dabei erfolgte die Prüfung von Verbundproben mit verschiedenen Fasermassegehalten (10 % - 40 %) sowie Referenzproben ohne Klebschicht, um auch hier den Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften zu bewerten. Generell konnte eine Erhöhung von Steifigkeit und Festigkeit mit zunehmendem Fasermasseanteil ermittelt werden, wobei keine Linearität zwischen diesen Parametern besteht (Abbildung 9).

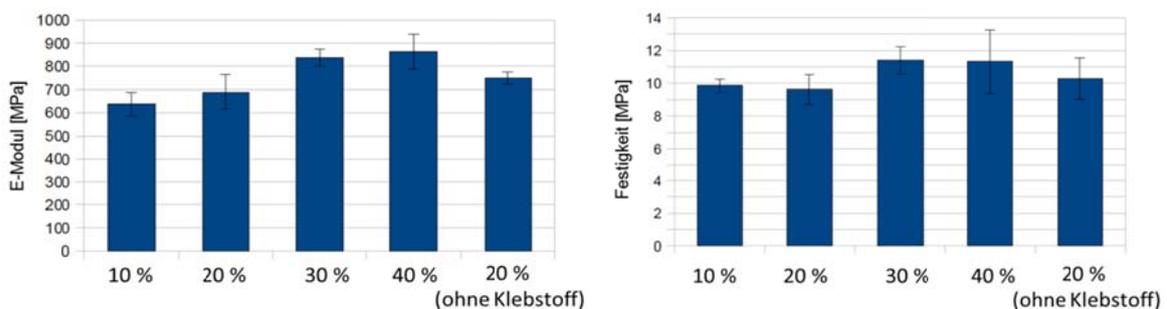


Abbildung 9: Vergleich der mechanischen Eigenschaften E-Modul (links) und Festigkeit (rechts) bei Variation der Fasermasseanteile bzw. Auftrag von Sprühklebstoff zur Fixierung der Preform

Die zum Teil stark ausgeprägte Varianz der ermittelten Kennwerte ($> 25\%$) lässt sich sowohl auf die beschriebenen Inhomogenitäten als auch die Verteilung der Fasern zurückführen. Schliffbildaufnahmen der Verbundstruktur zeigen die inhomogene Faserverteilung im Verbundquerschnitt, insbesondere bei niedrigen Fasermassegehalten. Mit einem steigenden Faseranteil wurde eine verbesserte Verteilung erzielt, wobei es dennoch zur Ausbildung von Bereichen mit hoher Faserkonzentration kommt (Abbildung 10).

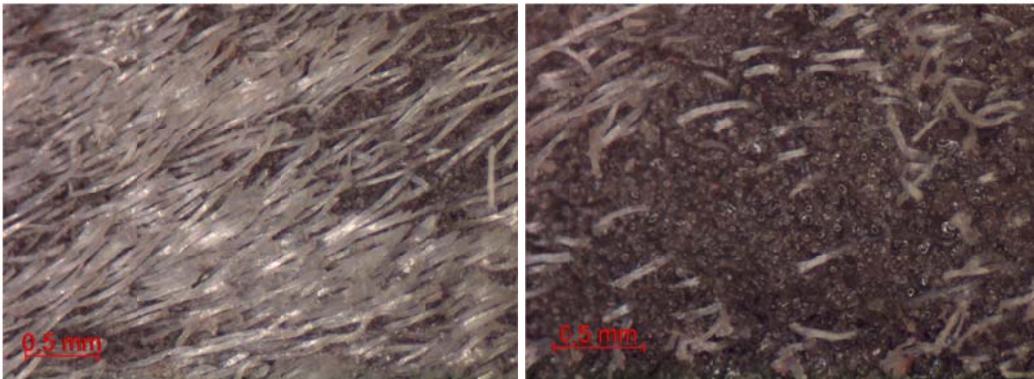


Abbildung 10: Mikroskopische Aufnahmen der Verbundstruktur von bambusfaserverstärkten Polyurethanverbunden mit hohem (links) und niedrigem Fasermasseanteil (rechts)

Neben der Verarbeitung von Preformstrukturen mit undefinierter Geometrie wurden zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften Naturfaserverstärkungen in Form von Lang- bzw. Endlosfasern in die Untersuchungen einbezogen. Dabei stellte insbesondere die automatisierte Integration von geschnittenen Langfasern in einem auf dem LFI-Prozess basierenden Schneidverfahren eine technologische Herausforderung dar. In den bislang am ILK durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich spröde Verstärkungsfasern, wie etwa Basalt-, Glas- oder auch Kohlenstofffasern erfolgreich schneiden lassen. Dem gegenüber war das Schneiden der weniger spröden Naturfasern nicht dauerhaft möglich, da das Garn in die Kunststoffrolle gedrückt und unzureichend geschnitten wurde. In der Folge bildeten sich zunehmend Ablagerungen aus nicht geschnittenen Fasern, die an der Elastomerrolle anhaften und zum Abbruch des Prozesses führten (Abbildung 11).

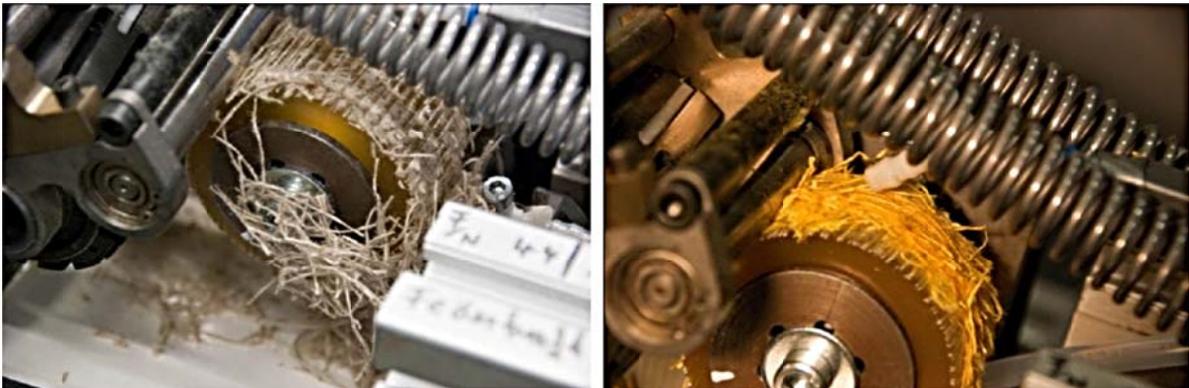


Abbildung 11: Versuche zum Schneiden von Leinenfasern mit verschiedenen Spezifikationen im Schneidwerk ohne Kühlung

Daher stand die Konzeption und technologische Umsetzung eines für die Verarbeitung von Naturfasern geeigneten prototypischen Schneidwerks im Vordergrund der weiteren Arbeiten. Das erarbeitete Konzept sieht dabei die Verwendung des Standard-Schneidwerks vor, wobei die Fasern direkt vor dem Schneidvorgang mit Hilfe flüssigen Stickstoffs künstlich versprödet werden. Für dieses Konzept erfolgte unter Ausschöpfung der hierfür bewilligten Mittel die Entwicklung eines entsprechenden Prüfstands, dessen Tauglichkeit anhand von Schneiduntersuchungen an Leinen-, Flachs-, Sisal-, Jute- und Sisal-Hanf-Mischfasern nachgewiesen wurde (Abbildung 12).

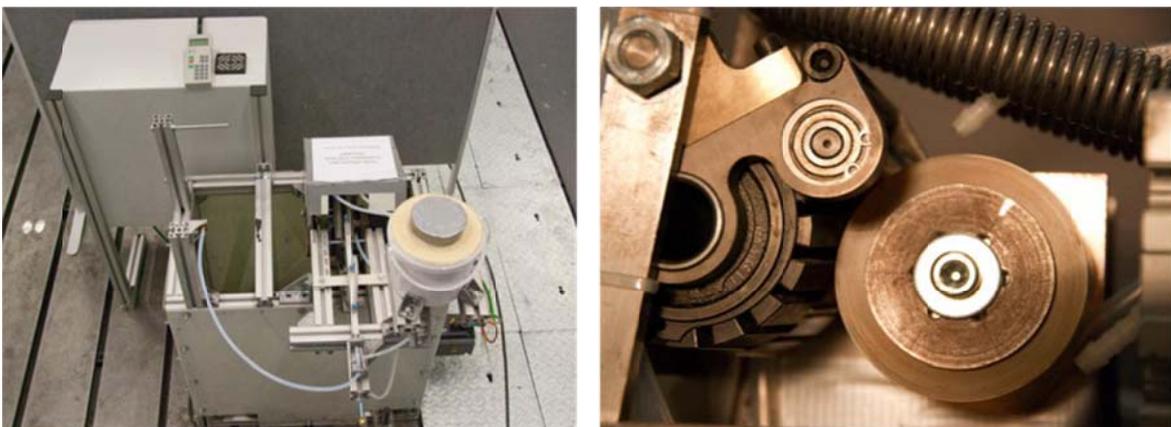


Abbildung 12: Schneidprüfstand (links) und Detailansicht Schneidwerk mit Stickstoffzuführung (rechts)

Mit dem entwickelten Schneidwerk es ist nun möglich, mit vergleichsweise geringem Aufwand Naturfasern in den LFI-Prozess zu integrieren. Durch den Einsatz von Stickstoff als Kühlmittel zur Versprödung der Fasern kann im Labormaßstab ein reproduzierbares

Schnittgut mit definierter Faserlänge und ein stabiler Prozess gewährleistet werden (Abbildung 13).



Abbildung 13: Schnittgut eines Leinen- (links) und Hanfgarns (rechts) mit und ohne Stickstoffkühlung

6.3 Untersuchungen zur Integration textiler Halbzeuge

Im Hinblick auf die Fokussierung auf tragende Leichtbaustrukturen wurden bauteilspezifische Anforderungen und Spezifikationen definiert, die den Einsatz textiler Halbzeuge als Verstärkungskomponente unumgänglich machten (Abbildung 14). Die Auswahl geeigneter Halbzeuge erfolgte zur besseren Vergleichbarkeit der produzierten Ergebnisse unter Festlegung des Halbzeugtyps, des Flächengewichts sowie der Bindungsart.

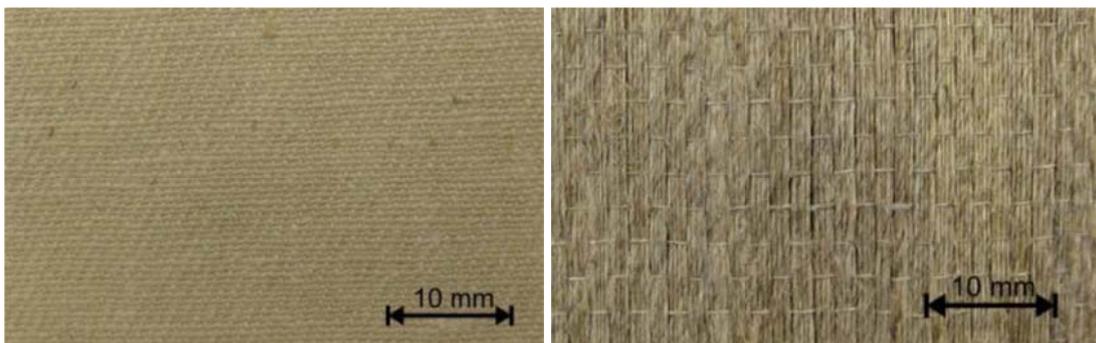


Abbildung 14: Beispiele für untersuchte Naturfaserhalbzeuge: Hanf-Gewebe (links) und Leinen-Unidirektional-Gewebe (rechts)

Die Bauteil-Performance faserverstärkter Kunststoffe ist neben den Eigenschaften von Faser und Matrix insbesondere von der Verbundqualität abhängig. Dabei spielen die Aspekte Tränkungsgrad, mikrostrukturelle Fehlstellen und auch Faser-Matrix-Anbindung eine dominierende Rolle. In ersten Prozessuntersuchungen stand daher die Herstellbarkeit

endlosfaserverstärkter NF-Verbunde im Vordergrund, wobei die Verbundqualität zunächst durch die Analyse der Mikrostruktur und anschließend durch mechanische Charakterisierungen evaluiert wurde. Zur quantitativen und qualitativen Beschreibung der Verbundqualität wurden mikroskopische Aufnahmen der Laminatquerschnitte aufgenommen und mit einer Bildanalysesoftware ausgewertet. Da es sich bei der verwendeten Matrix um ein expandierendes System handelt, sind sowohl im Bereich der Fasern als auch in matrixreichen Regionen zahlreiche Poren vorhanden. Diese Poren unterscheiden sich aufgrund unterschiedlicher Grauwerte sowohl von den kompakten Matrixanteilen als auch von den eingebetteten Fasern. Somit ist es mit Hilfe einer Grauwertanalyse möglich, definierte Grauwertanteile den Verbundelementen zuzuordnen und automatisiert die Porenfläche im betrachteten Querschnitt zu vermessen (Abbildung 15).

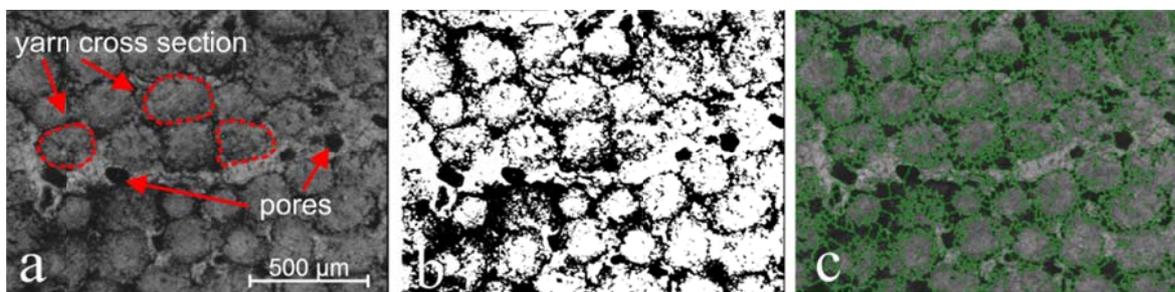


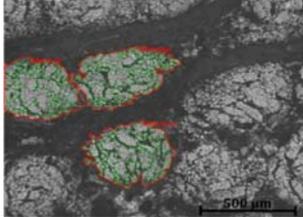
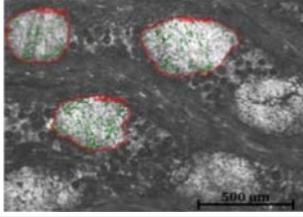
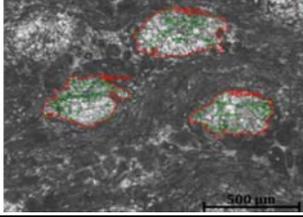
Abbildung 15: Mikroskopischer Ausschnitt eines mit expandierendem PUR getränkten Naturfaserverbundes (a), umgewandelt in eine binäre Darstellung, wobei schwarze Segmente Poren und ungetränkte Bereiche darstellen (b), automatisierte Vermessung der Flächenanteile mittels Grauwertanalyse (c)

Das Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung der Porenanteile in der betrachteten Ebene, sodass Aussagen über die Gartränkungen, ein wichtiges Qualitätsmaß von Faserverbundwerkstoffen, getroffen werden können. Mit der Variation definierter Spezifikationen der textilen Halbzeuge und konstanten Prozessbedingungen ist es nun möglich, die Abhängigkeit der Gartränkung von den Halbzeugeigenschaften zu bestimmen. In Tabelle 6 ist eine Übersicht der untersuchten Naturfaserhalbzeuge dargestellt.

Tabelle 6: Übersicht der untersuchten Naturfaserhalbzeuge

Halbzeug	Spezifikation	Abbildung	Bemerkungen
LEUD190	<ul style="list-style-type: none"> • Leinenfaser • UD-Gelege • 190 g/m² Flächengewicht 		<ul style="list-style-type: none"> • Homogene Faser-Matrix-Verteilung • Hohe Gartränkung (64,7 %) • Hoher Fasermassegehalt (65,8 %)

6 Erzielte Ergebnisse

<p>LEUD300</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Leinenfaser • UD-Gelege • 300 g/m² Flächengewicht 		<ul style="list-style-type: none"> • Garne verzweigen zunehmend aus ihrer kompakten Form • Garntränkung von 54,2 % • Fasermassegehalt: 56,7 %
<p>LEKÖ315</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Leinenfaser • Köperbindung • 315 g/m² Flächengewicht 		<ul style="list-style-type: none"> • Sehr hohe Garntränkung (89,6 %) bei Fasermassegehalt von 58,6 % • Nahezu keine Porenbildung im Garn, nur lokal in Bereichen ohne Verstärkungsmaterial
<p>HAKÖ330</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hanffaser • Köperbindung • 330 g/m² Flächengewicht 		<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Garntränkung (79,0 %) bei Fasermassegehalt von 50,5 % • Porenausbildung lokal ausgeprägt, zu einem geringen Teil im Garn

Zusammenfassend kann für diesen Teilbereich der Untersuchungen festgestellt werden, dass die untersuchten Naturfaserverbunde eine deutlich homogenere Faser-Matrix-Verteilung im Vergleich zu Glas- oder Kohlenstofffaserverbunden aufweisen, die bereits in vorangegangenen Untersuchungen analysiert wurden. Insgesamt ist der Garnquerschnitt nur vereinzelt mit Poren durchsetzt und weist einen hohen Anteil kompakter Matrix auf. Die Naturfasern sind somit in ihrer Position fixiert und besitzen eine gute Anbindung an die umliegenden Matrixbereiche, was eine wesentliche Voraussetzung für die Realisierung hoher mechanischer Eigenschaften ist. In reinen Matrixbereichen, wie etwa in Regionen stark ondulierter Garne, konnte die Entstehung von vergleichsweise großen Poren beobachtet werden. Diese sind mit mehr als 50 µm Durchmesser deutlich größer als die Poren innerhalb der Garne (< 10 µm), da diese bei der Nukleierung und im Blasenwachstum durch umliegende Fasern beeinflusst und im Wachstum gehindert werden. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass eine sehr gute Oberflächengüte bei einem gleichzeitig hohen Fasermassegehalt von bis zu 66 % realisierbar ist, wobei die Infiltration in Dickenrichtung mit Hilfe der expandierenden, reaktiven Matrix auch bei einer hohen Lagenanzahl ermöglicht wird.

Nach der umfassenden Analyse der Verbundqualität erfolgte die werkstoffmechanische Charakterisierung von normgerechten Probekörpern, die aus den zuvor gefertigten Verbundproben entnommen und präpariert wurden. Dabei lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Bestimmung von Biege- und Zugkennwerten sowohl in Faserrichtung (0°), als auch in Querrichtung (90°). Die hierbei ermittelten Werkstoffkennwerte bilden die Grundlage für die im weiteren Projektverlauf umzusetzende Auslegung und Dimensionie-

nung der Demonstratorstrukturen. Generell spiegeln die Ergebnisse der mechanischen Prüfungen auch den charakteristischen Aufbau der untersuchten Halbzeuge wieder. Naturgemäß zeigen die unidirektional verstärkten Halbzeuge in Faserrichtung die besten mechanischen Kennwerte, während quer zur Faserrichtung eher ein matrixdominierendes Verhalten mit deutlich reduzierten Kennwerten auftritt. Im Gegensatz dazu zeigen die Verbundstrukturen mit integrierten Gewebehalbzeugen trotz hoher Garntränkungen vergleichsweise geringe mechanische Eigenschaften, was sich sowohl durch die Faserorientierung als auch die zwangsläufig auftretende Faserondulation im textilen Halbzeug erklären lässt. Sowohl die ermittelte Steifigkeit als auch die Festigkeit haben in 0°- und 90°-Richtung Kennwerte in vergleichbarer Größenordnung. Die ermittelten Unterschiede liegen darin begründet, dass die Kett- und Schussfäden mitunter verschiedene Garnfeinheiten oder auch Fadenspannungen aufweisen, was sich direkt auf die mechanischen Kennwerte auswirkt. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Abbildung 16 dargestellt.

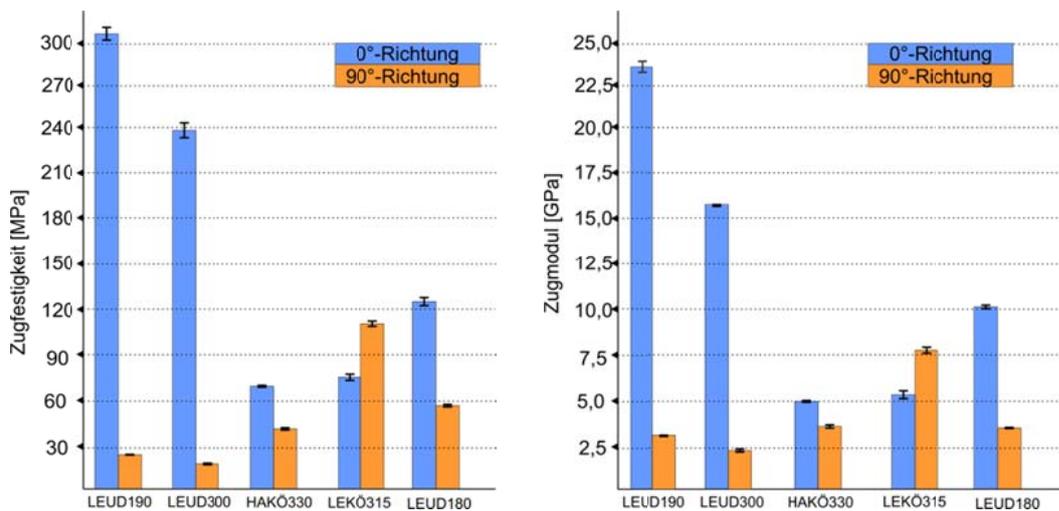


Abbildung 16: Im Zugversuch ermittelte Kennwerte Festigkeit (links) und Steifigkeit (rechts) der endlosfaserverstärkten NLFI-Verbunde

6.4 Modifizierung polymerer Werkstoffe zur Verbesserung der Flammbeständigkeit

Mit der Validierung der mechanischen Eigenschaften und der Analyse des Verbundaufbaus wurde ein wichtiges Teilproblem zum Einsatz natürlicher Faserstrukturen in Leichtbaukomponenten erfolgreich gelöst. In Ergänzung zur Erzielung hoher mechanischer Kennwerte und eines hohen Leichtbaugrads stellt die Brennbarkeit der untersuchten Naturfaserverbunde einen wichtigen Aspekt dar. Eine effiziente Möglichkeit zur Verbesserung des Brandverhaltens polymerer Werkstoffe besteht in der Modifizierung mit pulverförmigen Brandschutzmitteln. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern TAPS sowie

6 Erzielte Ergebnisse

der TU Warschau wurden zunächst folgende Anforderungen an diese Inhibitoren definiert:

- Fähigkeit zu einer homogenen Mischung mit einer Polymermatrix
- Keine Emission von toxischen Substanzen (im Hinblick auf den Arbeitsschutz)
- Kein (negativer) Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften
- Ökologische Unbedenklichkeit
- Niedriger Preis

Unter Berücksichtigung der definierten Anforderungen wurden für die weiteren Untersuchungen folgende Additive ausgewählt:

- Melamine (MM)
- Triethyl-phosphate (TEP)
- Diphenyl-2-ethylhexyl-phosphate (DPO)
- Tris(2-chloro-1-methylethyl)-phosphate (TCPP)
- Graphite (GRA)

Das Brandverhalten wurde zunächst an Standard LFI-Verbunden ohne Zugabe von natürlichen Verstärkungsfasern analysiert. Dabei erfolgte neben der Untersuchung der Wirkung einzelner Zusatzstoffe auch die Kombination verschiedener Brandschutzmittel auf das Brandverhalten. Die Bewertung der modifizierten Kunststoffe erfolgte nach den geltenden Normen DIN EN ISO 4589 und DIN EN 2825 durch die Bestimmung des Sauerstoffindex (LOI) und der Rauchgasdichte. Der LOI-Wert gibt dabei die benötigte Sauerstoffkonzentration an, die zur Verbrennung nötig ist. Liegt dieser Wert über der natürlichen Sauerstoffkonzentration von Luft (etwa 21 %) gilt ein Werkstoff als selbstverlöschend. Abbildung 17 zeigt die ermittelten LOI-Werte und die Rauchgasdichten für die getesteten Spezifikationen.

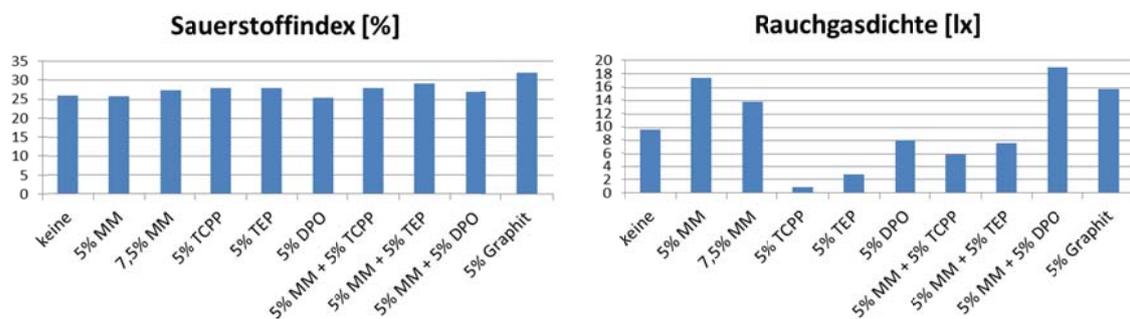


Abbildung 17: Ermittelte Werte des Sauerstoffindex (links) und der Rauchgasdichte (rechts) für die ausgewählten Flammschutzmittel

Im Vergleich zur unbehandelten LFI-Struktur führen die meisten Füllstoffe zu einer leichten Anhebung des Sauerstoffindexes, wobei Graphit den höchsten Einfluss zur Verminderung der Brennbarkeit zeigt. Die Dichte und Toxizität der entstehenden Gase ist mitunter entscheidend für den Einsatz polymerer Werkstoffe in kritischen Anwendungen. Mit Hilfe der Rauchgasdichte-Messung kann der Einfluss der Flamm-Inhibitoren auf das Brandverhalten bewertet werden. Während vereinzelte Additive zu einer signifikanten Erhöhung der Rauchgasdichte beitragen, zeigen TCPP und TEP vorteilhafte Auswirkungen auf das Brandverhalten der Verbundstruktur.

Die Zugabe partikelförmiger Additive hat in der Regel auch Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Verbundstruktur. Generell werden im Hinblick auf ein deutlich verbessertes Brandverhalten geringe Degradationen akzeptiert. In Abbildung 18 ist der Einfluss der untersuchten Füllstoffe auf die Festigkeit der PUR-Verbunde dargestellt.

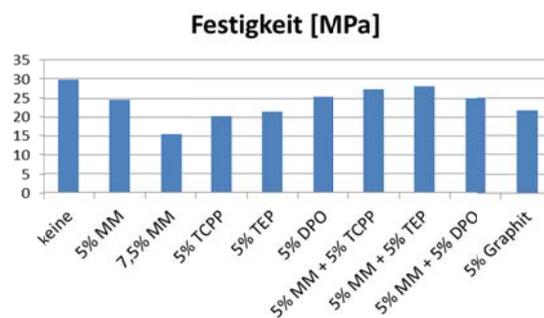


Abbildung 18: Einfluss ausgewählter Flamschutz-Additive auf die Festigkeit der Verbundstruktur

6.5 Integration von Holzfurnieren zur Verbesserung der Oberflächenqualität

Naturfaserhalbzeuge auf Basis von Hanf- und Leinengeweben wurden im Rahmen von MATLEV erfolgreich mit einer expandierenden Polyurethanmatrix imprägniert. Dabei konnte gezeigt werden, dass die resultierenden Verbunde im Vergleich zu zellulären PUR-Strukturen mit synthetischen Fasern deutlich verbesserte Tränkungsgrade innerhalb der Rovings aufweisen. Die mechanischen Eigenschaften liegen im Bereich vergleichbarer endlosfaserverstärkter GFK-Verbunde. Insbesondere für den Einsatz im Sichtbereich, wie etwa im Interieur von Elektromobilen, sind die entwickelten Naturfaser-Verbundwerkstoffe bislang nur eingeschränkt einsetzbar. Zur Verbesserung der Oberflächenqualität wurde die prozess- und werkstoffgerechte Integration von hochwertigen Dekorstrukturen untersucht. Dabei sind Holz-Furniere aufgrund ihrer hervorragenden Optik und Haptik für den Einsatz im Interieur von Automobilen geradezu prädestiniert und bereits seit Jahren Stand der Technik. Im Rahmen dieses Arbeitspakets erfolgten das

Hinterschäumen ausgewählter Holz-Furniere mit einer Polyurethan-Matrix und die Analyse der Werkstoffanbindung. Neben der in Europa beheimateten Esche (*Fraxinus excelsior*) wurde die alternative Holzart aus Bambus (*Phyllostachys pubescens*) in die Untersuchungen einbezogen, die aufgrund ihrer vergleichsweise schnellen Wuchsgeschwindigkeit und ihres geringen Preises ein besonders hohes Potenzial für den Einsatz in naturbasierten Leichtbaustrukturen besitzt.

Zur Bewertung der Anbindung zwischen PUR-Matrix und Holz-Furnier wurden Schliffbilder gefertigt und die Struktur mit lichtmikroskopischen Hilfsmitteln aufgelöst (Abbildung 19). Anhand der mikroskopischen Aufnahmen ist der Grenzbereich zwischen Kunststoff und Holzfurnier hochaufgelöst zu erkennen. Durch die Einfärbung der PUR-Matrix können somit getränkte Bereiche identifiziert und die wirkenden Mechanismen beschrieben werden.

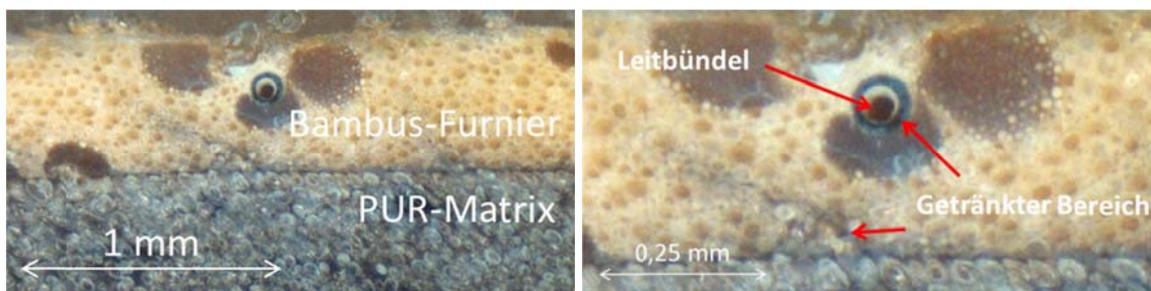


Abbildung 19: Hinterschäumtes Bambus-Furnier hergestellt im Polyurethan-Sprühverfahren (links) und Vergrößerung der mit PUR-Matrix getränkten Bereiche (rechts)

Das Holzfurnier besteht aus einer Vielzahl von Zellen, die während der Lebensphase der Pflanze mit Wasser und Nährstoffen gefüllt sind. Mit der wirtschaftlichen Verwertung und der damit einhergehenden Trocknung und Verarbeitung der Bambus-Pflanze kommt es zur Verholzung, sodass eine geschlossenzellige Struktur der Zellwände aus Zellulose, Hemizellulose und Lignin übrig bleiben. Im untersuchten Abschnitt zeigt sich kaum ein Eindringen des expandierenden Polyurethans in das Holzgefüge. Lediglich an wenigen Stellen der Holzstruktur konnte eine tatsächliche Tränkung dieser beobachtet werden. Vermutlich war an dieser Stelle der Zellverbund des Holzes beschädigt, sodass ein Eindringen erleichtert wurde. Darüber hinaus stellen die Leitbündel, die für den Wasser- und Nährstofftransport innerhalb der Pflanze verantwortlich sind, eine geeignete Struktur dar, um die expandierende PUR-Matrix zu leiten. Es konnte an mehreren Proben gezeigt werden, dass sich die Matrix entlang der Leitbündel bewegt und diese ausschäumt, ohne dabei weiter in den verholzten Zellverbund vorzudringen. Analoge Tränkungsmechanismen wurden bei der Untersuchung des Eschen-Furniers festgestellt, wobei bei dem stärkeren Furnier (2,0 mm im Vergleich zu 0,7 mm) ein geringeres Eindringen der PUR-Matrix beobachtet wurde (Abbildung 20).

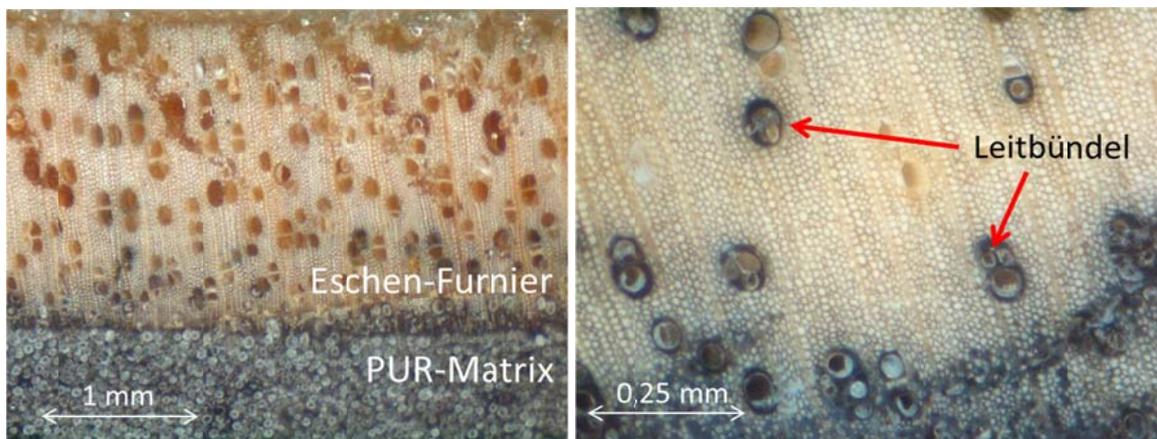


Abbildung 20: Hinterschäumtes Furnier aus Eschenholz hergestellt im Polyurethan-Sprühverfahren (links) und vergrößerte Darstellung des getränkten Bereichs (rechts)

Im Gegensatz zum Bambus-Furnier ist im gesamten zur Matrix zugewandten Bereich ein Eindringen des PURs in die Holzstruktur zu erkennen. Dabei werden jedoch nicht die Zellen selbst sondern eher die Zellstege mit der Kunststoff-Matrix gefüllt. Auch die Leitbündel des Eschen-Furniers sind vollständig in Faserrichtung ausgeschäumt, wobei dieses Phänomen lediglich im unteren Drittel des Furniers beobachtet werden konnte. Bei hohen Umformgraden des Furniers, die bei der Integration in Bauteile mit komplexer Geometrie nötig sind, können Risse im Holzverbund eingeleitet werden, die das Eindringen der Matrix erleichtern und die Optik durch Matrixablagerungen an der Oberfläche beeinträchtigen. Unbehandelte Furniere sind daher für hohe Umformgrade ungeeignet (Abbildung 21).

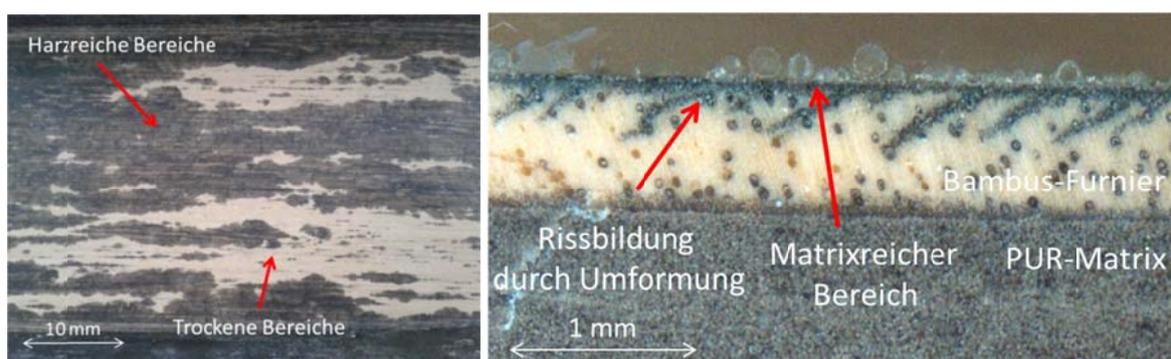


Abbildung 21: Oberfläche eines Bambus-Furniers mit Bereichen verminderter Oberflächenqualität sowie Bereichen guter Anbindung und hoher Oberflächengüte (links), Mikroskopische Aufnahme eines einlagigen, hinterschäumten Holz-furniers mit Rissen an der Oberfläche und sich einstellenden, harzreichen Bereichen

Dreidimensional verformbare Holzfurniere zählen bereits zum Stand der Technik und sind kommerziell verfügbar [20, 21]. Im Rahmen dieses Projektes wurden die Untersuchungen auf die Anbindung zwischen Schaumstoff und Holzfurnier beschränkt. Eine Verbesserung der Oberflächengüte kann einerseits durch dickere Furniere, aber auch durch die Anbindung mehrerer, dünner Furnierlagen erzeugt werden, die durch die harzreichen Bereiche in den Zwischenlagen miteinander verbunden werden. Somit weist die eigentliche Bauteiloberfläche eine homogene, hohe Oberflächengüte auf (Abbildung 22).



Abbildung 22: Oberfläche eines Bambus-Furniers mit hoher Oberflächengüte (links) und guter Anbindung der Furnierlagen durch harzreiche Bereiche in den Zwischenlagen (rechts)

Doch auch hier sind die Umformgrade der unbehandelten Holzfurniere stark eingeschränkt, sodass eine Verarbeitung für Bauteile mit komplexer Geometrie im Rahmen dieses Projektes nicht möglich war. Die prinzipielle Tauglichkeit einer werkstoffgerechten Anbindung von Holzfurnieren durch Hinterschäumen mit einer expandierenden Polymer-Matrix konnte jedoch nachgewiesen und sowohl in großflächigen Strukturen als auch in kleineren, flächigen Teilbereichen von Bauteilen angewendet werden.

6.6 Entwicklung angepasster Prozesse und Technologien

Neben der umfassenden Charakterisierung und Beschreibung der Naturfaserverbunde bildet die Adaption bestehender Verfahren im Hinblick auf die Verarbeitung von Naturfasern einen weiteren Schwerpunkt des Vorhabens. Mit der generellen Fokussierung auf duroplastische Kunststoffe werden im Rahmen von MATLEV vorrangig Sprühverfahren auf Basis von Polyurethanen und der Resin-Transfer-Moulding-(RTM)-Prozess adressiert.

Für die Weiterentwicklung des LFI-Verfahrens zur Herstellung hoch beanspruchbarer naturfaserverstärkter Leichtbaukomponenten ist die Integration textiler Strukturen unumgänglich. In diesem Zusammenhang müssen zahlreiche Randbedingungen berücksichtigt und entwickelte Konzepte für eine erfolgreiche Umsetzung mit Hilfe umfassender Expe-

perimente validiert werden. Eine reproduzierbare Fertigung mit geringem Bauteilausschuss kann nur über eine automatisierte und präzise Zuführung der biegeschlaffen, textilen Strukturen in das offene Werkzeug erfolgen. Daher erfolgten unter Verwendung der hierfür bewilligten Sachmittel die Konzeption und Umsetzung einer Handlingseinrichtung auf Basis eines Linearführungssystems, das bestmöglich die baulichen Gegebenheiten berücksichtigt. Vor allem die Aufspannfläche des Werkzeugträgers (2,4 x 1,8 m) konnte als mögliche Problemstellung identifiziert werden, da für das mittige Platzieren der Halbzeuge ein vergleichsweise langer Hub von etwa 1.800 mm notwendig ist. Dieser Verfahrensweg wird durch eine pneumatisch betriebene Lineareinheit realisiert, die den Greifrahmen in der horizontalen Ebene bewegt. Um das aus dem Hebelarm sowie den Gewichten der Linearführung und des Greifersystems resultierende Biegemoment aufzunehmen, wurde ein entsprechend ausgelegtes Gestell konzipiert. Zudem erfolgt eine Abstützung der ausgefahrenen Kolbenstange durch einen Stützzylinder mit Feststelleinheit, die auch ein zu starkes Schwingen unterbindet und somit eine reproduzierbare und positionsgenaue Ablage der Halbzeuge ermöglicht (Abbildung 23).

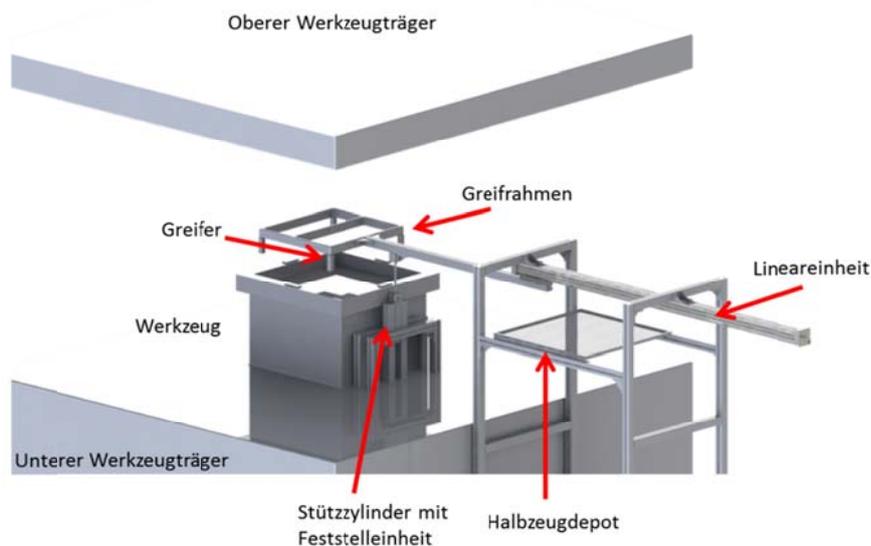


Abbildung 23: CAD-Modell des Handlingsystems zur Handhabung flächiger Naturfaserhalbzeuge

Die Konstruktion, Dimensionierung und Auslegung des Handlingsystems erfolgte zunächst mittels gängiger CAE-Software, sodass wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der benötigten Stabilität der Gesamtkonstruktion gewonnen werden konnten. Insbesondere auftretende Schwingungen im Betrieb wurden durch den Einsatz von Doppelkammerprofilen und deren Befestigung sowohl am Hallenboden als auch an Stahlträgern des Werkzeugträgers kompensiert. Die Positionierung der Gesamtkonstruktion erfolgte unter Be-

rücksichtigung der Zugänglichkeit sowie des zur Verfügung stehenden Bauraums. Die Umsetzung eines Handlingsystems bedingt die Auswahl und Evaluation geeigneter Greifertechnologien. Mit der Definition eigener Randbedingungen, wie etwa der Vermeidung von Einstichen an der Halbzeugstruktur sowie dem Einsatz von Druckluft als Energiequelle, wurde frühzeitig der Einsatz von Sauggreifern favorisiert. Speziell für das Handling textiler Halbzeuge entwickelte Sauggreifer erlauben unter Ausnutzung des Coanda-Effekts das Greifen der Textilien, ohne die Faserarchitektur negativ zu beeinflussen. Im Rahmen von Voruntersuchungen zum Ansaugen ausgewählter, textiler Strukturen wurde dabei die Anzahl und Spezifikation der Greifer evaluiert. Mit der gleichmäßigen Anordnung von neun Sauggreifern innerhalb des konzipierten Greifrahmens konnte das einheitliche und reproduzierbare Ansaugen, das Halten während des Transports und das positionsgenaue Ablegen im Werkzeug realisiert werden. Voraussetzung dafür ist die initiale Platzierung der textilen Halbzeuge in einer definierten Position im Depot des Handlingsystems. Für die automatisierte Verarbeitung mehrerer Textillagen gleichzeitig sowie dem Ansaugen einzelner Lagen wurden verschiedenen Einflussgrößen identifiziert und untersucht. Zum einen hat die textile Architektur des Halbzeugs (Flächengewicht, Garntiter, Bindungsart) einen direkten Einfluss auf die Luftdurchlässigkeit und somit auf die mit einem konstanten Luftstrom maximale Anzahl an ansaugbaren Lagen. Mit dem hier umgesetzten Greifsystem können bei einem Ansaugdruck von 8 bar und mit Saugflächen von 40 mm Durchmesser bis zu 8 Lagen eines Leinengewebes mit Köperbindung und 315 g/m² Flächengewicht angesaugt und reproduzierbar transportiert werden. Für das definierte Ansaugen einzelner Textillagen von einem Stack ist der Ansaugwinkel der Greifer entscheidend (Abbildung 24). Der angepasste Winkel wurde in experimentellen Untersuchungen bestimmt und beträgt für das vorrangig eingesetzte Leinwandgewebe etwa 35°.



Abbildung 24: Greifrahmen mit gleichmäßiger Anordnung der Sauggreifer der Fa. J. Schmalz GmbH (links); Anstellwinkel des Sauggreifers zur Aufnahme einzelner Textillagen (rechts)

Für die Herstellung großflächiger Leichtbaustrukturen können vorgefertigte Halbzeuge zu geeigneten, endkonturnahen Preformen verarbeitet und mit Hilfe der entwickelten Handlingseinrichtung in den Prozess integriert werden.

Im Zuge der Untersuchungen zur Verarbeitung von Naturfasern im Flechtverfahren standen insbesondere die Verarbeitungseigenschaften verschiedener Naturfasern unter Variation von Fasermaterial und Garnspezifikation im Vordergrund. Das Flechtverfahren, welches prinzipiell für die Herstellung rotationssymmetrischer Hohlprofile prädestiniert ist, wurde im Rahmen von MATLEV vor allem zur Fertigung von Preformen für komplex geformte Knotenstrukturen, beispielsweise für Karosserikomponenten des LEV eingesetzt. Verfahrensbedingt unterliegen die zu verarbeitenden Naturfasern sowohl statischen als auch dynamischen Lasten und müssen aufgrund der auftretenden Fadenspannungen ausreichend hohe Zugfestigkeiten aufweisen. Weiterhin resultieren hohe Reibungskräfte an den Kreuzungspunkten der Garne sowie am Flechtauge, die zu einem Aufspleißen der Naturfasern führen können. Im Rahmen erster Prozessuntersuchungen wurden unmodifizierte Naturfasergarne aus Hanf als verarbeitet. Da verwendete Laborflechtrad war mit 72 Spulenträgern und je 100 m Faserlänge bestückt. Der verwendete Flechtkeim mit 40 mm Durchmesser wurde von einem 5-Achs-Roboter gehalten und mit definiertem Vorschub horizontal bewegt (Abbildung 25, links). Für die Herstellung erster Flechtstrukturen wurden 4 Lagen mit einer Faserorientierung von $\pm 45^\circ$ festgelegt und umgesetzt. Diese Orientierung der Fasern stellt die optimale Ausrichtung für rotationssymmetrische Strukturen unter einem wirkenden Torsionsmoment dar. Bedingt durch die hohe Garnreibung am Flechtauge konnte ein ausgeprägtes Aufspleißen der Naturfasern beobachtet werden (Abbildung 25, mittig). Alternativ verwendete Sisal-Fasern zeigten dagegen eine verringerte Neigung zum Aufspleißen (Abbildung 25, rechts).



Abbildung 25: Laborflechtrad mit 72 Spulenträgern sowie automatisierte Bewegung des Flechtkeims durch einen 5-Achs-Roboter (links); Aufspleißen der Naturfasern bedingt durch hohe Garnreibung (mittig) und Flechtstruktur mit $\pm 45^\circ$ Faserorientierung und vermindertem Aufspleißen (rechts);

Neben dem Aufspleißen der Fasern ist die Reproduzierbarkeit der Faserablage aufgrund der hohen Reibungen erschwert. Darüber hinaus konnte ein kontinuierlicher Flechtprozess nur eingeschränkt umgesetzt werden, da es zum zahlreichen Versagen der unter Zugspannung stehenden Fasergarne kam. Mögliche Ursachen sind Beschädigungen der Garne in Folge des Flechtprozesses sowie lokale Inhomogenitäten. Damit einhergehend besitzt der resultierende Verbund, bedingt durch die verminderte Garnqualität, lediglich eingeschränkte mechanische Eigenschaften. In Zusammenarbeit mit Naturfaserherstellern wurden diese Probleme aufgegriffen und diskutiert. Das Aufbringen einer reibungsmindernden Faserschicht zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften gilt dabei als vielversprechend. Im Dialog mit Faserherstellern bzw. Lieferanten wurde jedoch erörtert, dass aktuell eine geringe Nachfrage nach geflochtenen Naturfaserverbunden besteht und auch zukünftig keine entscheidenden Impulse erwartet werden. Somit sind sowohl die Verarbeiter als auch Faserhersteller im Moment nicht bereit, umfassende Untersuchungen bzw. Investitionen in Forschung und Entwicklung für diese Problemstellung bereitzustellen. Die identifizierten technischen Herausforderungen sind jedoch nicht ohne die genannten Akteure zu bewältigen, sodass keine weiteren Aktivitäten zur Prozessentwicklung der hier fokussierten Flechttechnologie unternommen wurden.

Zur adäquaten Substitution der hierdurch gewonnenen Kapazitäten wurden im Sinne der Projekt-Philosophie weitere innovative Verfahren zur Herstellung von Leichtbaukomponenten mit Naturfaserverstärkung untersucht. Dabei konnte ein neuartiges duroplastisches Harzsystem identifiziert werden, welches im Ausgangszustand pulverförmig ist und durch Zufuhr von Wärme aufschmilzt. Durch eine spezielle Modifikation der chemischen Struktur kann das Harz individuellen Anforderungen hinsichtlich thermischer, chemischer und mechanischer Eigenschaften angepasst werden. Auch die Prozessfenster sind in weiten Grenzen einstellbar. Solange eine gewisse Grenztemperatur nicht überschritten wird, besitzt das Matrixsystem thermoplastische Eigenschaften, sodass ein Aufschmelzen beliebig oft möglich ist. Mit der vollständigen Vernetzung und Aushärtung zeigt das resultierende Bauteil schließlich vorrangig duroplastische Eigenschaften. Für das unter dem Namen ASSET-Powder erhältliche Harzsystem wurden angepasste Verarbeitungstechnologien entwickelt. Eine Prozessvariante stellt das Resin Powder Moulding (RPM) dar. Hierbei wird das Pulver analog zu einem Binder auf die textile Verstärkungsstruktur aufgetragen. Anschließend erfolgt in einem einzigen Arbeitsschritt die Umformung und Konsolidierung des Verbundbauteils, wobei vergleichsweise einfache Werkzeug- und Prozesstechnik eingesetzt werden kann. Somit entfällt die bei der Herstellung duroplastischer Verbundstrukturen üblicherweise notwendige, kostenintensive Dosier-technik für die Verarbeitung der flüssigen Harzkomponenten.

In Verbindung mit der vergleichsweise einfachen Prozesstechnik konnte ein hohes Potenzial zur Integration von Naturfasern identifiziert werden. Aufbauend auf Grundlagenuntersuchungen zur thermomechanischen und rheologischen Charakterisierung des Matrix-

Systems erfolgten die Erarbeitung geeigneter Prozessfenster sowie Untersuchungen zur Auswirkung definierter Prozessparameter auf die Verbundqualität.

Der generelle Prozessablauf gliedert sich in mehrere Abschnitte, wobei mit dem schichtweisen Aufbau der textilen Halbzeuge begonnen wird. Das zunächst pulverförmige Harzsystem wird nun auf den Lagenaufbau appliziert. Mit Hilfe einer institutseigenen Laborpresse erfolgen das Aufschmelzen der Matrix und das anschließende Verpressen der Verbundstruktur (Abbildung 26).

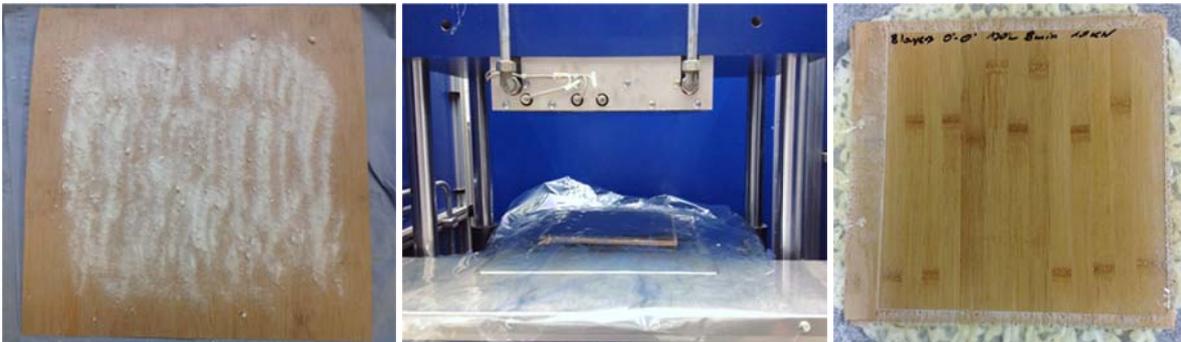


Abbildung 26: Appliziertes Matrix-Material auf einer textilen Preform bzw. Holzfurnier (links); Laborpresse zum Aufschmelzen der Matrix und Verpressen der Verbundstruktur (mittig); konsolidierte Verbundplatte mit Naturfaserverstärkung und Holzfurnier als dekorative Oberfläche (rechts)

Aus den umfangreichen Prozessuntersuchungen konnten grundlegende Randbedingungen zur Auslegung des Prozesses bestimmt werden. So erwiesen sich Pressdrücke im Bereich kleiner als 10 bar als ausreichend, um hohe Verbundqualitäten zu erzielen. Bei der Ermittlung geeigneter Temperaturführungen galt es, den Zielkonflikt zwischen hoher Grenztemperatur zum vollständigen Aushärten der Matrix und kurzen Taktzeiten einerseits sowie Schädigung der eingebrachten Naturfasern andererseits zu lösen. Dabei konnte in den Versuchen ein Temperaturbereich von 120 – 140 °C als Kompromiss bestimmt werden. Je nach gefordertem vernetzungsgrad direkt nach der Entformung und möglicher Anwendung eines Temperprozesses sind Entformungszeiten von deutlich unter 5 min (bis 2 min) möglich. Die Bewertung der Verbundqualität erfolgte mit Hilfe von mikroskopischen Aufnahmen, die es erlauben, den Tränkungsgrad und die Ausbildung von Fehlstellen, wie etwa Mikroporen bzw. Faserverschiebungen, zu untersuchen (Abbildung 27).

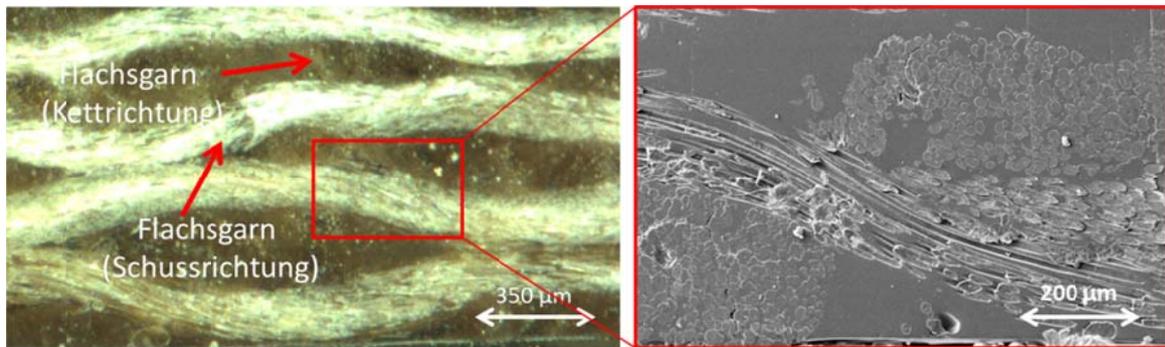


Abbildung 27: Mikroskopische Aufnahme eines flachfaserverstärkten Kunststoff-Verbundes (links), sowie die Bewertung der Tränkungsqualität (rechts)

Zusammenfassend zeigten alle mikroskopischen Aufnahmen eine sehr gute Tränkung der Naturfasern mit dem Pulverharz. Aufgrund der niederviskosen Eigenschaften der aufgeschmolzenen Matrix wurden auch Garne mit hoher Filamentzahl sowie Halbzeugstacks von bis zu 8 Lagen vollständig durchtränkt. Trotz des hohen Anteils an Luft, die durch den Pressvorgang aus dem Verbund entweicht, können fast keine Mikroporen bzw. Luft einschlüsse in der Verbundstruktur identifiziert werden, was für eine generell hohe Tränkungsgüte spricht. Ein Vergleich der mechanischen Verbundeigenschaften mit synthetischen Verstärkungsfasern zeigt einen reduzierten E-Modul und eine deutlich verminderte Festigkeit. Die dabei untersuchten Bruchflächen offenbarten viele freistehende Fasern, die zum Teil kaum mit Matrix bedeckt waren. Trotz der hohen Tränkungsqualität ist die Anhaftung der Matrix an der Naturfaser bislang noch unzureichend ausgebildet.

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt befasste sich daher mit der Modifizierung von Naturfasern zur Verbesserung der Matrixanhaftung. In Zusammenarbeit mit der TU Warschau wurden dazu Natronlauge (NaOH) und Kaliumpermanganat (KMnO_4) in einem vorgelagerten Aufbereitungsprozess den Fasern zugeführt und diese für eine definierte Einwirkdauer behandelt. Das Ziel dieser Behandlung ist der Aufschluss der reaktiven Naturfaseroberfläche und die Bildung von ionisierten Reaktionspartnern, die somit direkt mit offenen chemischen Bindungen der Matrix reagieren können. Die Umsetzung erfolgte mit der Integration eines Flachsgewebes und der Pulvermatrix Asset sowie konstanten Prozessbedingungen. Zur Bewertung des Einflusses der Faserbehandlung wurden die mechanischen Eigenschaften bestimmt (Tabelle 7).

Tabelle 7: Modifizierung der Naturfasern und Auszug der Ergebnisse aus dem statischen Zugversuch

Oberflächenmodifikation		Zugfestigkeit [MPa]
Modifikationstyp	Einwirkdauer [h]	
keine	-	121
NaOH	1:30	116
NaOH	2:30	153
KMnO ₄	2:30	162

Im Gegensatz zu synthetischen Fasern, die sowohl für die Verarbeitung als auch zur Verbesserung der Matrixanhaftung mit einer angepassten Schlichte versehen sind, sind bislang keine analogen Aufbereitungsmöglichkeiten für Naturfasern bekannt. Aus den untersuchten Modifizierungen konnten jedoch mögliche Vorzugsmodifikationen und Prozessbedingungen identifiziert werden, die zu einer Verbesserung der Festigkeit, bedingt durch eine erhöhte Anbindung zwischen Faser und Matrix, führen. Die Übertragung auf automatisierte Verfahren ist derzeit noch Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten.

6.7 Design und Konstruktion prototypischer Demonstratorstrukturen

Aufbauend auf den umfangreichen Untersuchungen zur Prozessentwicklung und Werkstoffcharakterisierung galt es, die gewonnenen Ergebnisse durch die Umsetzung prototypischer Technologiedemonstratoren umzusetzen. Mit den zuvor ermittelten Werkstoffkennwerten konnten nun die Gestaltung und Konstruktion unter Nutzung numerischer Berechnungsmethoden durchgeführt werden. Zur Verbesserung des Verwertungspotenzials der im Rahmen dieses Vorhabens gewonnenen Ergebnisse wurden bei der Auswahl geeigneter Demonstratoren anwendungsnahe Strukturen für den Einsatz im Low-Emission Concept Vehicle (LEV) berücksichtigt. So erfolgte etwa die Entwicklung virtueller Konzepte für die Integration von Sitzstrukturen und die davor notwendigen Anbindelemente (Abbildung 28).

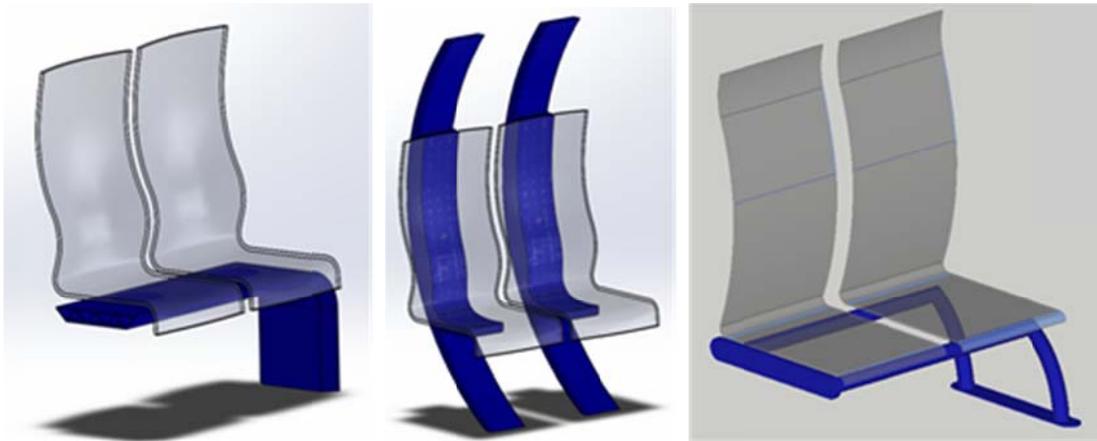


Abbildung 28: Entwicklung virtueller Konzepte zur Integration von Sitzstrukturen und deren Auslegung

Zur Abschätzung der resultierenden Bauteilverformungen und der auftretenden Spannungen bei gegebenen Lastfällen erfolgten umfassende numerische Studien, die auch das Ziel hatten unterschiedliche Anbindungskonzepte für Sitzstrukturen zu bewerten. In diese Bewertung flossen neben den Simulationsergebnissen vor allem die Aspekte des Bauteilgewichts sowie die Einhaltung der Bauraumvorgaben ein. Zur Entwicklung repräsentativer Modelle wurden Randbedingungen und Angriffspunkte von Lasten entsprechend gültiger Normen übernommen und gegebenenfalls angepasst. Anhand analytischer und numerischer Berechnungen war es möglich, Vorzugsvarianten zu bestimmen, die für weitere Untersuchungen berücksichtigt wurden (Abbildung 29).

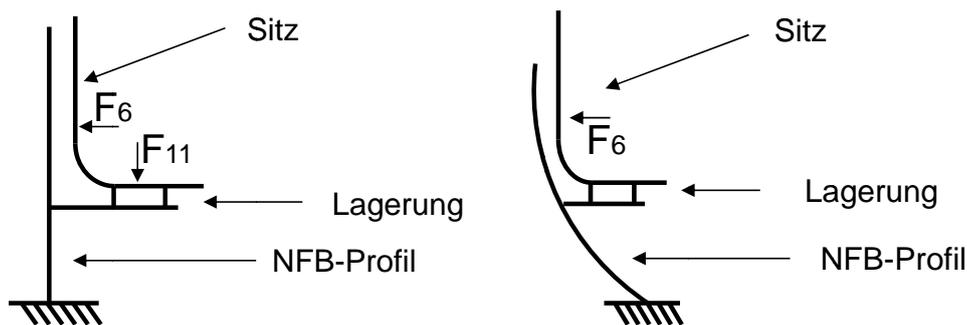


Abbildung 29: Untersuchte Anbindungskonzepte zur Integration von Sitzstrukturen: Variante 1 (links) und 2 (rechts)

In den Untersuchungen wurden die Stützstrukturen als Mehrkammer-Hohlprofile ausgeführt, wobei für die Einzelkammern sowohl Kreis- als auch Dreiecksquerschnitte mit definierten Abmessungen Berücksichtigung fanden. Ein Zusammensetzen mehrerer Einzel-

profile erlaubt dabei die Gestaltung einer Stützstruktur mit besonders hohem Flächen-trägheitsmoment zur Aufnahme von Biege- und Torsionsmomenten (Abbildung 30).

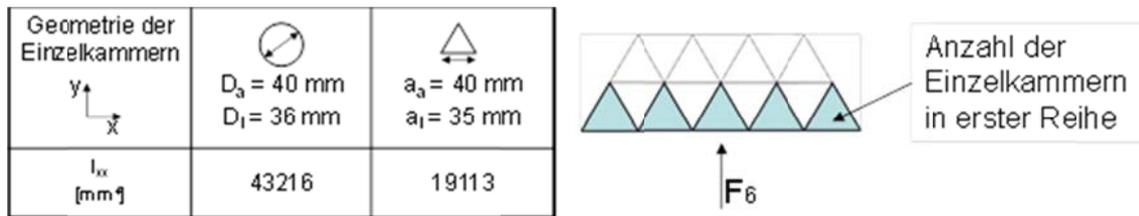


Abbildung 30: Untersuchte Profilgeometrien (links) und schematische Darstellung des Querschnitts einer zusammengesetzten Tragstruktur (rechts)

Mit Hilfe von numerischen Parameterstudien wurde somit der bestmögliche Kompromiss aus Trägermasse, maximaler Hauptspannung, die im Profil auftritt sowie der auftretenden Verschiebung ermittelt. In Abbildung 31 ist exemplarisch das Finite-Elemente-Modell der Anbindungsvariante 2 und die Ergebnisse der Parameterstudie dargestellt.

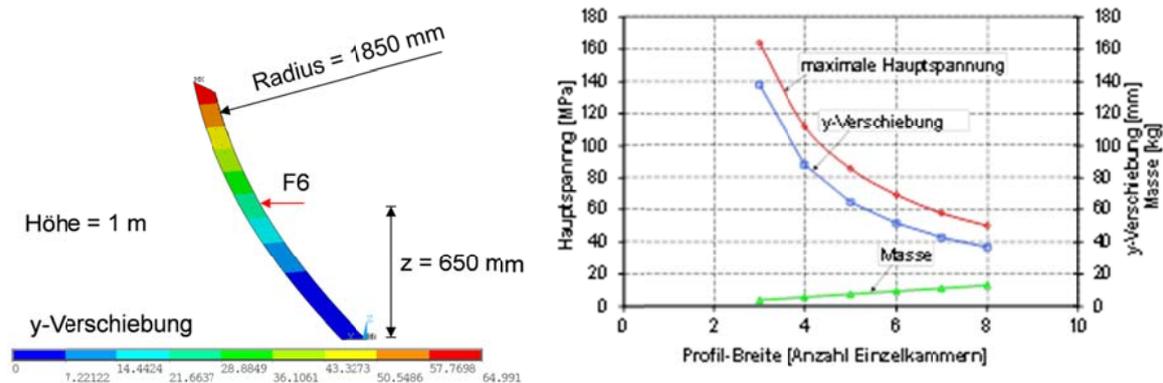


Abbildung 31: Finite-Elemente-Modell (links) mit den Verschiebungen in Y-Richtung sowie die Ergebnisse der Parameterstudie von Anbindungsvariante 2 (rechts)

Neben der Konstruktion des Anbindungsprofils erfolgte in diesem Teilbereich der Untersuchungen auch die angepasste Auslegung der Sitzstruktur. Unter Berücksichtigung der auftretenden Lasten wurden verschiedene Lagenaufbauten berechnet und eine aus mechanischer Sicht ideale Werkstoffkomposition bestimmt. Die numerischen Berechnungen zeigten bei reinen Faserverbundaufbauten vergleichsweise hohe Deformationen der Sitzlehne und auch Spannungen, die zum Teil deutlich über der Werkstofffestigkeit lagen. Daher musste ein alternativer Verbundaufbau gewählt werden, der den Anforderungen gerecht wird. In diesem Zusammenhang wurde die Auslegung des Sitzes als Sandwichstruktur angestrebt, wobei Zug- und Drucklasten durch naturfaserverstärkte Decklagen und Schubkräfte durch den Kern abgefangen werden. Aus durchgeführten Parameterstu-

dien wurde eine Kerndicke von etwa 14 mm und jeweils 2,0 mm Decklagen als bestmöglicher Kompromiss identifiziert (Abbildung 32).

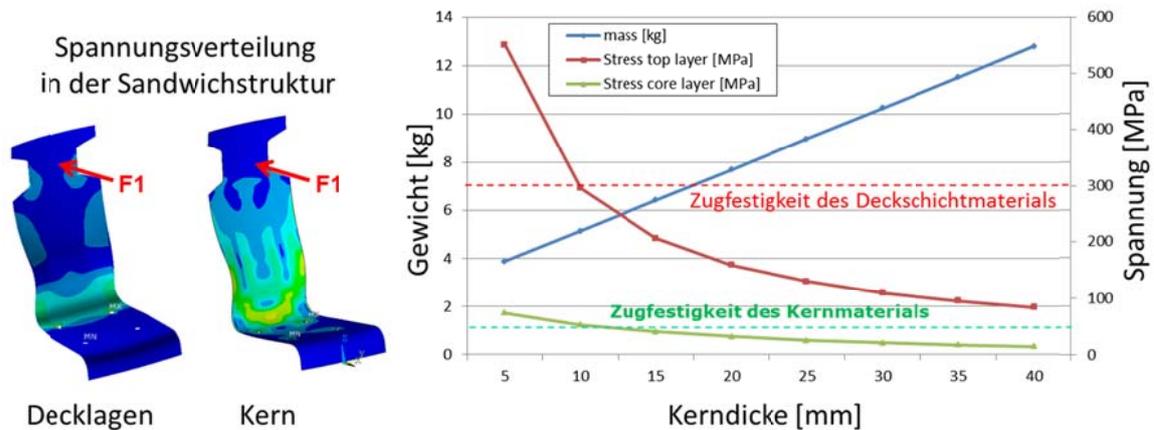


Abbildung 32: Parameterstudie zur Auslegung der Sandwichstruktur und Bestimmung der optimalen Konfiguration unter Berücksichtigung der definierten Randbedingungen

Die finale Verbundstruktur hat Decklagen mit je 2,0 mm Dicke sowie einer 14,0 mm Schaumstoffschicht. Mit der Auswahl des Schaumstoffs AIREX C70.130 konnte ein Werkstoff identifiziert werden, der neben den hohen mechanischen Anforderungen vor allem den Aspekt der Flammbeständigkeit erfüllt. Insbesondere im Hinblick auf den vorgesehenen Einsatz der Demonstratorstrukturen im Bereich elektrisch betriebener LEV können somit alle Randbedingungen eingehalten werden. In Verbindung mit den in MAT-LEV bestimmten mechanischen Kennwerten konnte für die laut DIN-Norm geforderte Prüfkraft von 1.500 N eine Materialausnutzung des Laminates von 0.85 bestimmt werden, sodass etwa 15 % für den Missbrauchsfall vorgesehen sind (Abbildung 33).

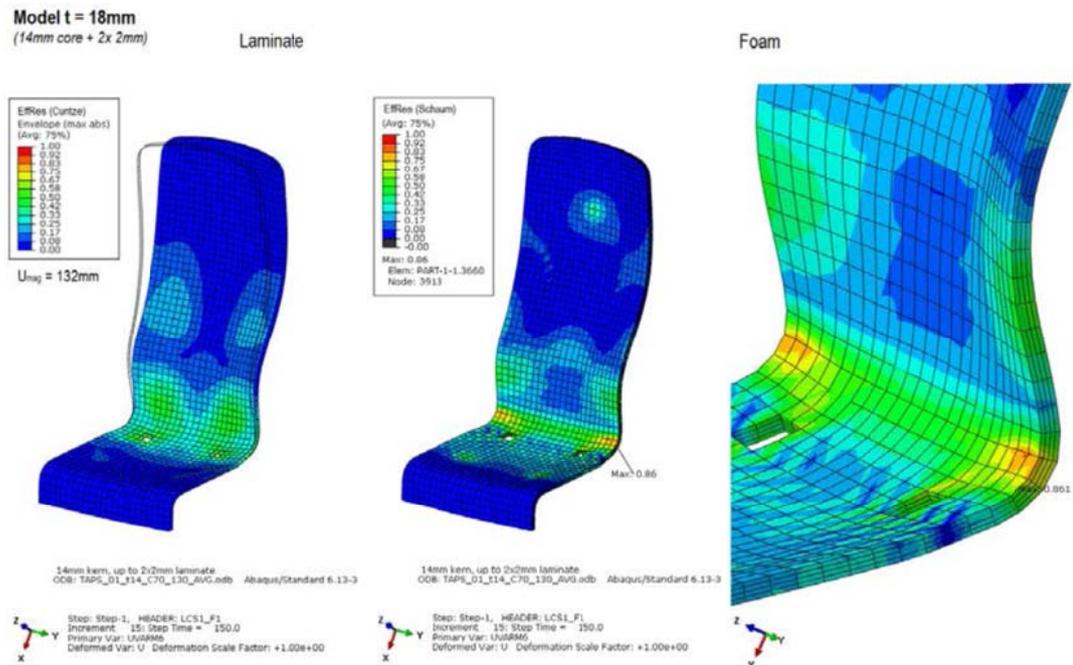


Abbildung 33: Numerische Simulation der Sandwich-Sitzstruktur mit einer Prüfkraft von 1.500 N gerichtet auf den oberen Bereich der Rückenlehne: Berechnete Materialausnutzung des Laminats (links) und des Schaumstoffkerns (mittig, rechts)

Als Materialkennwerte für die Decklagen wurden die für Flachfasergelege mit unidirektionaler Orientierung ausgewählt, während für die Schaumstruktur Informationen des Herstellers berücksichtigt werden. Aus der Simulation und analytischen Berechnung erfolgte die Bestimmung des optimalen Werkstoffaufbaus.

6.8 Prozesstechnologische Umsetzung von Technologiedemonstratoren

Die Herstellung von naturfaserbasierten Leichtbaustrukturen im Polyurethan-Sprühverfahren und die Bewertung der sich einstellenden Verbundstruktur sowie die mechanischen Eigenschaften wurden umfangreich anhand von generischen Probestrukturen untersucht. Auf der Übertragung in prototypische Demonstratorstrukturen und der Lösung der damit einhergehenden Herausforderungen lag ein weiterer Schwerpunkt der Forschungsarbeiten von MATLEV. Daher wurden sowohl mit dem Polyurethan-Sprühverfahren als auch mit dem Resin-Powder-Moulding-Prozess, das die Verarbeitung des pulverförmigen Harzsystems vorsieht, zahlreiche Technologiedemonstratoren hergestellt. Diese sollen auch zukünftig das hohe Potenzial des untersuchten Werkstoffs und die damit in Verbindung stehenden Fertigungsverfahren zur Herstellung von Leichtbaustrukturen aufzeigen.

Aufbauend auf den orientierenden numerischen Studien und der Auslegung der Sitzstruktur wurde die prozesstechnologische Umsetzung dieses Technologiedemonstrators im Resin-Powder-Moulding-Verfahren angestrebt. Das dafür benötigte Werkzeug konnte aufgrund des gewählten Fertigungsverfahrens vergleichsweise einfach ausgelegt werden und wurde durch den Projektpartner TAPS zur Verfügung gestellt. Neben der Umsetzung der Sitzstruktur als Sandwich-Verbund mit Decklagen aus Leinengelege erfolgte auch die Fertigung einer Sitzstruktur mit synthetischen Fasern (Abbildung 34).



Abbildung 34: Technologiedemonstratoren hergestellt im Resin-Powder-Moulding-Verfahren, sowohl mit Decklagen aus Leinengelege (links) als auch textilen Halbzeugen aus Glas- und Kohlenstofffasern (rechts)

Zur Verbesserung der nachgelagerten Verwertung erfolgte die Umsetzung der entwickelten Technologien und Fertigungsprozesse anhand zur Verfügung stehender Werkzeuge. Darüber hinaus konnte auf das entwickelte Handlingsystem zurückgegriffen werden, sodass auch das Einlegen endkonturnaher Preformstrukturen mit einer hohen Genauigkeit in das offene Werkzeug ermöglicht wurde. Bei der Verarbeitung mehrere Lagen erfolgte dabei die Fixierung der Textillagen untereinander mit einer dünnen Schicht des untersuchten Sprühklebstoffs. Somit konnte ein Verschieben der Lagen durch den Matrix-Sprühstrahl im Polyurethan-Sprühverfahren verhindert werden. Ein Beispiel eines umgesetzten Technologiedemonstrators stellte die Seitenverkleidung eines Automobils dar (Abbildung 35). Insbesondere in flächigen Bereichen konnte eine hervorragende Qualität der Oberfläche erreicht werden, bei der durch die Nutzung eines nicht eingefärbten Matrixsystems die Optik der Naturfasern im besonderen Maße zur Geltung kam. Selbst im Bereich der steilen Flanke konnte aufgrund der expandierenden PUR-Matrix eine hohe Verbundgüte und Oberflächenqualität erzeugt werden.



Abbildung 35: Tür-Seitenverkleidung mit Naturfaserverstärkung, hergestellt im Polyurethan-Sprühverfahren

Auch sehr feine Details, wie etwa die Querstreben wurden durch die hohe Drapierfähigkeit der textilen Strukturen abgebildet, auch wenn es insbesondere in diesem Bereich und an weiteren Bauteilkanten verstärkt zu Matrixanhäufungen kam.

Als weiterer Technologiedemonstrator für den Einsatz von Naturfaserhalbzeugen im Polyurethan-Sprühverfahren wurde ein Ladeboden umgesetzt. Dieses großflächige Bauteil muss besonders hohe Biegelasten aufnehmen, folglich eine hohe Steifigkeit haben, jedoch nur ein vergleichsweise geringes Eigengewicht aufweisen (Abbildung 36). Dazu war es notwendig, die Kernlage aus einer schubsteifen Papierwabenstruktur zu fertigen und diese in den Sprühprozess zu integrieren. Als besondere Herausforderung wurde hierbei das prozessintegrierte Drehen der Wabe innerhalb der Sprühkabine angesehen, da ein Matrixauftrag auf beiden Decklagen des Sandwiches nötig war. Die Kombination aus Pressdruck und Expansion der Polyurethanmatrix durchtränkt die textilen Halbzeuge und verbindet diese gleichzeitig mit dem Wabenkern, ohne dass dabei überschüssiges Matrixmaterial in die luftgefüllte Kernschicht expandiert.



Abbildung 36: Ladeboden mit Naturfaser-Decklagen und Papierwaben-Kern hergestellt im Polyurethan-Sprühverfahren

Aufgrund des hohen Pressdrucks zeichnet sich die Wabenstruktur deutlich durch die faserverstärkte Decklage ab, was jedoch aus Sicht des Herstellers ähnlicher Strukturen keine Qualitätseinschränkung darstellt. Aus prozesstechnologischer Sicht wurde ein Matrix-System gewählt, das sehr gute Verarbeitungseigenschaften hat, jedoch nur eingefärbt zur Verfügung stand, sodass keine typische Naturfaser-Optik erzeugt wurde. Zum einen muss kurz nach dem Auftrag der Matrixmasse bereits eine vergleichsweise hohe Matrixviskosität erreicht sein, da es sonst beim Drehen der Wabe zum Abtropfen des Harzes kommt. Weiterhin musste der Expansionsgrad so eingestellt werden, dass ein Durchdringen der Decklage und Verbinden mit dem Kern möglich ist, jedoch ein Eindringen in die Kernschicht verhindert wird.

Neben expandierenden PUR-Systemen bieten kompakt härtende Polyurethane prozesstechnologische Vorteile bei der Verarbeitung im Nasspress-Verfahren. Durch die vergleichsweise kurze Verarbeitungszeit können großflächige Strukturbauteile mit einer gleichmäßigen Verbundqualität, hohem Faservolumenanteil und beidseitig glatten Oberflächen wirtschaftlich hergestellt werden. Daher bietet dieses Verfahren auch für die Integration natürlicher Verstärkungsstrukturen ein besonders hohes Potential, da keine Anpassung des Prozesses notwendig ist und dieser direkt umgesetzt werden kann. Im Hinblick auf das geplante Anwendungsszenario in innovativen Mehrzweck-Fahrzeugen erfolgte die Auslegung und Fertigung eines prototypischen Demonstrators in Form einer Sitzschale. Um das Einsatzpotenzial von Naturfaserverbunden anhand einer großen Bandbreite möglicher Technologien darzustellen, wurde das hierfür bewilligte Demonstratorwerkzeug so konzipiert, dass es die Fertigung von Sitzstrukturen sowohl im Nasspressen bzw. Polyurethan-Sprühverfahren als auch in einem Injektionsverfahren (HD-RTM) ermöglicht (Abbildung 37). Die Bauteilgeometrie wurde in Anlehnung an seriennahe Anwendungen derart modifiziert, dass mit der Umsetzung des prototypischen Demonstra-

tors bereits ein Großteil der auftretenden Herausforderungen gelöst werden können. Daher weist das Werkzeug zum einen stark differenzierte Bereiche mit einer Vielzahl geometrischer Details und zum anderen sehr steile Abschnitte auf.

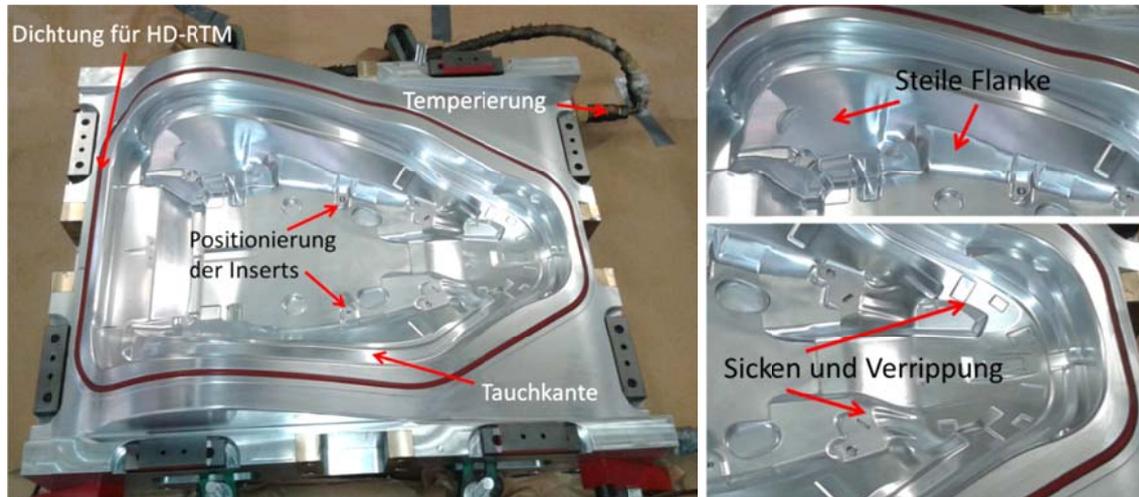


Abbildung 37: Untere Hälfte des Sitzschalen-Werkzeugs (links) sowie Detailaufnahmen der komplexen Bauteilgeometrie (rechts)

Aufgrund der komplexen Geometrie der Preform, die für die Herstellung dieses Technodemonstrators nötig war, wurde ein manuelles Einlegen und Fixieren des Lagenaufbaus am Werkzeugrand nötig. So konnte ein Verschieben von Faserlagen durch den Sprühstrahl insbesondere im Bereich der steilen Flanke verhindert und eine gute Durchtränkung ermöglicht werden. Nach dem Aushärten der Polymermatrix und dem Entformen des Bauteils zeigten sich Bereiche, die keine vollständige Benetzung aufwiesen (Abbildung 38 rechts oben). Zum einen konnte entlang der steilen Flanke eine verminderte Durchtränkung bis hin zu zum Teil komplett trockenen Fasern beobachtet werden. Vermutlich kam es entlang dieser Fläche zu einem Abscheren der Matrix durch das obere Werkzeug, sodass initial weniger Matrixmaterial zur Tränkung der Textilien vorhanden war. Auch trug der verminderte Anpressdruck an dieser Stelle zu einer verminderten Tränkungsqualität bei. Gelöst wurde dieses Problem durch Anpassung der Sprühbahn und lokales Aufbringen einer erhöhten Matrixmasse. Mit dem vorhandenen Matrixüberschuss war es nun möglich, den Bereich der Flanke mit einer zufriedenstellenden Qualität zu tränken.

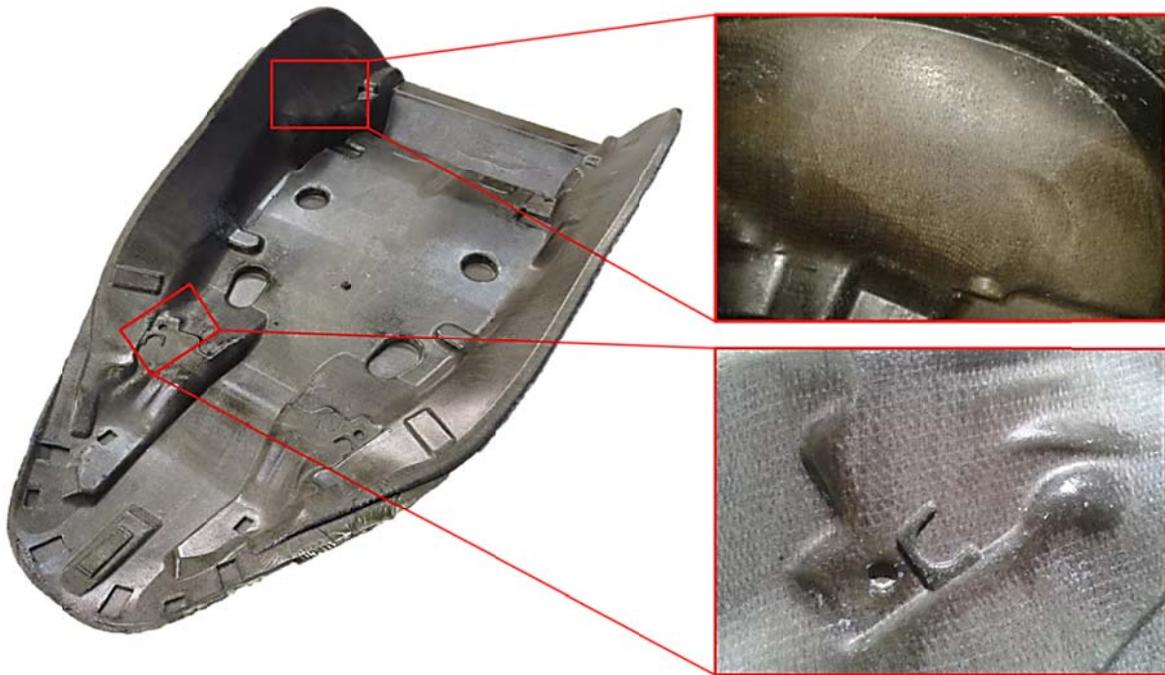


Abbildung 38: Technologiedemonstrator einer integrativen Sitzstruktur hergestellt im Nasspressverfahren

Eine weitere Qualitätseinschränkung zeigte sich in den Bereichen mit feingliedrigen Strukturen, wie etwa bei der Ausbildung von Sicken oder auch Vertiefungen. Bedingt durch den hohem Umformgrad und die zum Teil starke Variation der Bauteilgeometrie konnte die textile Struktur nicht alle Bereiche vollständig ausfüllen. In der Folge kam es zur Ausbildung von harzreichen Bereichen. Mit der Umsetzung einer bauteilgerechten Preformgeometrie, die es ermöglicht auch komplexe Umformungen im Pressverfahren abzubilden, ist die Verbesserung der auftretenden Fehler gegeben.

Als Ergebnis der durchgeführten Charakterisierungen, Prozessuntersuchungen und Umsetzung von Demonstratorstrukturen kann zusammenfassend festgestellt werden, dass mit der Integration textiler Halbzeuge auf Basis von Naturfasern die Fertigung von hochbelastbaren Faserverbunden für anspruchsvolle Leichtbauanwendungen mit hoher Bauteilqualität möglich ist. Die Verbundqualität wurde mit Hilfe mikroskopischer Aufnahmen analysiert und dabei der Einfluss verschiedener Halbzeugspezifikationen bzw. Faserarten auf die Gartränkung unter Nutzung verschiedener kompakter und expandierender Matrixsysteme untersucht. Im Vergleich zu Tränkungsuntersuchungen mit synthetischen Fasern konnte ein verbesserter Tränkungsgrad nachgewiesen werden. Mit der umfassenden Bestimmung mechanischer Eigenschaften ist die beanspruchungsgerechte Auslegung von Bauteilen gewährleistet.

7 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE

Die im Verbundprojekt MATLEV erarbeiteten anwendungsorientierten Ergebnisse besitzen ein hohes Innovationspotential mit breiter Ausstrahlung auf unterschiedliche Anwendungsfelder, auch über die Elektromobilität hinaus. Im Folgenden werden die bereits durchgeführten und zukünftig geplanten Verwertungs- und Transfermaßnahmen näher erläutert.

7.1 Erfindungen/Schutzrechte

Begleitend zur Projektbearbeitung erfolgte eine kontinuierliche Recherche zum Stand der Technik hinsichtlich vorhabensrelevanter Problemstellungen, auch unter Berücksichtigung von Patentrecherchen. Die im Rahmen des Projekts erarbeiteten neuartigen Verarbeitungsprozesse für pulverförmige Harzsysteme wurden beim europäischen Patentamt zum Patent angemeldet (Anmeldung Nr. 14163589.6 – 1306), so dass beste Aussichten für eine wirtschaftliche Verwertung gegeben sind.

7.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Der Bedarf für die Entwicklung ressourceneffizienter Leichtbaukomponenten unter Einbeziehung naturbasierter und/oder wiederverwertbarer Verstärkungsstoffe ist ungebrochen hoch. Aktuelle Ausschreibungen sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene zur Erforschung und Entwicklung innovativer Verfahren und Produkte mit reduzierter CO₂-Bilanz zeigen die gesellschaftliche Relevanz der Thematik und deren Bedeutung für die wirtschaftliche Entwicklung Europas im globalen Wettbewerb. Für den gemäß Nationaler Plattform Elektromobilität als Schlüssel- und Zukunftstechnologie identifizierten „Leichtbau in Multi Material Design“ ist neben einem verstärkten Einsatz faserverstärkter Werkstoffe vor allem die Entwicklung effizienter Fertigungsverfahren unabdingbar. Somit sind die Erfolgsaussichten für eine erfolgreiche wirtschaftliche Verwertung der im Vorhaben erarbeiteten Ergebnisse und einen zeitnahen Marktzugang der entwickelten effizienten Verarbeitungstechnologien zur Herstellung hochintegrativer naturfaserverstärkter Verbundstrukturen als außerordentlich hoch einzuschätzen. Vor allem die nach erfolgter Markteinführung erster Automobile mit komplett elektrischem Antrieb im Serienmaßstab (Beispiel BMW i3 und i8) zu erwartende Initiierung weiterer Modelle sowie die Übertragung der entwickelten faserverbundintensiven Karosseriebauweise auf Volumenmodelle auch mit konventionellen oder Hybridantrieben lassen einen hohen Bedarf nach weiteren Effizienzsteigerungen bei der Herstellung von Faserverbundkomponenten erwarten. Hierzu kann das Vorhaben mit der Fokussierung auf effiziente Fertigungsver-

fahren einen entscheidenden Beitrag leisten. Ausgehend von den Pilotanwendungen im Bereich Elektromobilität ist zudem die Erschließung weiterer Märkte, insbesondere in den Branchen Transport/Verkehr, Energie- und Umwelttechnik bis hin zu Elektronik und Medizin sehr wahrscheinlich. Konkrete wirtschaftliche Verwertungspotentiale ergeben sich nicht zuletzt durch die im Rahmen des Vorhabens entwickelten und zum Patent angemeldeten neuartigen Materialien und Verarbeitungsprozesse. Mit der Herstellung von Sitzschalen und -lehnen unter Einsatz der neu entwickelten Pulverharze und zugehörigen Technologien durch den Projektpartner TAPS seit Juni 2015 ist zudem die direkte wirtschaftliche Verwertung wesentlicher im Rahmen von MATLEV erarbeiteter Kenntnisse gegeben

7.3 Wissenschaftlich/technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die im Rahmen des Vorhabens ermittelten Kennwerte und Materialmodelle sowie die erarbeiteten Auslegungsmethoden können in zukünftigen Forschungsarbeiten am ILK gewinnbringend genutzt werden. Vor dem Hintergrund des im Vorhaben herausgearbeiteten Einsatzpotentials von Naturfaserverbunden sowie der hohen Nachfrage nach ökologisch effizienten Leichtbaulösungen ist zudem von einem hohen Bedarf an entsprechenden Auslegungsstrategien auszugehen. Auf Basis der erarbeiteten Auslegungsrichtlinien ist eine Substitution von Faserverbundstrukturen mit synthetischer Faserverstärkung durch naturfaserverstärkte Verbundkomponenten direkt im Anschluss an das Vorhaben möglich. Eine Überführung konventioneller, metallintensiver Bauweisen in ökologisch effiziente naturbasierte Konstruktionen ist mit einem Zeithorizont von 1-3 Jahren realistisch.

Die Übernahme der im Vorhaben erarbeiteten Grundlagenkenntnisse in das Lehrangebot der TU Dresden gewährleistet eine frühzeitige und weite Verbreitung der Projektergebnisse. Insbesondere die Einbeziehung der vorhabensrelevanten Technologien Flechten und LFI bzw. PUR-Sprühen in die Vorlesung Faserverbundtechnologien und zugehörige Praktika am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik ermöglicht eine direkte und praxisnahe Verbreitung der erarbeiteten Ergebnisse. Dies wird zudem durch die umgesetzte Demonstratorfertigung unterstützt, welche eine anschauliche Vermittlung der erarbeiteten Projektergebnisse ermöglicht. So ist durch die derzeit jährlich etwa 80 Absolventen der Studienrichtung Leichtbau ein zügiger Transfer der Projektergebnisse in alle relevanten Branchen gewährleistet. Darüber hinaus bietet die partnerschaftliche Zusammenarbeit des ILK mit Unternehmen der TU Dresden AG, hier insbesondere der Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH oder Leichtbau-Systemtechnologien Korropol GmbH, beste Voraussetzungen für eine Verwertung der erarbeiteten Grundlagenkenntnisse im Rahmen anwendungsnaher Folgeprojekte bis hin zur Umsetzung einer Serienfertigung oder auch Ausgründungen. Unterstützt durch die Partnerschaft im Verbundvorhaben sowie durch

zahlreiche nationale und internationale Kooperationen mit Forschungs- und Industriepartnern sind zudem weitreichende Möglichkeiten zur Einwerbung weiterer Förderprojekte oder auch bilateraler Kooperationsvorhaben gegeben. So ist die gezielte Weiterentwicklung der im Rahmen des Vorhabens untersuchten neuartigen Verarbeitungstechnologien Gegenstand aktuell eingereicherter Förderanträge.

Mit dem Projekt OSEM-EV konnte bereits ein weiteres EU-Projekt erfolgreich eingeworben werden, welches die Entwicklung von Strukturkomponenten für Elektrofahrzeuge unter Einsatz der neu entwickelten Pulverharzsysteme zum Ziel hat. Darüber hinaus ist vom Industriebeirat der Plattform FOREL eine Projektidee zur Weiterentwicklung des Resin Powder Moulding Verfahrens (RPM) als förderwürdig eingestuft worden so dass derzeit eine entsprechende Skizze ausgearbeitet wird. Parallel wird die Umsetzung über weitere Förderprogramme, etwa dem vom BMWi ausgeschriebenen Programm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ geprüft.

7.4 Wissenschaftlich/wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Ein entscheidender Beitrag zur Verwertung und nachhaltigen Nutzung der erarbeiteten Ergebnisse wird durch die umgesetzte Demonstratorfertigung unter Einsatz effizienter Fertigungstechnologien im Prozessentwicklungszentrum des ILK geleistet. Diese ermöglicht die Herstellung hochkomplexer naturfaserverstärkter Verbundbauteile in industriellem Maßstab und ist somit Grundlage für den direkten Transfer der entwickelten Konstruktionsprinzipien und Verarbeitungstechnologien für ökologisch effiziente naturbasierte Faserverbundwerkstoffe in die industrielle Praxis. Mit der Einbeziehung des anwendungsorientierten Know-hows des Projektpartners TAPS sind die Voraussetzungen für eine marktfähige Umsetzung der im Verbundvorhaben erarbeiteten Kenntnisse gegeben. Darüber hinaus lassen sich aus den im Teilvorhaben entwickelten Demonstratorbauteilen, die Pilotanwendungen für elektrisch betriebene Mehrzweckfahrzeuge darstellen, zahlreiche Transfereffekte auch in andere Anwendungen und Wirtschaftszweige, wie etwa den allgemeinen Fahrzeug- und Maschinenbau, die Luftfahrt oder auch die Umwelt und Energietechnik, ableiten. Durch die Einbindung des ILK in zahlreiche Ausschüsse und Netzwerke sowie die Teilnahme an renommierten Fachtagungen und Kongressen ist eine umfassende und effektive Transferplattform für die Verbreitung der im Rahmen des Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse gegeben. Von besonderer Bedeutung hierbei ist die Funktion des ILK als Experte für Leichtbau im Strategiekreis Elektromobilität (eNOVA), einer Allianz relevanter Industrieunternehmen und Plattform mit dem Ziel, die deutsche Automobilindustrie auf dem Weg zur internationalen Führungsposition im Bereich der Elektromobilität sowie die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) bei der Umsetzung des Nationalen Entwicklungsplans zu unterstützen. Unter Einbeziehung der im Teilvorhaben erarbeiteten Ergebnisse kann das ILK wertvolle Impulse bei der Erarbeitung von

Empfehlungen für Programme der vorwettbewerblichen Forschung und Entwicklung im Bereich Elektromobilität geben. Hiermit und durch die Unterstützung bei der Erarbeitung von Strategien und Roadmaps für zukünftige Forschungsförderprogramme auf dem Gebiet der Elektromobilität ist die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit in besonderer Weise erfüllt. Das unter Einsatz der im Teilvorhaben fokussierten Verarbeitungstechnologien erarbeitete Know-how kann interessierten Unternehmen, insbesondere KMU, zur Verfügung gestellt werden. Hier bieten die Mitgliedschaft des ILK im Automotive Cluster Ostdeutschland sowie Kooperationen mit OEM der Automobilbranche (Porsche, AUDI) eine effektive Plattform für eine Verwertung der Ergebnisse durch die im Vorhaben fokussierten Hauptanwender in Form gemeinschaftlicher Folgevorhaben. Weiterhin steht mit der vom ILK initiierten Regionalabteilung CC Ost des Carbon Composites e.V. ein leistungsstarkes Netzwerk zur Verfügung, in dem Unternehmen aller Branchen, die den Einsatz und die Verbreitung von Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen fokussieren, für den verstärkten Einsatz von Naturfaserverbunden als ökologisch effiziente Alternative zu den bisher betrachteten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen sensibilisiert werden können. Einen Beitrag hierzu leistete bereits die Vorstellung des Projektes sowie der erzielten Ergebnisse auf dem jährlich vom ILK ausgerichteten internationalen Dresdner Leichtbausymposium, bei dem interessierten Besuchern auch die Möglichkeit zur Besichtigung der entwickelten Fertigungstechnologien gegeben wurde und auch zukünftig gegeben wird.

Ergänzend zu den Netzwerkaktivitäten wurden die erarbeiteten Ergebnisse während der Projektlaufzeit durch zahlreiche Veröffentlichungen oder Vorträge in Fachzeitschriften bzw. auf Fachtagungen potentiellen Anwendern und Forschungspartnern präsentiert. Zusätzlich zu den kontinuierlichen Veröffentlichungen erfolgten fortlaufend Projektvorstellungen und Ausstellungen von Exponaten auf nationalen und internationalen Fachmessen. Diese Möglichkeit wird weiterhin genutzt, womit sich auch nach der Projektlaufzeit Chancen ergeben, mit interessierten Unternehmen beziehungsweise zukünftigen Anwendern in Kontakt zu treten. Im Berichtszeitraum wurden die Projektergebnisse und Exponate unter anderem auf den branchenspezifischen Messen "InnoTrans" in Berlin, „Composites Europe“ in Düsseldorf, „Hannover Messe“ in Hannover und "Kompozyt-Expo" in Krakau präsentiert. Besonders hervorzuheben ist die Auszeichnung der neu entwickelten pulverförmigen Harzsysteme sowie der zugehörigen Verarbeitungstechnologien mit dem AVK-Innovationspreis im Rahmen der AVK-Tagung 2014. Eine weitere Auszeichnung dieser Entwicklungen mit dem 1. Preis in der Kategorie „Best Innovative Composites Technologie“ erfolgte im Rahmen der Kompozyt-Expo und belegt deren außerordentlich hohen Innovationsgrad.

8 DARSTELLUNG DES WÄHREND DER LAUFZEIT BEKANNT GEWORDENEN FORTSCHRITTS AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN

Im Zuge kontinuierlicher Recherchen wurden aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet des Vorhabens beobachtet und evaluiert. Schwerpunktthemen hierbei waren der Einsatz von Naturfasern oder sonstigen ökologischen Verstärkungsstoffen, Fortschritte im Bereich effizienter Prozesstechnologien für die Verarbeitung von Faserverbunden im allgemeinen sowie spezifische Entwicklungen für den verbreiterten Einsatz von Leichtbaukomponenten in der Elektromobilität im Besonderen. Nachfolgend sind ausgewählte wesentliche Forschungsarbeiten, Anwendungen und sonstige Entwicklungen mit Bezug zum Vorhaben dargestellt.

Der Einsatz von Naturfasern ist fortlaufend Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten. Direkten Bezug zum Vorhaben weisen dabei aktuelle Arbeiten am Kyoto Institute of Technology auf, da auch hier die flechttechnische Verarbeitung von Naturfasern im Fokus steht [22, 23]. Schwerpunkt der Arbeiten ist die Entwicklung geflochtener Mikrogarne (micro-braided yarns, MBY) auf Basis von Hanffasern. Diese werden in Kombination mit Matrixfasern auf Basis von Polyactid (PLA) zu Hybridgarnen weiterverarbeitet, die in einem Heiß-Pressverfahren konsolidiert werden. Diese Verfahrensvariante stellt eine Ergänzung zu bekannten Arbeiten auf dem Gebiet kurzfaserverstärkter Bio-Composite auf Basis von PLA und Naturfasern dar, die häufig in Form von Press- oder Spritzgussmassen verarbeitet werden [24-26]. Mit der Fokussierung auf thermoplastische Matrixsysteme und zugehörige Verarbeitungsprozesse grenzen sich diese Arbeiten von dem im Projekt MATLEV verfolgten Ansatz ab.

In aktuellen Arbeiten der Anna University in Chennai (Indien) standen Untersuchungen an flaxfaserverstärkten Epoxidharzverbunden im Fokus [27]. Ziel der Untersuchungen war insbesondere eine Verbesserung der Festigkeit von Rohrproben durch eine Oberflächenmodifikation der Naturfasern mittels Säuren. Die entsprechenden Probekörper wurden mittels Vakuum Assisted Resin Infusion (VARI) gefertigt. Durch die Modifikationen konnten Festigkeitssteigerungen von 10 % erzielt werden. Mit den in MATLEV untersuchten Modifikationsmethoden unter Einsatz von Natronlauge und Kaliumpermanganat konnten dagegen Verbesserungen im Bereich von 20 % erzielt werden.

Intensive Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Modifizierung von Naturfasern und Charakterisierung von Faserverbunden werden durch Prof. A. Bledzki von der West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Polen, durchgeführt. Die Arbeiten umfassen verschiedene Faser- und Matrixarten, wobei auch hier schwerpunktmäßig thermoplastische Polymere im Fokus stehen [28-30].

Im Bereich der Entwicklung von Füllstoffen zur Verbesserung der Brandeigenschaften von Kunststoffen finden umfassende Arbeiten am Department of Chemistry (Prof. Henryk Galina) der Reszow University of Technology statt. Hier wurden beispielsweise Füllstoffe für Epoxidharze entwickelt, die einen Einsatz der modifizierten Harze sogar in Luftfahrtanwendungen ermöglichen ohne nennenswerten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Verbunde zu haben. Erkenntnisse dieser Forschungsarbeiten werden gemeinsam mit den Projektpartnern (insbes. der TU Warschau) bei der Entwicklung von Füllstoffen zur Verbesserung der Brandschutzeigenschaften der neuartigen ASSET-Pulverharze genutzt, die ebenfalls auf EP-Basis entwickelt werden.

Am Department of Organic Chemistry and Polymer Engineering der Budapest University of Technology and Economics werden ebenfalls Forschungsarbeiten zur Verbesserung der Brandschutzeigenschaften von Naturfaserverbunden durchgeführt [31]. Hier wird jedoch mit der Modifikation der Fasern anstelle des Harzes ein eigenständiger Ansatz verfolgt. Die erzielten Verbesserungen sind mit den im Vorhaben MATLEV erarbeiteten Ergebnissen vergleichbar, jedoch stellt die Modifikation von Fasern eine wesentlich kostenintensivere Methodik im Vergleich zur Ausrüstung der Matrixsysteme mit entsprechenden Füllstoffen dar.

Neben der Verarbeitung von Naturfasern zur Herstellung ökologischer Verbundstrukturen steht auch der Einsatz weiterer alternativer Verstärkungsstoffe im Vordergrund zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Insbesondere die Verwertung von Reststoffen (beispielsweise Zuschnittresten) hat im Zuge des gestiegenen Einsatzes von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen einen hohen Stellenwert. Daher wurden und werden intensive Entwicklungsarbeiten für die Rückgewinnung, Aufbereitung und Weiterverarbeitung derartiger Reststoffe durchgeführt. Eine bevorzugte Verwertung von Zuschnittresten ist die Herstellung von Vliesen aus Carbonfasern [32-34], die als Abfallprodukt der Preformherstellung beispielsweise in der Produktion der BMW Elektrofahrzeuge i3 und i8 zur Verfügung stehen. Hierzu fanden umfassende Entwicklungsarbeiten etwa bei der SGL Group oder dem Sächsischen Textilforschungsinstitut (STFI) statt, um etablierte Vliesherstellungsprozesse für die Verarbeitung der rezyklierten Carbonfasern zu adaptieren. Derartige Vliese werden entweder als Zwischenlage, etwa im Dach des BMW i3, oder als Verstärkungskomponente in Verbundstrukturen mit mittlerer Beanspruchung eingesetzt. Ein Anwendungsbeispiel stellt die in Abbildung 39 dargestellte Sitzschale des BMW i3 dar, die von der Firma Fehrer Automotive im PUR-Sprühverfahren hergestellt wird.

8 Darstellung des während der Laufzeit bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen



Abbildung 39: Sitzschale des BMW i3 aus rezykliertem Carbonfaservlies, hergestellt im PUR-Sprühverfahren [35]

Die PUR-Sprühtechnologie, die als besonders effizientes Verfahren auch im Projekt MAT-LEV fokussiert wurde, wird seit einigen Jahren verstärkt bei der Herstellung großflächiger Leichtbaukomponenten eingesetzt, wenngleich hier bisher nahezu ausschließlich konventionelle Verstärkungsfasern zum Einsatz kommen. Ein Beispiel stellt das in Abbildung 40 gezeigte Dach des SMART dar, welches in Sandwichbauweise und mit einer hinter-schäumten Dekorfolie einen ähnlich Ansatz aufgreift, wie die in MATLEV hergestellten Technologiedemonstratoren in Sandwichkonstruktion.



Abbildung 40: Dachmodul in Sandwichbauweise, hergestellt im PUR-Sprühverfahren [36]

Der Einsatz von Polyurethanen ist inzwischen nicht mehr auf die bekannten Sprühverfahren oder Reaction Injection Moulding Technologien (RIM) beschränkt. Mit der Adaption der diesen Verfahren zu Grunde liegenden Hochdruckvermischung zweier Reaktionspartner für das RTM-Verfahren sind Polyurethane auch als potentielle Alternative für Epo-

xidharze bei der Herstellung hoch beanspruchter Verbundkomponenten in den Fokus gerückt. In ersten Anwendungen, wie der in Abbildung 41 dargestellte Blattfeder, werden dabei insbesondere die hohen Schlagzähigkeiten der PUR-Systeme gewinnbringend genutzt.



Abbildung 41: GFK-Blattfeder mit Polyurethanmatrix, hergestellt im Hochdruck-RTM-Verfahren [37]

Die weitere Erforschung neuartiger Materialien sowie die Entwicklung effizienter Verfahren ist für den Durchbruch der Elektromobilität und damit für die Realisierung der durch die NPE adressierten Ziele unabdingbar. Dies wird auch durch die Initiierung der national offenen Plattform Forschungs- und Technologiezentrum für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität – FOREL durch das BMBF im Jahr 2013 deutlich. Diese national offene Plattform hat den Zusammenschluss namhafter deutscher Entwicklungs- und Forschungszentren mit der Industrie und einen vorwettbewerblichen, projektbezogenen Austausch aller beteiligten Partner sowie systemische Koordination von Forschungsprojekten zur Entwicklung von Hightech-Leichtbausystemlösungen in Multi-Material-Design für E-Fahrzeuge der Zukunft zum Ziel.

Schwerpunkthemen der bisher unter dem Dach von FOREL initiierten Projekte sind unter anderem die bereits im Vorhaben MATLEV adressierten Schwerpunkte Montage und Demontagestrategien, Recycling und effiziente Fertigungsprozesse. Hierbei nimmt die zielgerichtete Mischbauweise insbesondere unter Einbeziehung von Leichtmetallen und Faserverbundwerkstoffen einen hohen Stellenwert ein [38]. So sind etwa im Projekt „Ressourceneffiziente Mischbauweisen für Leichtbau-Karosserien – LeiKa“ unter anderem die

- Analyse vorhandener Karosseriestrukturen und Entwicklung angepasster Konzepte in Metall/FKV- Mischbauweise,

- Entwicklung und Realisierung effizienter Fügeverfahren für Metall/FKV-Mischbauweisen,
- Entwicklung und Realisierung effizienter Fertigungsverfahren unter besonderer Berücksichtigung bereits installierter Anlagentechnik,
- Methoden zum beschleunigten Bauteil- und Prozessentwurf sowie deren Bewertung anhand durchgängiger Prozesskettenmodelle,
- Entwurf, Ausgestaltung und Herstellung einer funktionsintegrierenden, profilintensiven Bodenstruktur für die Aufnahme von Energiespeichersystemen sowie
- Ökonomische und ökologische Bilanzierung der entwickelten Lösungen

wesentliche Handlungsfelder [39].

Im Projekt „Fertigungs- und Recyclingstrategien für die Elektromobilität zur stofflichen Verwertung von Leichtbaustrukturen in Faserkunststoffverbund-Hybridbauweise - ReLei“ ist die Entwicklung ressourcenschonender Fertigungsprozesse und einer ganzheitlichen Recyclingstrategie für Fahrzeugstrukturen in Faserkunststoffverbund -Mischbauweise für Elektrofahrzeuge übergeordnete Zielstellung. Dabei stehen die

- Erarbeitung demontagegerechter Fügeverfahren für die Fertigung neuartiger Karosserien von Elektromobilen,
- Erweiterung und Anpassung bestehender Aufbereitungstechnologien zur Herstellung von spritzgießfähigem Rezyklat für die Fertigung von Strukturbauteilen mit geringstmöglicher Werkstoffdegradation,
- Entwicklung eines flexiblen Fertigungsverfahrens zur Herstellung komplex geformter Hybrid-Sandwich-Strukturen unter dem Einsatz von wiederaufbereiteten Faserkunststoffverbunden,
- Übergreifende Analyse einer demontage- und recyclinggerechten Fertigungssystematik sowie
- Ökonomische und ökologische Technologiebewertung der entwickelten Prozesskette

im Vordergrund der Arbeiten [40].

Darüber hinaus werden einige der bereits in MATLEV adressierten Problemstellungen bei der flechttechnischen Herstellung komplexer Preformen für Hohlprofile im Projekt „Bauweisen- und Prozessentwicklung für funktionalisierte Mehrkomponentenstrukturen mit komplex geformten Hohlprofilen – FuPro“ aufgegriffen und entsprechende Lösungsansätze erarbeitet.

Effizienter Leichtbau ist jedoch nicht nur im Bereich Elektromobilität Schlüsseltechnologie sondern vielmehr für den Bereich Mobilität insgesamt ein wichtiger Zukunftsfaktor. Dem-

entsprechend sind zahlreiche Leichtbaucuster auf ähnlichen Forschungsfeldern wie den bereits in MATLEV oder der Plattform FOREL adressierten Themen aktiv. Hervorzuheben ist etwa die in Stuttgart initiierte ARENA2036 - "Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles", ein durch das BMBF geförderter Forschungscampus als Kooperationsform, bei dem unterschiedliche Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft unter einem Dach innovative Zukunfts-Themen zur Produktion und Leichtbau erforschen. Die Open Hybrid Lab Factory (OHLF) in Wolfsburg ist ein weiteres Beispiel für durch das BMBF geförderte öffentlich-private Partnerschaften, und wurde als Kompetenz- und Forschungszentrum für wirtschaftlichen Leichtbau und innovative Werkstoff- und Fertigungstechnologien initiiert. Das BMBF Spitzencluster Mai Carbon hat sich die flächendeckende Einführung und Etablierung von Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen – insbesondere CFK – in den Branchen Automobilbau, Luft- und Raumfahrt sowie dem Maschinen- und Anlagenbau zum Ziel gesetzt, um so den Wirtschaftsstandort Deutschland für die Zukunft zu stärken und einen wertvollen Beitrag zur Ressourceneffizienz zu leisten. Am Standort Aachen thematisiert das Aachener Zentrum für integrativen Leichtbau (AZL) Leichtbau-Produktionsforschung auf Basis von Multimaterialsystemen mit dem Ziel, durch die enge interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Werkstoffwissenschaften und der Produktionstechnik und der Umsetzung großserientauglicher Prozessketten die Überführung des Leichtbaus in die Großserie zu realisieren. Die Notwendigkeit hierfür wird auch mit dem durch das BMWi initiierte Förderprogramm „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ verdeutlicht. In der Programmsäule „Innovative Fahrzeuge“ wird das Forschungsziel „Effizienter Leichtbau“ adressiert, insbesondere auf Basis neuer Materialien und kombinierter Werkstoffe. Mit der Herausstellung der Themenschwerpunkte effiziente Kreisläufe für „strategische“ Materialien, intelligente Fügetechniken und -verbindungen im Materialmix, Adaptierbarkeit sowie Wartungs- und Reparaturkonzepte werden ebenfalls Kernthemen des Vorhabens MATLEV angesprochen.

9 GEPLANTE UND ERFOLGTE VERÖFFENTLICHUNGEN, STUDENTISCHE ARBEITEN, MESSEBEITRÄGE

Zeitschriftenveröffentlichungen

- Hufenbach, W., Gude, M., Geller, S., Czulak, A.: Manufacture of natural fiber-reinforced polyurethane composites using the long fiber injection process. Polimery 58 (2013) 6, S. 473-475
- Gude, M.; Geller, S.; Weißenborn, O.: Studies on the impregnation of textile semi-finished products using a polyurethane spray coat method. Journal of Plastics Technology, 11 (2015), 1, S. 212-229
- Geller, S.; Weißenborn, O.; Gude, M.; Czulak, A.: Impregnation studies and mechanical characterization of cellular natural fibre-reinforced composite structures. Angenommenes Manuskript, voraussichtliche Veröffentlichung in Polimery 61 (2016) 3
- Przybyszewski, B.; Del Borello, M.; Czulak, A.; Gude, M.: Characterization of novel natural hemp-reinforced composites for automotive applications manufactured by braiding technology and resin powder moulding process (im Review)
- Przybyszewski, B.; Czulak, A.; Gude, M.; Czech-Polak, J.; Heneczkowski, M.: Effect of environmentally-friendly flame retardants on resistance to flame and mechanical properties of rigid polyurethane foams, Angenommenes Manuskript, voraussichtliche Veröffentlichung in Polimery 61 (2016) 2

Tagungsbeiträge, Poster

- Geller, S.; Renner, O.; Gude, M.: Vereinfachte Herstellung duroplastischer Faserverbundstrukturen durch den Einsatz neuartiger, pulverförmiger Matrixsysteme. Fachtagung Composite Umformung, München, Deutschland, 12. Mai 2015
- Kaufhold, J.; Geller, S.; Läßig, C.; Gude, M.: Potentials of biological waste products for the reinforcement of polymer materials. European Symposium and Exhibition on Biomaterials and Related Areas (BioMat), Weimar, Deutschland, 21.-22. April 2015
- Gude, M.; Geller, S.; Renner, O.; Pilawka, R.; Czulak, A.: Neuartige, pulverförmige Harzsysteme für eine effiziente Herstellung duroplastischer Faserverbundstrukturen. Matrixsysteme für die Composite-Serienfertigung im technologischen Wettbewerb, Aachen, Deutschland, 15.-16. April 2014
- Weißenborn, O.; Gude, M.; Geller, S.: Integral manufacture of novel sandwich structures using a polyurethane spray coat method. Materials Science and Engineering: MSE 2014, Darmstadt, Deutschland, 23.-25. September 2014
- Gude, M.; Geller, S.; Weißenborn, O.: A novel technology for the manufacture of integral sandwich structures using a polyurethane spray coat method. Junior Euromat 2014, Lausanne, Schweiz, 21.-25. Juli 2014

- Lorek, J.; Renner, O.; Czulak, A.; Geller, S.: RPM und TSF – neue Verfahren zur vereinfachten Herstellung duroplastischer Faserverbundstrukturen. 18. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, Dresden, Deutschland, 26.-27. Juni 2014
- Hufenbach, W.; Lewandowska, M.; Czulak, A.; Ciecierska, E.; Jurczyk-Kowalska, M.; Kowalski, M.; Geller, S.; Przybyszewski, B.: Influence of fire retardant additives on mechanical properties of LFI manufactured polyurethane composite component. E-MRS 2013 Fall Meeting, Warschau, Polen, 16.-20. September 2013
- Przybyszewski, B.; Czulak, A.; Gude, M.; Lewandowska, M.; Broda, P.: Effect of pressing parameters and chemical modifications of flax fabrics on microstructure and mechanical properties of natural fiber-reinforced composites. 18th International Conference on Composite Structures, Lissabon, Portugal, 15.-18. Juni 2015
- Lewandowska, M.; Hufenbach, W.; Kowalski, M.; Krauze, S.; Czulak, A.; Kowalska, M.; Bazarnik, P.; Ciecierska, E.; Przybyszewski, B.; Geller, S.; Gottwald, R.: New materials and technologies for lightweight generic components of electric low-emission concept vehicle. 17. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, Dresden, Deutschland, 13.-14. Juni 2013
- Ciecierska, E.; Jurczyk-Kowalska, M.; Lewandowska, M.; Kowalski, M.; Szustowski, P.; Czulak, A.; Hufenbach, W.: Properties of polyurethane foams reinforced with different type of textile. E-MRS 2013 Fall Meeting, Warschau, Polen, 16.-20. September 2013
- Ciecierska, E., Jurczyk-Kowalska, M., Lewandowska, M., Kowalski, M., Krauze, S., Czulak, A., Geller, S., Hufenbach, W.: Flammability and thermal properties of polyurethane foams. Rotaru, A., Matulis, D. (eds.): Book of Abstracts : 2nd Central and Eastern European Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (Vilnius, Lithuania, 27-30 August 2013), p. PS1.45. - ISBN 978-3-940237-33-0
- Lewandowska, M.; Hufenbach, W.; Kowalski, M.; Krauze, S.; Czulak, A.; Kowalska, M.; Bazarnik, P.; Ciecierska, E.; Przybyszewski, B.; Weißenborn, O.; Geller, S.; Gottwald, R.: Investigations on the integration of natural fibres - evaluation of composite quality. 18. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, Dresden, Deutschland, 26.-27. Juni 2014

Studentische Arbeiten

- Untersuchung zum Prozess- und Materialverhalten von faserverstärkten A-S-SET Komponenten im Kontext induktiver drahtloser Ladesysteme, Diplomarbeit, TU Dresden, ILK, 2015
- Untersuchung des Leichtbaupotentials von Fahrzeuginnenraumisolierungen im Hinblick auf ein verbessertes Wärmemanagement von elektrischen Fahrzeugen, Diplomarbeit, TU Dresden, ILK, 2015

- Untersuchungen zur gezielt gerichteten Faserablage im LFI-Verfahren, Felix Sommerfeld, Diplomarbeit, TU Dresden, ILK, 2014
- Untersuchungen zur integralen Herstellung neuartiger Sandwichstrukturen im Polyurethan-Sprühverfahren, Oliver Weißenborn, Diplomarbeit, TU Dresden, ILK, 2013
- Biocomposites manufactured via Long Fiber Injection – strength analysis of selected automotive parts by the help of Ansys 14.0, T. Latacz, Diplomarbeit, TU Gleiwitz, 2013
- Automatization of manufacturing process of natural fiber based composites using LFI and braiding method, D. Reszka, Diplomarbeit, TU Gleiwitz, 2013
- The influence of graphite and carbon nanotubes on selected properties of rigid polyurethane foams, M. Kulesza, Diplomarbeit, TU Warschau, 2014
- Design, analysis and development of technology for series producing of composite elements, M. Wozniak, Diplomarbeit, TU Gleiwitz, 2014
- Manufacturing and characterization of novel natural fibre reinforced composites, M. Del Borello, Diplomarbeit, TU Bologna, 2015
- Untersuchungen zum Hinterschäumen thermoplastischer Folien im Langfaserinjektionsverfahren und Charakterisierung der Haftungseigenschaften, T. Schulze, Interdisziplinäre Projektarbeit, TU Dresden, ILK, 2014
- Prozesskettenanalyse und Kostenvergleich der Verfahren SRIM und LFI, P. Prehl, Bachelorarbeit, TU Dresden, ILK, 2013

Messeteilnahmen mit Vorstellung des Projektes, Ergebnissen oder Exponaten

- 17. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, 13.-14. Juni 2013, Dresden
- 4th Trade Fair for HighTech Composites, Technologies and Machinery for the Production of Composites, 21-22 November 2013, Krakau
- Hannover Messe, 7.-11. April 2014, Hannover
- 18. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, 26.-27. Juni 2014, Dresden
- InnoTrans, 23.-26. September 2014, Berlin
- Composites Europe, 7.-9. Oktober 2014, Stuttgart
- 5th Trade Fair for HighTech Composites, Technologies and Machinery for the Production of Composites, 20-21 November 2014, Krakau
- 19. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, 18.-19. Juni 2015
- Composites Europe, 22.-24. September 2015, Stuttgart
- 6th International Trade Fair for Composite Materials, Technologies and Products, 25-26 November 2015, Krakau

10 LITERATUR

- [1] Frehsdorf, W.; Söchtig, W.: Hohe Ansprüche, niedrige Investitionskosten. LFI-PUR-Verfahren: ausgereifte Technik mit hoher Flexibilität. Kunststoffe, Band 91 (2001), Heft 3, Seite 67-70
- [2] Frieges, A.; Söchtig, W.; Bauer, A.: Long-Fiber-Injection-Polyurethan - Die neue kostengünstige Methode, glasfaserverstärkte PUR-Leichtbauteile zu fertigen. Internationale AVK-Tagung, Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe, 1996, Seite 1-7, Paper-Nr. B11
- [3] Starke, J.: LFI-PUR-Prozess; Praxiserfahrungen bei der Umsetzung in die Serie. Polyurethan Formteile Neue Trümpfe im Wettbewerb. Frankfurt am Main: Fachverband Schaumkunststoffe e.V. (FSK), 1999, S. 207-227
- [4] Starke, J.; Renkl, J.; Söchtig, W.: Langfaserverstärkung mit Polyurethan im One-Shot-Prozess für leichte, beanspruchte dreidimensionale Formteile. Internationale AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen, 2 (1999) Seite A9.1-A9.9
- [5] Lorch, D.: Kostengünstig verstärken. Mittels LFI-Verfahren mehrdimensionale, glasfaserverstärkte PUR-Bauteile herstellen. Kunststoffe, Band 86 (1996), Heft 12, S. 1860-1863
- [6] Bauer, A.: Neue Möglichkeit zur Herstellung von Leichtbau-Formteilen. PUR-Technik 1996. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996, S. 63-79
- [7] Rosenberger, J.: Class-A Folie PUR hinterschäumt für Nutzfahrzeug-Außenteile. PUR 2009. Düsseldorf: VDI Verlag, 2009, S. 21-32
- [8] Hack, T.; Schmidt, R.; Nonnbroich, K.; Burmeister, J.: Anforderungen an ein Sportwageninterieur am Beispiel des Audi R8. Kunststoffe im Automobilbau. Düsseldorf: VDI Verlag, 2008, S. 67-76
- [9] Häberle, H.; Mohr, R.: Kühlerblende in Hochglanz-Optik. Kunststoffe im Automobilbau. Düsseldorf: VDI Verlag, 2008, S. 221-247
- [10] Pörtl, J.; Schäfer, H.: Faserverstärkte Polyurethan (PUR)-Anwendungen für den Karosserieaußenbereich am Beispiel eines Dachmoduls und für Automobilinnenverkleidungen auf Basis nachwachsender Rohstoffe. DVM-Tag 2000. Berlin: Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung (DVM), 2000, Seite 187-204
- [11] Frehsdorf, W.; Schmidhuber, S.: Natürlich besser. Kunststoffe, Band 94 (2004), S. 268-271
- [12] Kleba, I.; Zabold, J.: Eine Fahrt ins Blaue - Naturfaserverstärkte Polyurethane im Automobilbau. Kunststoffe 92 (2002) 3, S. 112 – 120
- [13] Kuppinger, J.; Wafzig, F.; Henning, F.; Weidenmann, K.; Kordick, M.; Elsner, P.: Einfluss von Glasfaserlänge und Glasfasergehalt auf die mechanischen Eigenschaften von langglasfaserverstärktem Polyurethan. Zeitschrift Kunststofftechnik 6 (2010) 5, S. 205-227

- [14] Kuppinger, J.; Wafzig, F.; Henning, F.; Weidenmann, K.; Haspel, B.; Elsner, P.: Untersuchung des Einflusses verschiedener Prozessbedingungen, Fasergewichtsanteile und Faserlängen auf die Faserorientierung im Polyurethan Fasersprühprozess. Zeitschrift Kunststofftechnik 7 (2011) 2, S. 44-65
- [15] Hufenbach, W.; Gude, M.; Geller, S.; Zichner, M.: Fasern orientiert sprühen. Kunststoffe, Band 101 (2011), Heft 11, S. 74-77
- [16] Soden, P. D. and others: Influence of winding angle on the strength and deformation of filament-wound composite tubes subjected to uniaxial and biaxial loads. Composites Science and Technology 46, pp 363-378
- [17] Peters, S. T.: Handbook of Composites, 2. ed., Chapman & Hall, London
- [18] Hufenbach, W.; Czulak, A.; Blazejewski, W.; Gasior, P.: Braided high pressure vessels with integrated optical sensors. Polish Society for Composite Materials - Composites 9: 2 (2009) 107-111, in Polish
- [19] Blazejewski, W.; Czulak, A.; Gasior, P.; Pawlak, T.; Hufenbach, W.: Pressure tests of composite braided tube specimens. Polish Society for Composite Materials - Composites 9: 3 (2009) 291-296, in Polish
- [20] URL: <http://www.danzer.com/Danzer-3D-Furnier.3063.0.html?&L=1>
- [21] URL: <http://www.furnier.de/Innovative-Produkte.268.0.html>
- [22] Hodzic, A.; Shanks, R.: Natural fibre composites: Materials, Processes and Properties. Woodhead Publishing Limited, 2014
- [23] Kobayashi, S.; Takada, K.; Nakamura, R.: Processing and characterization of hemp fiber textile composites with micro-braiding technique, Composites: Part A 59 (2014), S. 1-8
- [24] Kupfer, R., Spitzer, S., Lässig, C., Gude, M.: Entwicklung und Analyse einer Prozesskette zur Herstellung biobasierter Hybridstrukturen. Gehde, M. (Hrsg.): TECHNOMER 2013: 23. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren. Chemnitz: Technische Univ., 2013, V 4.9, S. 1-13., ISBN 978-3-939382-11-9
- [25] Tech, S., Lässig, C., Kupfer, R., Wiemer, H., Gohrbandt, A., Siegel, C., Horbens, M., Jornitz, F., Wagenführ, A., Neinhuis, C., Fischer, S., Hufenbach, W., Großmann, K.: Material and technological development of natural fiber reinforced cellulose acetate butyrate. Advanced Engineering Materials 16 (2014), accepted manuscript, published online 01 August 2014
- [26] Kaufhold, J.; Geller, S.; Lässig, C.; Gude, M.: Potentials of biological waste products for the reinforcement of polymer materials. European Symposium and Exhibition on Biomaterials and Related Areas (BioMat), Weimar, Deutschland, 21.-22. April 2015
- [27] Vignesh Balaji R. S.: Flax Fibre Braided Reinforced Composite Tubes, LAP Lambert Academic Publishing, 2013, ISBN 978-3-659-44220-9
- [28] Błędzki, A. K.; Franciszczak, P.; Osmanb, Z.; Elbadawi, M.: Polypropylene biocomposites reinforced with softwood, abaca, jute, and kenaf fibers. Industrial Crops and Products 70 (2015), S. 91–99

- [29] Moshiul Alam, A. K. M.; Mina, M. F.; Beg, M.; D.; H.; Mamun, A. A.; Bledzki, A. K.; Shubhra, Q. T. H.: Thermo-mechanical and morphological properties of short natural fiber reinforced poly (lactic acid) biocomposite: effect of fiber treatment. *Fibers and Polymers* 15 (2014), 6, S. 1303–1309
- [30] Feldmann, M.; Bledzki, A. K.: Bio-based polyamides reinforced with cellulosic fibres – Processing and properties. *Composites Science and Technology* 100 (2014), S. 113–120
- [31] Szolnoki, B.; Bocz, K.; Sóti, P. L.; Bodzay, B.; Zimonyi, E.; Toldy, A.; Morlin, B.; Bujnowicz, K.; Wladyka-Przybylak, M.; Marosi, G.: Development of natural fibre reinforced flame retarded epoxy resin composites. *Polymer Degradation and Stability*, V. 119, S. 68-76
- [32] Hofmann, M.; Gulich, B.: Faservliesstoffe für die Verbundherstellung – das Recyclingkonzept für Carbonabfälle in Langfaserform. 27. Hofer Vliesstofftage, Hof, Deutschland, 07. November 2012
- [33] Tiedt, T.; Zobel, S.; Glowania, M.; Gries, T.; Matheis, R.; Ickert, L.; Eckstein, L.: CAMISMA – Carbonvliesstoffe im Einsatz als Multimaterialsystem. 27. Hofer Vliesstofftage, Hof, Deutschland, 07. November 2012
- [34] Knopf, M.: Leichtbau durch Isotropes Carbonfaservlies. Hofer Vliesstofftage, Hof, Deutschland, 5. November 2014
- [35] URL: <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/sitzschale-aus-carbonsfaser-recycling-material-a-442403/>
- [36] URL: <http://www.k-zeitung.de/leichtbau-leicht-gemacht/150/1195/85300>
- [37] URL: <http://surface-rtm.com/rtm-de/henkel-ag-co-kгаа.html>
- [38] Deinzer, G.: Multi-Material-Leichtbau für Elektromobile – Herausforderung für die Fertigung. 19. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, Dresden, Deutschland, 18.-19. Juni 2015
- [39] Paul, C.; Klotzbach, C.; Modler, N.; Jaschinski, J.; Schulte, T.: Ressourceneffiziente Mischbauweisen für Leichtbau-Karosserien. 19. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, Dresden, Deutschland, 18.-19. Juni 2015
- [40] Daberger, C.; Gorbach, G.; Gude, M.; Luft, J.: Fertigungs- und Recyclingstrategien für die Elektromobilität zur stofflichen Verwertung von Leichtbaustrukturen in Faserkunststoffverbund-Hybridbauweise. 19. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, Dresden, Deutschland, 18.-19. Juni 2015

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Verbundprojekt: Neuartige Materialien und Fertigungstechnologien zur Herstellung generische Leichtbaukomponenten für ein elektrisch betriebenes und emissionsarmes Konzeptfahrzeug – „MATLEV“ Teilvorhaben: Entwicklung von naturfaserbasierten Verbundwerkstoffen und effizienten Fertigungsprozessen zur Herstellung generischer Leichtbaukomponenten für ein elektrisch betriebenes Low-Emission Concept Vehicle (LEV)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Gude, Maik; Prof. Dr.-Ing. habil. Czulak, Andrzej; Dr.-Ing. Geller, Sirko; Dipl.-Ing. Weißenborn, Oliver; Dipl.-Ing. Przybyszewski, Bartłomiej; Dipl.-Ing. Gottwald, Robert; Dipl.-Ing.	5. Abschlussdatum des Vorhabens August 2015
	6. Veröffentlichungsdatum Oktober 2015
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der Technischen Universität Dresden: Holbeinstraße 3 in 01307 Dresden	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 1/A285/15
	10. Förderkennzeichen 01MX12021
	11. Seitenzahl 65
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. Literaturangaben 40
	14. Tabellen 7
	15. Abbildungen 41
16. Zusätzliche Angaben Publikation ist ein Abschlussbericht zum oben genannten Projekt	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) -	

18. Kurzfassung

Gesamtziel des Vorhabens war die Erforschung und Verarbeitung naturfaserbasierter Verbundwerkstoffe sowie die Entwicklung zugehöriger innovativer und effizienter Fertigungsprozesse zur Herstellung generischer Leichtbaustrukturen für ein elektrisch betriebenes Low-Emission Concept Vehicle (LEV). Ein Teilziel bestand darin, die Einsatzpotentiale dieser neuartigen Werkstoffe anhand ausgewählter Demonstratorkomponenten wie Sandwichelementen für Bodensegmente, Türverkleidungen sowie Sitzstrukturen aufzuzeigen. Diese zielen vor allem auf einen Einsatz in elektrisch betriebenen Mehrzweck-Fahrzeugen, sogenannten Multi Purpose Vehicles (MPV) ab, bieten darüber hinaus jedoch Einsatzmöglichkeiten in weiteren Anwendungen, insbesondere im Bereich der Mobilität. Mit der wachsenden Nachfrage nach solchen MPV, etwa für den Einsatz in der Land- und Forstwirtschaft, auf Flughäfen, großen Ladenflächen, in Krankenhäusern oder fahrerlosen Taxis wird ein enormes Einsatzpotential für modular konfigurierbare, elektrisch betriebene LEV generiert. Aufgrund der Fokussierung auf diese außerhalb des Straßenverkehrs einsetzbaren Mehrzweck-Fahrzeuge und den in diesem Zusammenhang geringeren Restriktionen ist ein größerer Gestaltungsspielraum für Werkstoff- und Prozessinnovationen gegeben.

Im Rahmen des Vorhabens wurden zunächst umfassende Recherchen zu verfügbaren naturbasierten Verstärkungsstoffen durchgeführt und diese nach Verstärkungsart (Kurz-, Lang-, Endlosfaser) und funktionalen Faktoren klassifiziert. Unter Einsatz ausgewählter Verstärkungsstoffe und Matrixsysteme erfolgten Prozessuntersuchungen zu deren Verarbeitungseigenschaften sowie anschließende Charakterisierungen zur Evaluation des mechanischen Eigenschaftsprofils. Weiterhin wurden Untersuchungen zur Verbesserung spezifischer Eigenschaften durchgeführt. Hierbei stand etwa die Modifikation von Naturfasern zur Realisierung höherer Festigkeiten oder die Integration von Füllstoffen in Polyurethan-Matrixsysteme zur Verbesserung der Brandschutzeigenschaften im Fokus. Als Ergebnis der umfassenden Untersuchungen wurden Vorzugshalbzeuge und Matrixwerkstoffe identifiziert, auf deren Basis die Auslegung und Fertigung von Demonstratorkomponenten erfolgte.

Parallel wurden Arbeiten zur Adaption des Polyurethan-Sprühverfahrens für die Verarbeitung von Naturfasern durchgeführt. Im Vordergrund standen hierbei die Entwicklung eines angepassten Schneidwerks und die automatisierte Verarbeitung von textilen Halbzeugen. Ein weiterer Schwerpunkt der Prozessentwicklungen bestand in der Untersuchung neuartiger pulverförmiger Matrixsysteme mit thermoplastischen Verarbeitungseigenschaften auf Basis von Epoxidharzen und der Erarbeitung angepasster Verarbeitungstechnologien. Hierbei wurden mit dem Resin Powder Moulding (RPM) und Thermoset Sheet Forming (TSF) zwei bevorzugte neuartige Prozessvarianten etabliert.

Mittels der gemeinsam mit dem Projektpartnern definierten und entwickelten Demonstratorkomponenten wurden die erarbeiteten Ergebnisse und Entwicklungen in anwendungsnahe Strukturen überführt, die das Einsatzpotential naturfaserverstärkter Leichtbaukomponenten anschaulich demonstrieren. Die Auswahl und Entwicklung der Komponenten erfolgte in einem umfassenden Ansatz unter Berücksichtigung von Designanforderungen, zweckmäßigen Materialien sowie effizienten Fertigungstechnologien. Obwohl die in diesem Vorhaben anvisierten Komponenten für Elektrofahrzeuge aufgrund der hier besonders stark ausgeprägten Motivation zu Leichtbaulösungen entwickelt wurden, ist die Übertragbarkeit auf weitere Fahrzeugtypen auch mit konventionellen Antrieben und darüber hinaus auf weitere Industriebereiche und Branchen gegeben.

19. Schlagwörter

Naturfaser, Faser-Kunststoff-Verbund, Leichtbau, Elektromobilität, Fertigungsprozesse

20. Verlag
n.n.

21. Preis
n.n.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN Planned	2. type of document (e.g. report, publication) Report
3. title Cooperative project: New materials and technologies for lightweight generic components of electric low-emission concept vehicle – "MATLEV" Subproject: Development of natural-fibre composite structures and efficient manufacturing processes for the manufacture of generic lightweight components for the use in a low-emission concept vehicle	
4. author(s) (family name, first name(s)) Gude, Maik; Prof. Dr.-Ing. habil. Czulak, Andrzej; Dr.-Ing. Geller, Sirko; Dipl.-Ing. Weißenborn, Oliver; Dipl.-Ing. Przybyszewski, Bartłomiej; Dipl.-Ing. Gottwald, Robert; Dipl.-Ing.	5. end of project August 2015 6. publication date October 2015 7. form of publication Report
8. performing organization(s) (name, address) Institute of Lightweight Engineering and Polymer Technology, Technical University Dresden: Holbeinstraße 3, 01307 Dresden	9. originator's report no. 1/A285/15 10. reference no. 01MX12021 11. no. of pages 65
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. no. of references 40 14. no. of tables 7 15. no. of figures 41
16. supplementary notes Publication is considered to be the final report of the above mentioned project.	
17. presented at (title, place, date) -	
18. abstract The main goal of the MATLEV-project was the development of natural-fibre-reinforced composite structures based on innovative and efficient manufacturing processes. Thus, the high potential of these novel materials is demonstrated by implementing selected composite structures, such as sandwich-panels for floor-elements, seat structures and door-panels. These generic lightweight components provide a significant potential for the use in a low-emission concept vehicle (LEV) apart from other Multi-Purpose Vehicles (MPV). Within the framework of the MATLEV-project, a comprehensive enquiry was made to categorise relevant nature-based reinforcement structures according to their fibre length and availability. Comprehensive processing studies on selected semi-finished products and matrix systems helped to evaluate their processing characteristics and the resulting composite structure in particular. With the determination of relevant mechanical properties, an essential condition was provided to understand the material behaviour and to design generic lightweight structures. Further investigations on polyurethane-based matrix materials with the use of fillers improved the resistance against fire. Next to the modification of natural-fibre composites, the polyurethane spray-coat method was adapted to process natural fibres by developing an innovative cutting device as well as an automated handling-unit. With the introduction of powder-based matrix systems, having mainly a thermoplastic processing behaviour, but rather thermoset mechanical properties, comprehensive processing studies for the integration of natural fibres were conducted. In this context, the Resin-Powder-Moulding (RPM) and the Thermoset Sheet Forming (TSF) as innovative process technologies were established. The development of innovative generic lightweight components was achieved by taking into consideration all requirements such as design, functionality of materials and efficiency of manufacturing methods. Although these novel lightweight structures are mainly focused for the use in electric mobility, there is a high potential for transferring these technologies to other industrial applications.	
19. keywords Natural fibres, fibre-reinforced composite, lightweight engineering, electric mobility, processing technology	
20. publisher tbd	21. price tbd