

# Sachbericht (Schlussbericht)

zum Verwendungsnachweis

zu FuE Vorhaben

<b>Reg.-Nr.:</b>	MF110118
<b>FuE-Einrichtung:</b>	Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V.
<b>Titel:</b>	Werkstoff- und Prozessentwicklung für thermoformbare hochleistungsfaserverstärkte Halbzeuge in Serienprozessen
<b>Projektlaufzeit:</b>	01.01.2012 - 31.12.2013

Rudolstadt

, den 30.06.2014

Name und Telefonnummer des Projektleiters: Dr.-Ing. Renate Lützkendorf, 03672 379300

Firmenstempel

Thüringisches Institut für  
Textil- und Kunststoff-  
Forschung e.V.  
Breitscheidstraße 97  
07407 Rudolstadt-Schwarza

  
Unterschrift des Projektleiters

  
Rechtsverbindliche Unterschrift

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielstellung des Projekts .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Faserrecycling und Fasereigenschaften.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Vliesherstellung mit recycelten Carbonfasern .....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Verbundherstellung.....</b>	<b>11</b>
4.1	<i>Pressverfahren .....</i>	<i>11</i>
4.2	<i>Untersuchte Matrixmaterialien .....</i>	<i>13</i>
<b>5</b>	<b>Verbundeigenschaften.....</b>	<b>15</b>
5.1	<i>Prüfverfahren .....</i>	<i>15</i>
5.2	<i>Ergebnisse der Prüfungen.....</i>	<i>16</i>
5.2.1	<i>Bestimmung optimaler Fasergehalte (anhand PP-Matrix, mit und ohne Haftvermittler) .....</i>	<i>16</i>
5.2.2	<i>Vergleich unterschiedlicher Vlies-Herstellungsverfahren.....</i>	<i>19</i>
5.2.3	<i>Vergleich unterschiedlicher Matrixmaterialien .....</i>	<i>21</i>
5.2.4	<i>Umformverhalten von Organoblechen .....</i>	<i>23</i>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>Wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse, aktualisierter Verwertungsplan .....</b>	<b>26</b>
7.1	<i>Zielmärkte und Wettbewerbssituation .....</i>	<i>26</i>
7.2	<i>Charakterisierung der Marktgröße und des angestrebten Anteils .....</i>	<i>28</i>
7.3	<i>Erzeugniskalkulation (Abschätzung).....</i>	<i>30</i>
7.4	<i>Vertriebs- und Transferstrategie.....</i>	<i>30</i>
7.5	<i>Einschätzung der Markteintrittschancen.....</i>	<i>31</i>
7.6	<i>Quantitative Einschätzung der zu erwartenden wirtschaftlichen Effekte.....</i>	<i>32</i>
<b>8</b>	<b>Danksagung.....</b>	<b>33</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>33</b>

# 1 Zielstellung des Projekts

Leichtbau ist seit geraumer Zeit ein dominierender Megatrend. Dahinter verbirgt sich das Bestreben, klassische Werkstoffe durch leichtere Materialien unter Erhalt der physikalisch-mechanischen Parameter zu substituieren. Insbesondere durch die Werkstoffgruppe der faserverstärkten Kunststoffe (Composites) kann diesen konstruktiven Anforderungen Rechnung getragen werden, so dass derartige Werkstoffe zunehmend an Bedeutung gewinnen. Aktuell beträgt das Produktionsvolumen in Europa über eine Million Tonnen [1].

Als potentielle Verstärkungsmaterialien für Hochleistungsanwendungen kommen vorwiegend endlose Faserverstärkungsmaterialien in Form von Multifilamentgarnen oder textilen Flächenhalbzeugen wie Gelegen oder Geweben auf Basis von Glas, Aramid oder Carbon zum Einsatz. Es sei an dieser Stelle beispielsweise das Verfahren der glasmattenverstärkten Thermoplaste (GMT) erwähnt, wodurch es seit Jahren gelingt, effizient Composite-Bauteile herzustellen. Aktuell bewegen sich die Kohlenstoff(Carbon)-faserverstärkten Kunststoffe (CFK) durch die Bestrebungen der Automobilisten von einer exquisiten zu einer marktrelevanten Hochleistungswerkstoffgruppe mit überproportionalen Wachstumsprognosen [1-3].

Das Matrixmaterial der Wahl stellen für CFK-Anwendungen derzeit duroplastische Matrixsysteme meist auf Basis von Epoxidharzen dar, da mit diesen Systemen auf Grund der guten Benetzbarkeit der flüssigen Ausgangsstoffe hohe mechanische Kennwerte erzielt werden können. Seit einiger Zeit nehmen jedoch die Entwicklungen auf dem Gebiet der thermoplastischen kohlefaserverstärkten Anwendungen zu, wobei auch hier fast ausschließlich Endlosfasern verarbeitet werden [4].

Während der Produktion von meist harzgebundenen CFK-Bauteilen fallen ca. 20-30% an textilen Abfällen (Schnittreste von Geweben und Gelegen) an [5], die in der Vergangenheit meist entsorgt wurden. Eine großtechnische Umsetzung zur Wiederverwendung der Hochleistungsfasern stand bisher nicht zur Verfügung. Verschiedene Recyclingkonzepte für weiche Kohlenstofffaserabfälle werden derzeit erforscht [6, 7]. So wurde vom TITK ein Verfahren erarbeitet, in dem weiche Halbzeugreste zunächst zerschnitten und mit einer modifizierten Mühlentechnik zu Faserbündeln und Einzelfasern aufbereitet werden, um einer textilen Weiterverarbeitung zur Verfügung zu stehen.

Ziel des vorliegenden Projektes ist die Entwicklung von Stapelfaser-Halbzeugen aus endlich langen Verstärkungsfasern, wie sie beispielsweise in Recyclingprozessen anfallen. Die Halbzeuge sollen sich dadurch auszeichnen, dass sie eine Faserorientierung aufweisen, eine gute Haftung zur thermoplastischen Polymermatrix ausbilden und ein optimales Verarbeitungsverhalten im nachfolgenden, thermischen Umformprozess zeigen.

## 2 Faserrecycling und Fasereigenschaften

Der Einsatz von Carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) wird in der Automobilindustrie aktuell in Verbindung mit der Entwicklung der Elektromobilität stark forciert. Vorreiter auf diesem Gebiet ist BMW mit den beiden Elektrofahrzeugen i3 und i8, welche eine CFK-Fahrgastzelle besitzen. CFK besitzen durch die exzellenten mechanischen Eigenschaften bei geringem Gewicht ein enormes Leichtbaupotenzial und werden sich auch zunehmend in konventionellen Automobilen mit Verbrennungsmotor durchsetzen, da bei neuen Fahrzeuggenerationen im Zusammenhang mit der notwendigen Verbrauchs- und CO<sub>2</sub> Emissionsreduzierung eine Senkung des Fahrzeuggewichtes erforderlich ist. Wesentliche Herausforderungen bei der Verarbeitung von Carbonfaserverbunden sind derzeit vor allem die hohen Kosten bei der Bauteilherstellung sowie die Produktionsabfälle (20 bis 30 % als Rand- und Konturbeschnitt), die im Verarbeitungsprozess anfallen. Dadurch ist insbesondere das Faserrecycling eine Schlüsseltechnologie zur wirtschaftlichen Verarbeitung von CFK-Verbunden. Die recycelten Fasern sollen wieder auf möglichst hohem Niveau bei der Verbundherstellung eingesetzt werden. Eine interessante Möglichkeit des Wiedereinsatzes von recycelten Carbonfasern sind Organobleche mit thermoplastischer Matrix (RCF-Organobleche).

Das TITK hat sich in den letzten Jahren intensiv mit dem Recycling von Hochleistungsfasern sowie der Entwicklung und Optimierung von Verarbeitungsverfahren zur Herstellung von Verbundwerkstoffen aus recycelten Carbonfasern befasst [7-9]. Für das Faserrecycling wurde ein leistungsfähiger Prozess entwickelt, mit dem aus unverharzten textilen Abfällen in wenigen Schritten Stapelfasern mit Faserlängen von 40-60 mm aufgeschlossen werden können (Bild 1-3). Die Faserabfälle werden zunächst vorsortiert und in Chips mit definierter Größe geschnitten. Die Chips können nachfolgend mit einer modifizierten Mühlentechnik geöffnet und in Faserbündel zerlegt werden. Das geöffnete Fasermaterial muss anschließend nur noch entstaubt werden und steht dann sortenrein für einen Wiedereinsatz in Verbundwerkstoffen zur Verfügung.

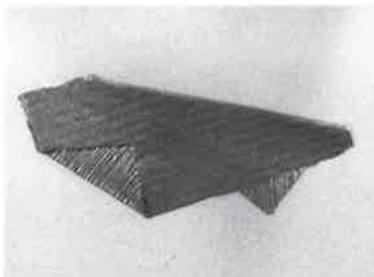


Bild 1: Gelegeabfälle

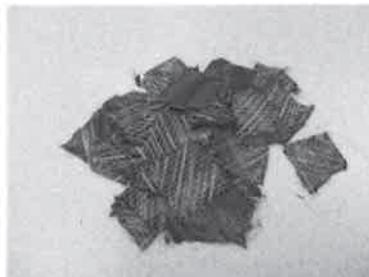


Bild 2: Gelegechips



Bild 3: Recyclingfasern

Das Verfahren hat gegenüber der konventionellen textilen Reißtechnologie einige entscheidende Vorteile:

- Schonende Faserbehandlung
- Hoher Materialdurchsatz
- Einsetzbar auch für mehrlagige Stack- und Preformabfälle
- Geringe Staubentwicklung
- Niedrige Investitionskosten für die Anlagentechnik

Die Technologie wurde in den industriellen Maßstab überführt und kommt aktuell beim Recycling von Produktionsabfällen bei der Firma SGL ACF in Wackersdorf zum Einsatz. Die mechanischen Eigenschaften der einmal recycelten Carbonfasern liegen in einem Bereich von 85-90% der Eigenschaften von Primärware (Abbildung 1) und ermöglichen einen hochwertigen Wiedereinsatz bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen. Dazu müssen aber die nachfolgenden Prozesse an die Verarbeitung von Stapelfasern angepasst werden.

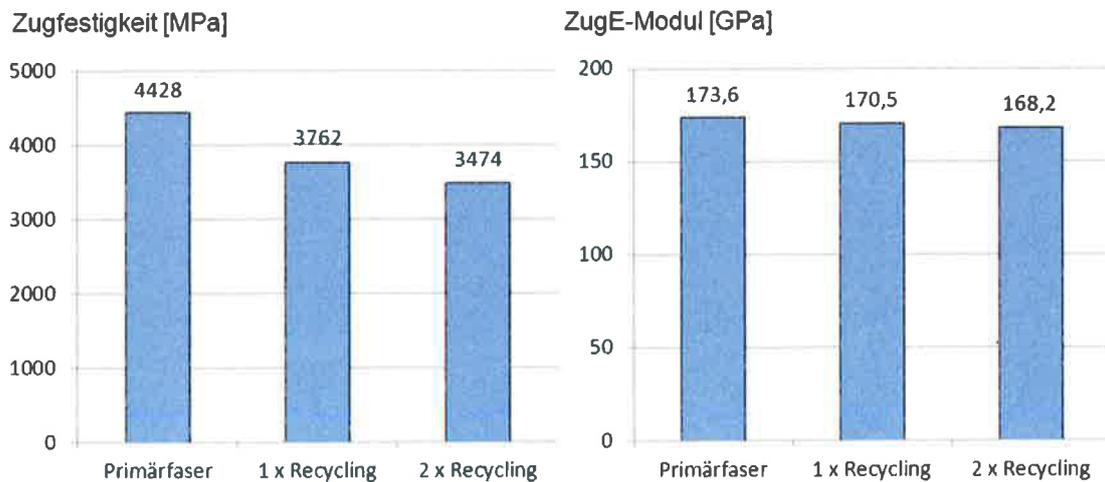


Abb. 1: Mechanische Eigenschaften von recycelten Carbonfasern (geprüft an Stapelfasern)

Von den Carbonfaser-Produkten der verschiedenen Hersteller wurde die Einzelfaser-Prüfung in Anlehnung an die DIN EN ISO 5079 durchgeführt. Ausgewählte Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt:

Tabelle 1: Einzelfaserprüfung von ausgewählten Carbonfasermaterial

Probenbezeichnung	Feinheit [dtex]	Faserdurchmesser [μm]	Feinheitsbezogene Reißkraft [cN/tex]	Faserfestigkeit [MPa]	Faser-E- Modul [GPa]
Tenax HTA 40 E13 6k (Gewebe)	0,68	6,9	231	4158	420
Tenax HTS 40 F13 12k (Gewebe)	0,67	6,9	190	3410	383
Pyrofil TR505 15k (Gewebe)	0,68	6,9	188	3384	308
Torayca T300J 12k (Gewebe)	0,72	7,1	170	3060	343

Die untersuchten Fasermaterialien weisen ein sehr ähnliches Wertenniveau bezüglich Faserfeinheit und Faserdurchmesser auf. Die Faserfestigkeiten und Fasersteifigkeiten unterscheiden sich teilweise deutlich. Bei den in Tabelle 1 erfassten Carbonfasern handelt es sich um hochsteife bis ultra-hochsteife Fasertypen, daher liegt der E-Modul Wert deutlich höher im Vergleich zu der Fasertype aus Abbildung 1, bei der es sich zwar um eine hochfeste aber nicht um eine hochsteife Carbonfaser handelt.

Zur Vergleichbarkeit der weiteren Untersuchungen wurde nur eine Fasertype herangezogen (einfach recyceltes Material aus Abbildung 1, nachfolgend „RCF“ genannt), um so das umfassende Untersuchungsprogramm unabhängig von der Verstärkungsfasertype gestalten zu können.

### 3 Vliesherstellung mit recycelten Carbonfasern

Ein wichtiger Schritt auf dem Weg der Wiederverwertung von recycelten Carbonfasern ist die Herstellung von textilen Halbzeugen für die Verbundfertigung. Je nach Faserlänge der recycelten Carbonfasern bieten sich verschiedene Vliesbildungsverfahren an:

- ✓ Nassvliesherstellung (Faserlängen 3-15 mm)
- ✓ Krempelvliesherstellung (Faserlängen 40-80 mm)
- ✓ Aerodynamische Vlieslegung (Faserlängen 20-80 mm)

Für alle drei Verfahren verfügt das TITK über die entsprechende Anlagentechnik und konnte die grundsätzliche Eignung der Prozesse für die Verarbeitung von recycelten Carbonfasern nachweisen. Zu beachten ist allerdings, dass im Zusammenhang mit dem Einsatz von Carbonfasern einige Modifikationen an der Anlagentechnik erforderlich sind:

- Absicherung aller elektrischen Anlagen gegen Carbonfaserstäube
- Installation einer leistungsfähigen Entstaubungsanlage
- Verwendung spezieller Beschläge und verschleißfester Materialien
- Schonende Faserzuführung und Faseröffnung

Bei der Nassvliesherstellung müssen die recycelten Carbonfasern zunächst auf mittlere Faserlängen von weniger als 10 mm eingekürzt werden. Größere Faserlängen führen im Nassprozess zur Bildung von Agglomeraten und Faseranhäufungen, die eine inhomogene Vliesstruktur zur Folge haben. Durch die kurzen Faserlängen weisen die Nassvliese meist keine ausgeprägte Faserorientierung auf und sind sehr gleichmäßig. Typische Flächenmassen liegen in einem Bereich von 50-200 g/m<sup>2</sup>. In Mischungen mit thermoplastischen Fasern eignet sich die Nassvliesherstellung auch für die Herstellung von Organoblechen, ist aber durch die starke Zerkleinerung des Recyclingmaterials und die erforderliche Trocknung der Vliese recht aufwändig und teuer. Aus diesem Grund erscheint diese Technologie nur für sehr spezielle Anwendungen (Oberflächenvliese, sehr dünne Vliese) sinnvoll.

Im Krempelverfahren lassen sich leichte Carbonfaservliese mit Flächenmassen von ca. 20-30 g/m<sup>2</sup> und gerichteter Faserorientierung herstellen. Das kann sowohl mit 100 % Carbonfasern als auch mit Mischungen aus Carbonfasern und thermoplastischen Fasern erfolgen. Stand der Technik ist ein anschließendes Täfeln (Vervielfachen) des Faserflors, sodass Vliese mit Flächenmassen von über 500 g/m<sup>2</sup> hergestellt werden können. In Abbildung 2 ist diese Prozesskette für die Herstellung von Halbzeugen mit Recycling-Carbonfasern und PA6-Fasern dargestellt.

In den ersten Versuchen (Variante A) wurden die Stapelfasern als Flocken direkt in den Vlieskrepelprozess eingebracht. Jedoch zeigte sich am Vliesbild, dass auf diese Weise keine zufriedenstellende Homogenität der gesamten Mischung erreicht werden konnte. Nach zusätzlicher Voröffnung der PA6-Fasern konnte eine deutlich verbesserte Mischungsgleichmäßigkeit erzielt werden (Variante B).

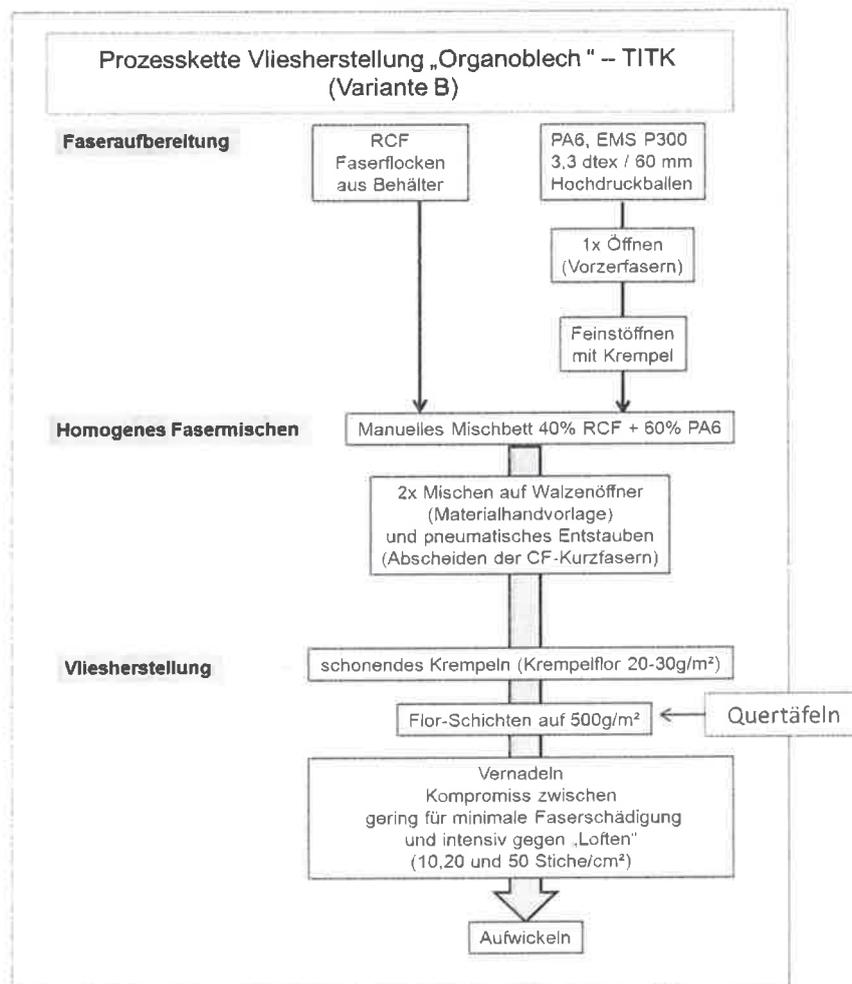


Abb. 2: Mischvliesherstellung am TITK (Quertäfel)

Für ein Vlieshalbzeug auf Carbonfaserbasis besitzt diese Technologie folgende Nachteile:

1. mechanische Schädigung der Carbonfasern durch die beiden Mischstufen mittels Walzenöffner und
2. eine fehlende hohe Faserorientierung im Vlieshalbzeug.

Für hohe Faserverbundkennwerte muss deshalb eine gesonderte, neuartige Technologie angewandt werden, die auf dem Legen von längsorientierten Krepelfloren basiert, sodass die erzeugte Faserorientierung erhalten bleibt.

Das „Längslegen“ kann genutzt werden, um 100% RCF-Vliese zu erzeugen. Das thermoplastische Matrixmaterial wird später in Form von Vliesen oder Folien (Film-

Stacking-Verfahren) in den Verbund eingebracht. Der Fasergehalt kann dabei nachträglich durch unterschiedliche Schichtungen eingestellt werden. Andererseits ist auch die Herstellung von längsgelegten Mischvliesen möglich. Dabei werden 100% RCF-Krempelflore mit Krempelfloren aus dem Matrixmaterial geschichtet und zusammen vernadelt. Der Fasergehalt wird dabei fest eingestellt. Anstelle von Krempelfloren können auch Meltblownvliese bestehend aus dem Matrixmaterial verwendet werden.

In Abbildung 3 ist die Prozesskette des „Längslegens“ für die Herstellung von Mischvliesen mit Recycling-Carbonfasern und PA6-Fasern dargestellt.

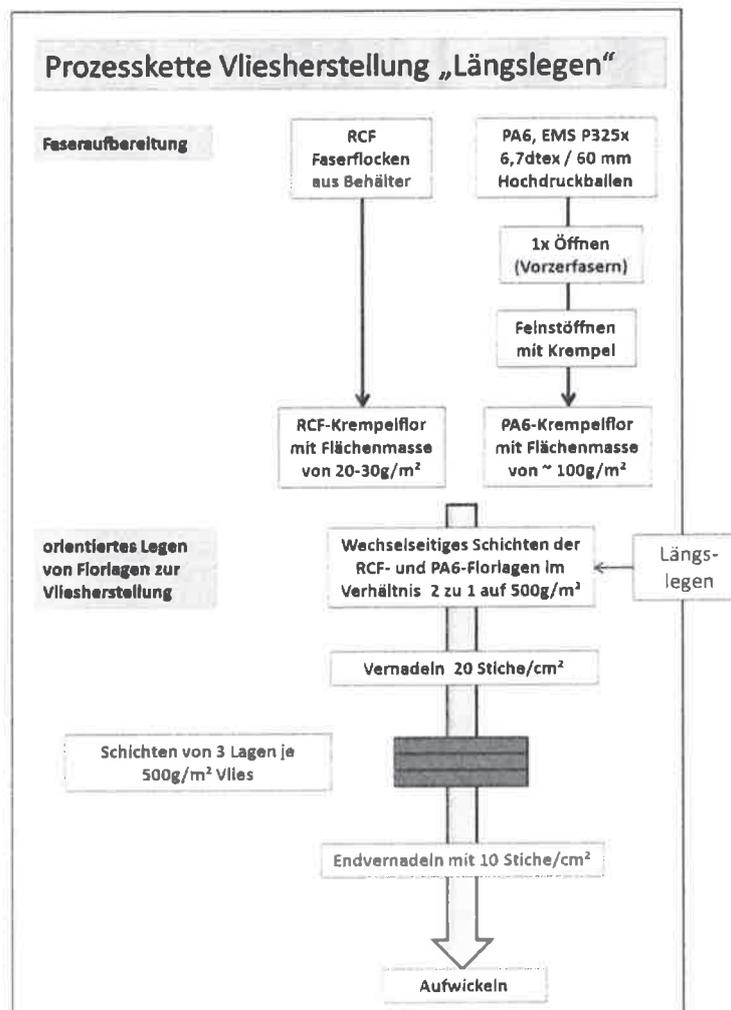


Abb. 3: Prozesskette zur Herstellung von hochorientierten Vlieshalbzeugen zur Kennwertermittlung

Aerodynamisch gelegte Vliese haben meist keine so ausgeprägte Faserorientierung wie gekrempelte Vliese und das Fasermaterial wird weniger mechanisch beansprucht. Allerdings sind in der Regel die Fasermischungen auch nicht so homogen wie bei der Verarbeitung auf der Krempel. Übliche Flächenmassen von aerodynamisch gelegten Vliesen liegen in einem Bereich von 300 bis 3.000g/m<sup>2</sup>.

Die Verfestigung von gekrempelten oder aerodynamisch gelegten Vliesen kann rein mechanisch durch Vernadeln oder Vernähen oder auch thermisch durch Zusatz von Bindepulvern oder Bindefasern erfolgen. Letztere Variante ist interessant für die Herstellung von Organoblechen, da beim Einsatz von thermoplastischen Fasern das Matrixmaterial gleich bei der Vliesherstellung mit eingebracht werden kann. Das schließt für ein besseres Handling der Halbzeuge auch eine mechanische Vorverfestigung der Vliese durch Vernadeln nicht aus. In Bild 4 ist ein Mischvlies aus Carbonfasern und PA6-Fasern abgebildet, welches durch Quertäfelung hergestellt wurde. Bild 5 zeigt ein etwa 100 g/m<sup>2</sup> schweres längsgelegtes Vlies aus 100 % Recycling-Carbonfasern.

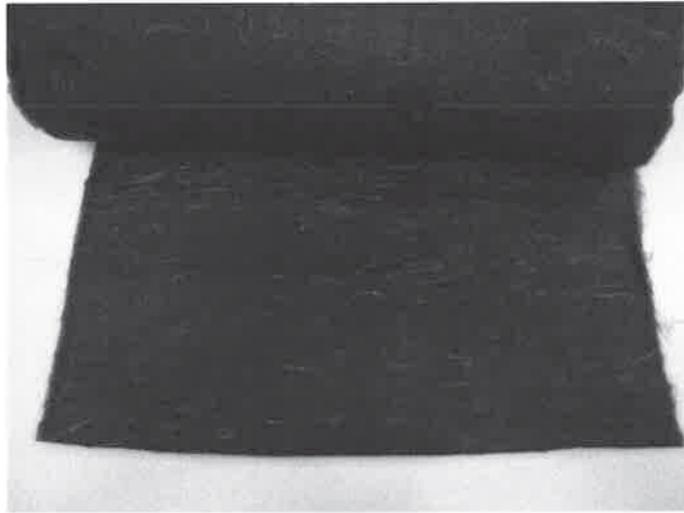


Bild 4: quergetäfeltes RCF-PP-Vlies mit 40 ma % CF-Gehalt, 500g/m<sup>2</sup>

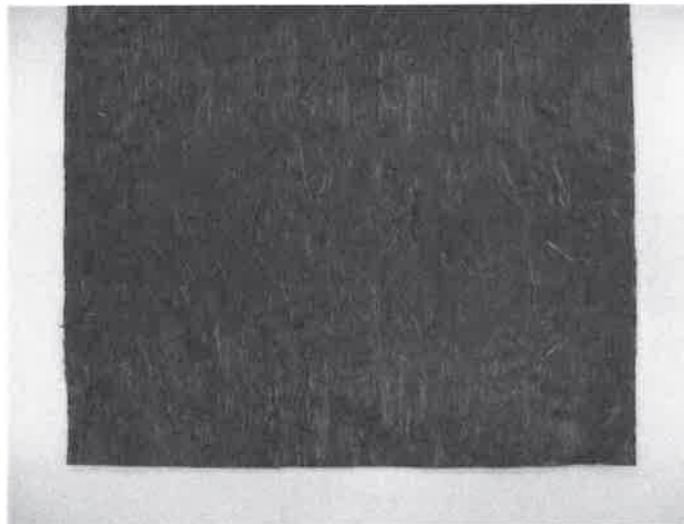


Bild 5: 100 % RCF-Vlies, 3 Florlagen längsgelegt, ca. 90 g/m<sup>2</sup>

## 4 Verbundherstellung

### 4.1 Pressverfahren

Die Herstellung von Organoblechen kann diskontinuierlich durch Verpressen von Halbzeug-Zuschnitten, semikontinuierlich durch getaktetes Pressen oder auch kontinuierlich über Doppelbandanlagen erfolgen. Bei der diskontinuierlichen und semikontinuierlichen Herstellung von Organoblechen können hohe Drücke aufgebracht werden, was zu sehr homogenen Verbunden mit einem geringen Porenanteil führt. Bei der kontinuierlichen Fahrweise über Doppelbandanlagen lassen sich sehr gute Oberflächenqualitäten erzielen. Allerdings ist die Verdichtung in der Regel nicht so hoch, da der Druck in einer Doppelbandanlage meist niedriger ist als bei der diskontinuierlichen Verpressung.

Für die Ermittlung der erzielbaren mechanischen Eigenschaften wurden die unterschiedlich hergestellten Halbzeuge im TITK zu Organoblechen verpresst. Für eine maximale Verdichtung wurden diskontinuierlich arbeitende Laborpressen mit hohen Drücken verwendet.

Die Verbundherstellung erfolgte 1- und 2-stufig. Beim **1-stufigen Verfahren** wird das Halbzeug in nur einer Presse aufgeheizt, unter Druck verdichtet und über das Kühlsystem der Presse wieder abgekühlt. Im Folgenden ist der **Ablauf** des Pressprozesses mit den eingestellten **Parametern** dargestellt (Presse: Rucks):

- Einlegen der gestapelten Halbzeug-Zuschnitte (750x520 mm) bei Raumtemperatur zwischen 2 Teflonfolien
- Schließen der Presse mit Presskraft 200 kN
- Heizen auf 250 °C bei PA6, 220 °C bei PP (Dauer: ca. 15 min)
- 30 s Halten
- Presskraft 2000 kN (auf 2 mm Distanzstücke)
- 30 s Halten
- Abkühlen auf 40 °C (Druck wird aufrecht gehalten, Dauer: ca. 15 min)
- Öffnen der Presse
- Entnahme der Platten und Entfernen der Teflonfolien

Das **1-stufige Pressverfahren** benötigt bei thermoplastischen Verbunden eine lange Zykluszeit. Je nach Heiz- und Kühlgeschwindigkeit der verwendeten Presse ergeben sich Zyklen von etwa 30 min für die Verbundherstellung. (Neuartige

Werkzeugkonstruktionen, bei denen lediglich die Oberfläche beheizt und gekühlt werden muss, könnten hier eine deutliche Reduzierung der Zykluszeiten ermöglichen.)

In Anlehnung an die Pressbedingungen des 1-stufigen Verfahrens wurde das **2-stufige Verfahren** durchgeführt. Dabei kommen zwei Pressen zum Einsatz. In einer Presse werden die Halbzeuge auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt und anschließend in einer zweiten Presse (meist unbeheizt) verdichtet und abgekühlt. Um die Entnahme des aufgeheizten Halbzeuges aus der heißen Presse zu ermöglichen, wurde es zwischen 2 Teflonfolien eingebettet. Ohne die Folien würde das Material in der heißen Presse anhaften und wäre nicht handhabbar. Im TITK erfolgte die Übergabe des aufgeheizten Materials zur zweiten Presse manuell und es wurden Teflonfolien mit 1 mm Dicke verwendet, da diese die Wärme länger speichern als dünnere Folien.

Ein Vorteil des 2-stufigen Verfahrens ist die deutlich reduzierte Zykluszeit der Verbundherstellung. Anhand von Temperaturkurven für den gesamten Pressprozess kann eine Zykluszeit von etwa 4 - 5 min bei Verwendung von RCF/PA6 abgeschätzt werden (siehe Abbildung 4). Die Kurven wurden erstellt, um die Aufheiz- und Abkühlzeiten in den jeweiligen Pressen zu bestimmen und zu optimieren.

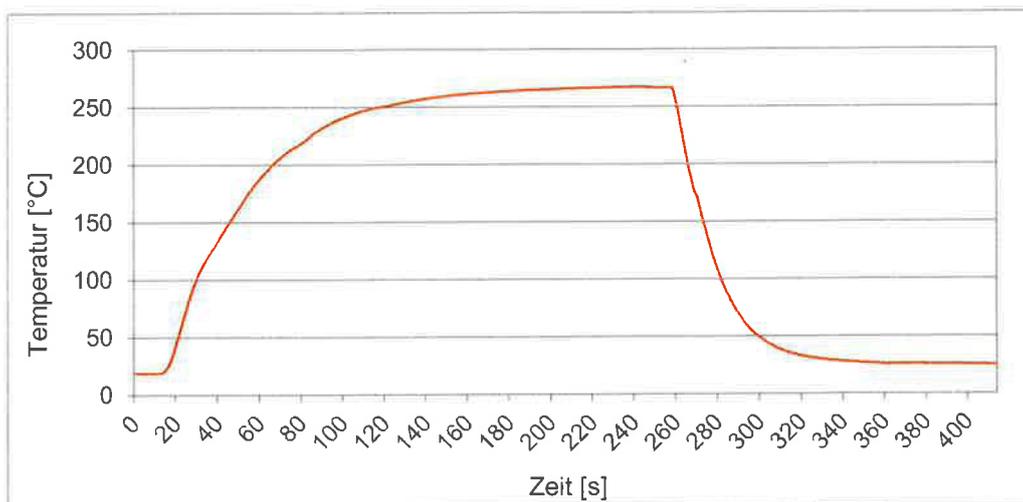


Abb. 4: Temperaturverlauf beim 2-stufigen Pressprozess (Laborpressen: Schwabenthon und Pinette)

Verwendete Drücke beim 2-stufigen Pressverfahren:

Heizpresse: 0,3-0,5 N/mm<sup>2</sup>

Formpresse: 8 N/mm<sup>2</sup>

Insbesondere bei niedrigen Fasergehalten (20 ma%) darf der Druck der Heizpresse nicht zu hoch eingestellt werden, da es ansonsten zum Fließen des aufgeschmolzenen Materials kommt. In diesem Fall kann die gewünschte Dicke des Organoblechs nicht mehr erreicht werden und die ursprüngliche Orientierung der Verstärkungsfasern ändert sich teilweise deutlich.

Durch die Fertigung eines neuen Presswerkzeuges (siehe Abbildung 5) konnte mit einer vorhandenen Presse der Firma Rucks die Umformbarkeit der Halbzeuge untersucht werden. Die Presse verfügt über eine separate Vorheizanlage, sodass ein 2-stufiger Pressprozess angewendet werden konnte. Die Herstellung von 3-D-Musterbauteilen konnte mit einer Gesamt-Zykluszeit von unter 5 min erfolgreich durchgeführt werden.

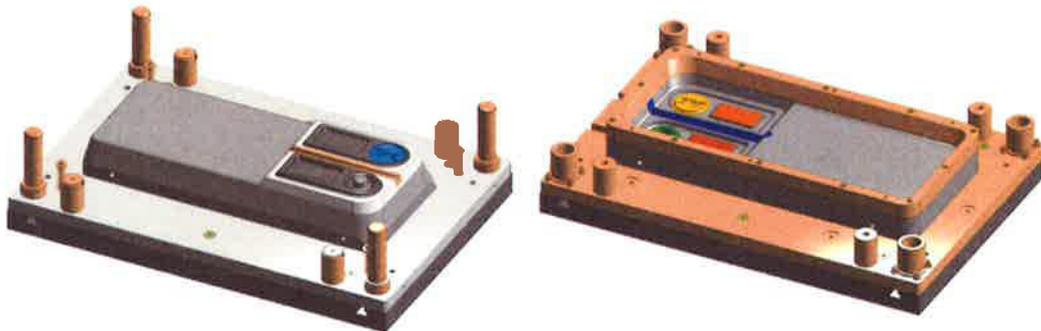


Abb. 5: Modell von Ober- und Unterseite des 3-D-Presswerkzeuges

## 4.2 Untersuchte Matrixmaterialien

Die Matrixmaterialien wurden insbesondere hinsichtlich ihres Schmelzverhaltens untersucht. Dies ist erforderlich, um die optimalen Prozessbedingungen bzgl. der Halbzeugkonsolidierung und des Thermoforming zu ermitteln. Ausgewählte Ergebnisse sind in Tabelle 2 enthalten:

Tabelle 2: Schmelzverhalten von eingesetzten Matrixmaterialien

Probenbezeichnung	MVR (ISO 1133) [cm <sup>3</sup> /10min]		DSC (DIN 51007)		
			1. Aufheizung	Abkühlung	2. Aufheizung
PP-Stapelfaser	39	230°C	176,5 °C	118,3 °C	164,9 °C
PP-Flachfolie (Gefo)	21	2,16kg	147,9 °C	96,5 °C	143,1 °C
PA6 Stapelfaser P300	305	275°C	228,2 °C	185,4 °C	221,4 °C
PA6-Schlauchfolie	40	5kg	225,1 °C	179,2 °C	222,0 °C

**PP-** und **PA6-Fasern** wurden für die Herstellung von Mischvliesen genutzt, während **PP-** und **PA6-Folien** bei der Herstellung von Organoblechen nach dem Film-Stacking-Verfahren eingesetzt wurden.

Zur Untersuchung der mechanischen Kennwerte in Abhängigkeit vom Fasergehalt wurden für die Verbundherstellung neben reinen **PP-Folien** auch **PP-Folien mit Haftvermittler** (Maleinsäureanhydrid) verwendet, da aus verschiedenen anderen Untersuchungen ein positiver Effekt auf die mechanischen Kennwerte wie z.B. Festigkeit und E-Modul zu erwarten ist.

Des Weiteren wurden Meltblown-Vliese mit je etwa  $100\text{g/m}^2$  aus den thermoplastischen Matrixmaterialien **PP**, **PA6**, **PBT**, **PET** und **PLA** für die Verarbeitung mit 100% RCF-Vliesen ( $100\text{ g/m}^2$ , längsgelegt) verarbeitet. Die Halbzeuge wurden so geschichtet, dass ein Fasergehalt von etwa 45 ma% resultierte.

Für einen Vergleich mit konventionellen CFK mit duroplastischer Matrix wurden 100% RCF-Vliese (längsgelegt) auch mit Epoxidharz (EP) verarbeitet.

## 5 Verbundeigenschaften

### 5.1 Prüfverfahren

Die jeweiligen Prüfkörper wurden entsprechend der Faserorientierung und Probekörpergeometrie aus dem Plattenmaterial herausgesägt und die Schnittkanten entgratet.

#### **Zugprüfung**

Prüfnorm:	DIN EN ISO 527
Prüfgerät:	Instron Universalprüfmaschine 5900R Klasse 1 nach ISO 7500-1
Probekörper:	Typ 2
Probekörpergeometrie:	20 mm x 200 mm
Freie Messlänge:	100 mm (Einspannlänge)
Extensometer-Messlänge:	50 mm
Prüfgeschwindigkeit:	2 mm/min

#### **3-Punkt-Biegeprüfung**

Prüfnorm:	DIN EN ISO 178
Prüfgerät:	Instron Universalprüfmaschine 4466 Klasse 1 nach ISO 7500-1
Probekörpergeometrie:	25 mm x 55 mm (16 x Dicke + 15 mm)
Auflager:	$r = 5$ mm
Stützweite:	nach Probenkörperdicke (16 x Dicke)
Prüfgeschwindigkeit:	2 mm/min

#### **Charpy-Schlagzähigkeit**

Prüfnorm:	DIN EN ISO 179/2f
Prüfgerät:	Schlagpendel B 5113.300
Probekörpergeometrie:	15 mm x 50 mm (25 x Dicke)
Schlagpendel:	5 J

#### **Fasergehalt**

Prüfnorm:	SAA 3.5V 031 „Bestimmung der Masse- und Volumenanteile von C- und Glasfasern bei Polyamid-Bauteilen durch Verglühen“
Prüfgerät:	Muffelofen, Feinwaage
Probekörpergeometrie:	20 mm x 20 mm

## 5.2 Ergebnisse der Prüfungen

### 5.2.1 Bestimmung optimaler Fasergehalte (anhand PP-Matrix, mit und ohne Haftvermittler)

Es wurden Verbunde mit unterschiedlichem Gehalt an Carbonfasern hergestellt, um den Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften zu ermitteln. Die Versuche wurden zunächst mit gekrempelten, längsgelegten 100% RCF-Vliesen durchgeführt. Als Matrixwerkstoff kam PP in Form von Folien zum Einsatz. Durch unterschiedliche Schichtungen konnten die verschiedenen Fasergehalte realisiert werden. Für das Matrixmaterial PP ist der positive Effekt eines Haftvermittlers auf wichtige mechanische Kennwerte bekannt. Daher wurden bei der Verbundherstellung neben reinen PP-Folien auch Folien mit 3 ma% Maleinsäureanhydrid verwendet.

Die mit orientierten RCF-Vliesen erreichbaren mechanischen Eigenschaften aus dem Zugversuch sind in Abbildung 6 dargestellt. Es ist ein linearer Anstieg der Zugfestigkeit und des E-Moduls bis zu einem Maximum festzustellen. Dieses liegt bei einer reinen PP-Matrix bei etwa 40 ma%. Wird als Matrixmaterial PP mit Haftvermittler verwendet, werden die maximalen Kennwerte in Richtung höherer Fasergehalte verschoben (ca. 45 ma%) und liegen auf einem deutlich höherem Niveau. Durch die bevorzugte Anordnung der Carbonfasern in Längsrichtung (Rollenrichtung) unterscheiden sich die mechanischen Kennwerte der längs und quer entnommenen Probekörper deutlich.

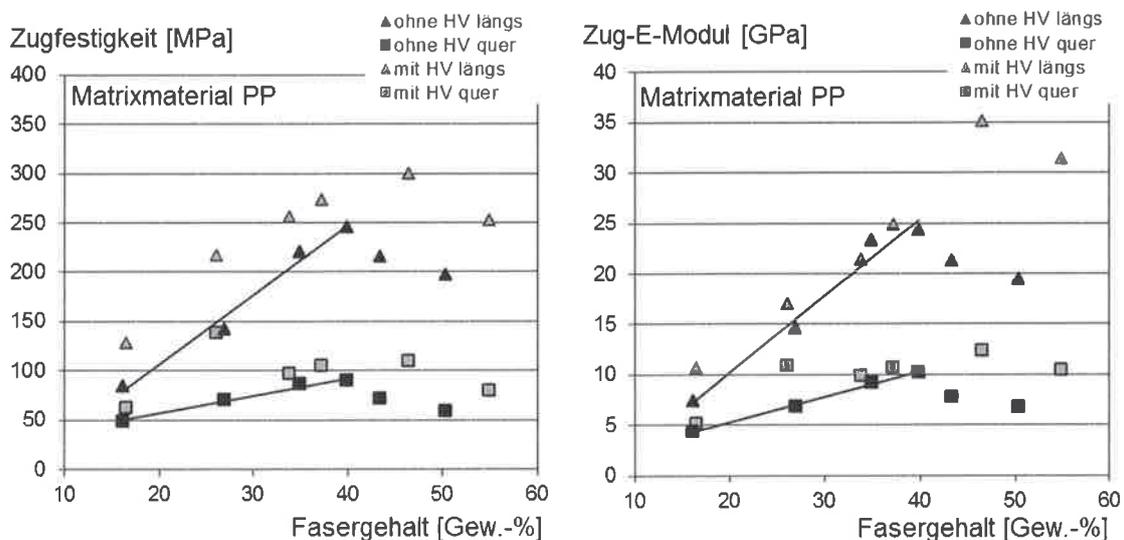


Abb. 6: Mechanische Kennwerte von RCF/PP-Organoblechen (mit und ohne Haftvermittlung)

Bei höheren Fasergehalten kommt es zu einem Abfall der Zugfestigkeit und des E-Moduls. Bei Verwendung des Haftvermittlers erfolgt der Abfall bei höheren

Fasergehalten. Die Reduzierung der mechanischen Kennwerte ist auf sinkende Verdichtungsgrade zurückzuführen.

Die im Verbund erzielten Dichten liegen bei hohen Fasergehalten deutlich unter den theoretisch berechneten Dichten. Aus dem Verhältnis der Dichtewerte wurde der Porengehalt ermittelt. Dieser entspricht dem Volumenanteil an Poren im Organoblech. Die Porengehalte der untersuchten RCF/PP Verbunde sind in Abbildung 7 dargestellt.

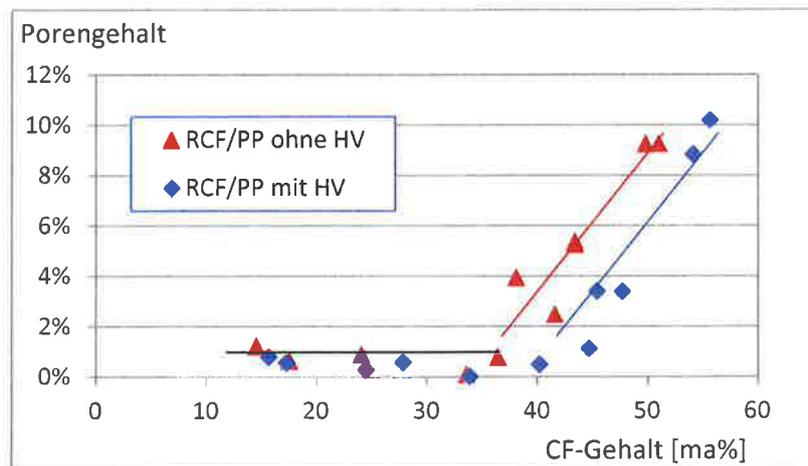


Abb. 7: Porengehalte von RCF/PP-Organoblechen mit und ohne Haftvermittler

Bei höheren Anteilen an Carbonfasern (ab etwa 40 ma%) kommt es zu einem sprunghaften Anstieg der Porengehalte, obwohl die Pressdrücke bei der Verbundherstellung unverändert blieben. Zum einen ist weniger Matrixmaterial vorhanden, um die Hohlräume zwischen den einzelnen Verstärkungsfasern zu füllen. Zum anderen besitzt das Carbonfaservlies ein Rückstellverhalten, welches bei höheren Fasergehalten stärker ausgeprägt ist und dadurch für eine Reduzierung der Dichte sorgt. Der sprunghafte Anstieg der Porengehalte korreliert sehr gut mit dem Abfall der mechanischen Kennwerte aus Abbildung 6. Der Einsatz des Haftvermittlers verschiebt den Anstieg des Porengehaltes in Richtung höherer Verstärkungsfasergehalte. Dadurch liegen die Maxima der mechanischen Kennwerte bezüglich der PP-Verbunde mit Haftvermittler bei etwas höheren Fasergehalten.

Für die Werte des Biege-E-Moduls in Abbildung 8 ist dieses Verhalten ebenfalls deutlich zu erkennen. Bei den Verbunden mit reiner PP-Matrix existiert ein Maximum bei etwa 35 ma% Fasergehalt, während die Modulwerte der PP-Verbunde mit Haftvermittler bis über 40 ma% ansteigen.

Die maximale Biegefestigkeit der RCF/PP-Verbunde wird bereits bei 30-35 ma% an Carbonfasern erreicht. Der spätere Abfall der Kennwerte für die Varianten mit Haftvermittler ist hier nicht so deutlich zu erkennen wie bei den Zugprüfwerten.

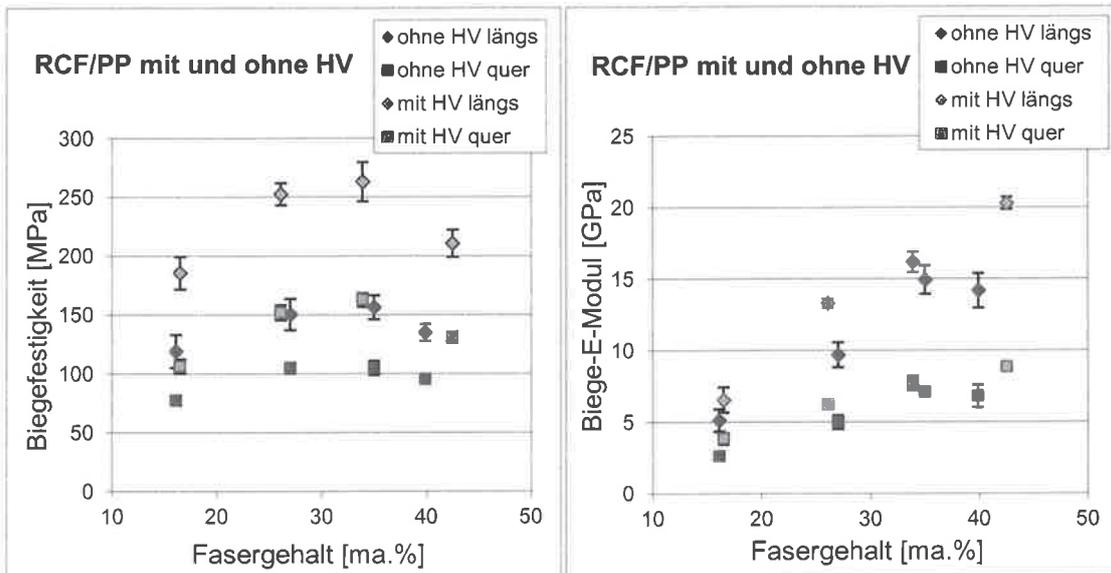


Abb. 8: Biege- und Biege-E-Modulwerte mit und ohne HV

Während die Festigkeiten sowie die Steifigkeits-Werte der Verbunde durch den Einsatz des Haftvermittlers erhöht werden, kommt es bei der Schlagzähigkeit zu einer signifikanten Abnahme der Werte. Die Reduzierung der Zähigkeit resultiert aus einem verringerten Faser-Pull-Out-Effekt. Durch den Haftvermittler werden die Carbonfasern stärker an das Matrixmaterial PP gebunden. Im Falle eines Bruches reduziert sich die Länge der Fasern, die aus der Matrix herausgezogen werden. Dadurch wird weniger Energie absorbiert und die ermittelten Schlagzähigkeitswerte werden reduziert. Die Zähigkeit der Verbunde ohne Haftvermittler liegt etwa doppelt so hoch wie die Werte der PP-Verbunde mit Haftvermittler. Es wird auch hier ein früherer Abfall der Werte bei den RCF/PP-Verbunden ohne Haftvermittler sichtbar. Die Unterschiede zwischen den Schlagzähigkeiten der längs und quer entnommenen Proben fallen wesentlich niedriger aus als bei den Werten des Zug- und Biegeversuchs.

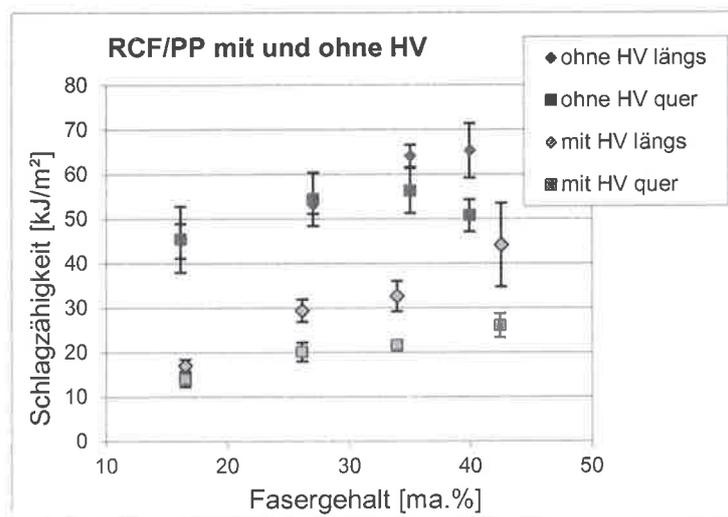


Abb. 9: Charpy-Schlagzähigkeit mit und ohne HV

### 5.2.2 Vergleich unterschiedlicher Vlies-Herstellungsverfahren

Interessant ist auch der Eigenschaftsvergleich von Organoblechen aus verschiedenen Vliesvarianten (Abbildung 10). Die besten mechanischen Kennwerte wurden mit gekrempelten, längsgelegten Vliesen erzielt („Krempelvliese“). Die Verbunde besitzen eine deutliche Anisotropie. Die mechanischen Eigenschaften in Längsrichtung liegen im Vergleich zur Querrichtung wesentlich höher, da das Vlies-Halbzeug eine starke Längsorientierung der Verstärkungsfasern aufweist. Aerodynamisch gelegte Vliese („Wirrvliese“) besitzen keine ausgeprägte Faserorientierung, daher ist kein Unterschied der mechanischen Eigenschaften bezüglich längs- und quer-entnommener Probekörper vorhanden. Außerdem sind die Fasern in der Regel nicht so stark vereinzelt wie bei der Verarbeitung über die Krempel. Eine sehr homogene Faserverteilung liegt in Nassvliesen vor. Die im Nassprozess verarbeitbaren Faserlängen sind allerdings recht kurz und führen insbesondere zu deutlich niedrigeren Schlagzähigkeiten im Vergleich zu trocken gelegten Vliesen aus langen Fasern. Der E-Modul liegt auf dem Niveau von Wirrvliesen, weist allerdings eine geringe Orientierung auf.

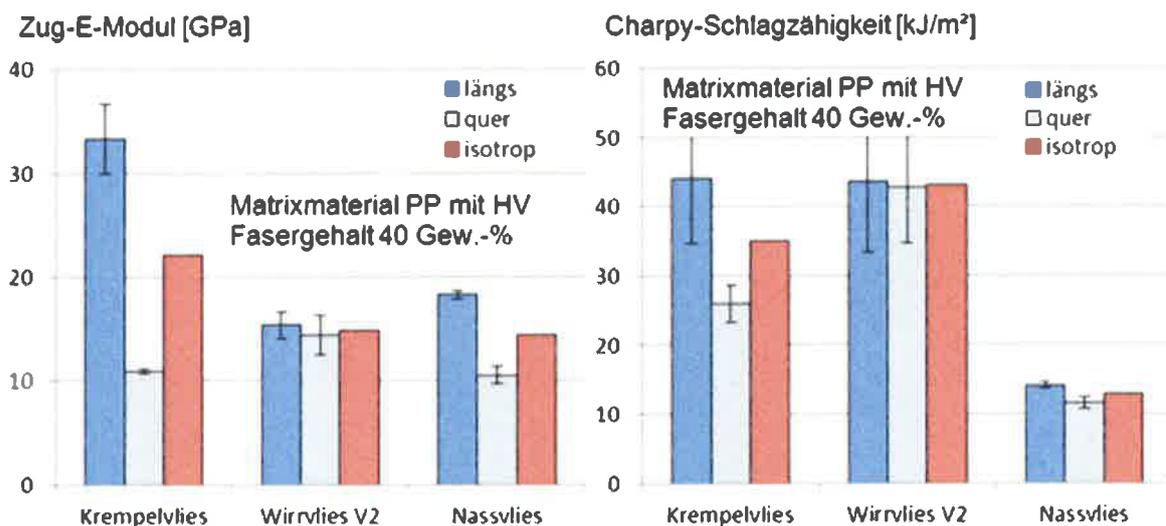


Abb. 10: Steifigkeit und Schlagzähigkeit von RCF-Organoblechen aus unterschiedlichen Vliesen

Eine maximale Faserorientierung wird mit der Prozesskette des „Längslegens“ erzielt. In Abbildung 11 sind die mechanischen Kennwerte von Verbunden dargestellt, die zum einen aus 100% RCF-Vliesen und PA6-Folie im Film-Stacking-Verfahren hergestellt wurden und zum anderen aus längsgelegten Mischvliesen, in denen neben den Carbonfasern auch das Matrixmaterial PA6 in Form von Fasern vorlag. Die Herstellung der Mischvliese erfolgte mit unterschiedlichen Vernadelungsdichten.

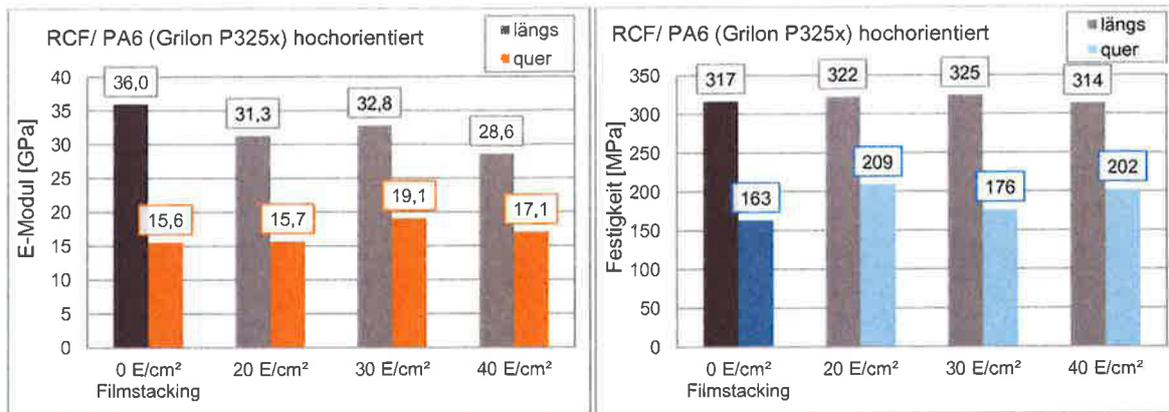


Abb. 11: Steifigkeit und Zugfestigkeit von RCF/PA6-Verbunden (40 ma%), hergestellt aus Vliesen nach dem Vlieslegeprozess "Längslegen"

Die maximalen E-Modul-Werte der vernadelten Mischvliese liegen etwas niedriger als der in Längsrichtung erzielte E-Modul im Film-Stacking-Verfahren. Die teilweise höheren Querwerte der Mischvliese deuten darauf hin, dass die Faserorientierung etwas niedriger ausfällt als es bei 100% RCF-Vliesen der Fall ist. Die E-Modul-Werte der Mischvliese nehmen mit zunehmender Vernadelungsdichte leicht ab, sodass hier ein Hinweis auf eine Umorientierung der Verstärkungsfasern durch die Vernadelung zu erkennen ist.

Bezüglich der Verbundfestigkeiten ist kein Unterschied zwischen den verwendeten Halbzeugen zu erkennen. Eine steigende Vernadelungsdichte bei den Mischvliesen von 20 auf 40 Einstiche pro cm<sup>2</sup> wirkt sich nicht negativ auf die Verbundfestigkeit aus.

Werden bei der Vliesherstellung die Verstärkungsfasern und die Matrixfasern zusammen auf der Krempel verarbeitet und anschließend quergetäfelt, resultiert eine deutlich niedrigere Orientierung der Verstärkungsfasern. Die mechanischen Kennwerte der Organobleche aus quergetäfelten Vliesen werden in Abbildung 12 mit Organoblechen aus längsgelegten 100% RCF-Vliesen und PA6-Folien (Film-Stacking) verglichen. Die Fasergehalte liegen jeweils bei 45 ma%.

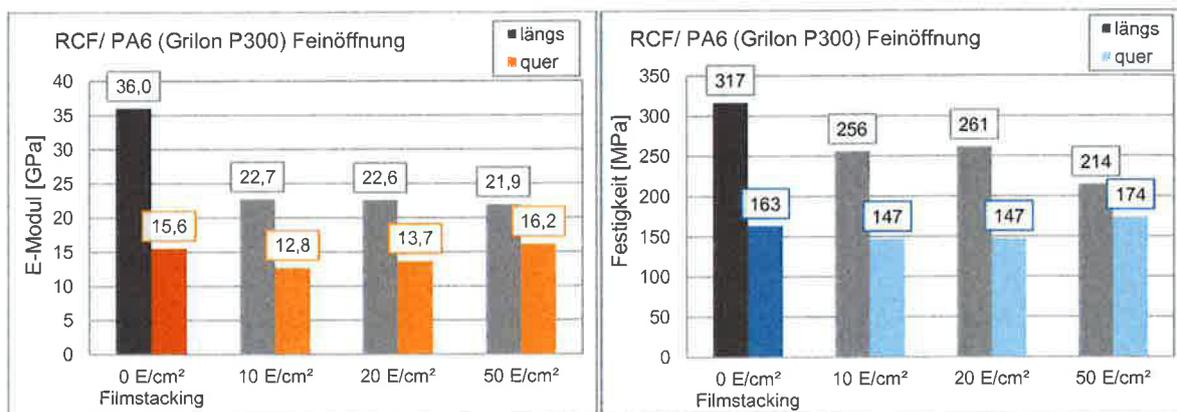


Abb. 12: Steifigkeit und Zugfestigkeit der Organobleche in Abhängigkeit der Vernadelung

Die Verarbeitung von Fasermischungen aus Carbonfasern und Matrixfasern auf der Krempel und das anschließende Quertäfeln führen zu einer schwächeren Längsorientierung der Carbonfasern im Vergleich zu längsgelegten Vliesen. Die Zugfestigkeit und insbesondere der E-Modul liegen in Längsrichtung deutlich niedriger gegenüber dem im Film-Stacking-Verfahren hergestellten Referenzmaterial. Eine starke Vernadelung ( $50 \text{ E/cm}^2$ ) sorgt zusätzlich für eine weitere Reduzierung der Maximalwerte. Speziell bei der Zugfestigkeit nähern sich die Kennwerte in Längs- und Querrichtung stark an. Vernadelungsdichten bis zu  $20 \text{ E/cm}^2$  beeinflussen die mechanischen Eigenschaften dagegen kaum.

### 5.2.3 Vergleich unterschiedlicher Matrixmaterialien

Für thermoplastische Organobleche kommen verschiedene Matrixmaterialien in Frage. In Abbildung 13 werden die ermittelten Zugfestigkeiten und E-Modul-Werte der thermoplastischen Matrixvarianten PA6, PBT und PP gegenübergestellt. Für die Organoblech-Herstellung wurde das Matrixmaterial in Form von Meltblownvliesen mit längsgelegten RCF-Vliesen geschichtet. Daraus resultiert die deutlich zu erkennende Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften. Zum Vergleich sind in Abbildung 13 zusätzlich die mechanischen Kennwerte eingetragen, die mit einer duroplastischen Matrix (hier Epoxidharz) erreicht werden.

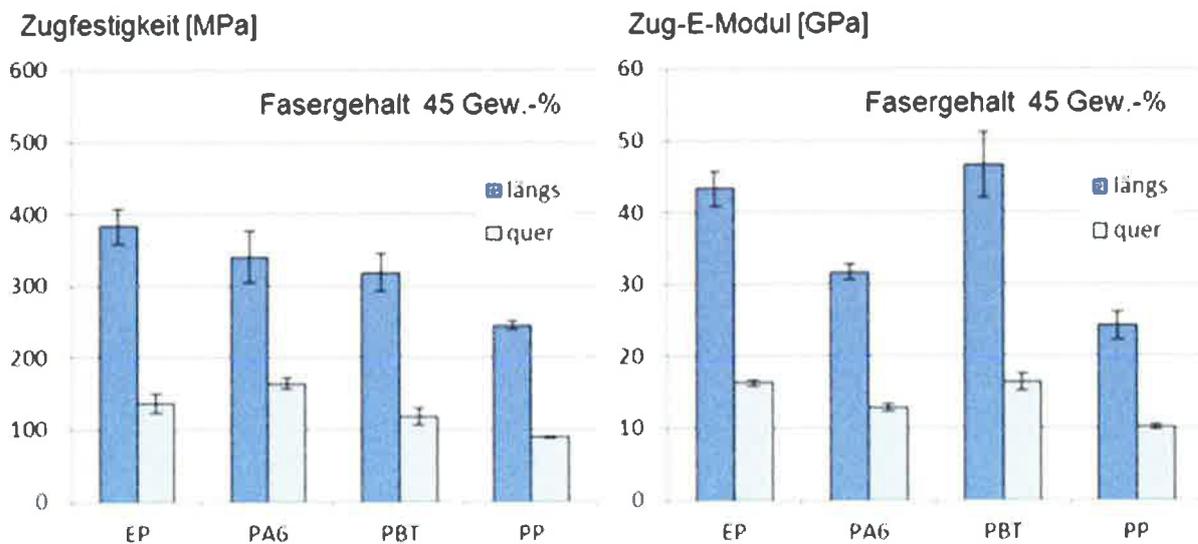


Abb. 13: Eigenschaften von RCF-Organoblechen mit verschiedenen Matrixmaterialien (Meltblown)

Die höchsten Festigkeiten und Steifigkeiten unter den thermoplastischen Organoblechen wurden mit PA6- und PBT-Matrix erzielt. Das Kennwertenniveau liegt bei diesen Organoblechen im Bereich der Referenzwerte von duroplastischen Verbunden mit EP-Harzmatrix. Das deutet auf eine gute Faser-Matrix-Haftung hin, obwohl die Schlichte auf den recycelten Carbonfasern für Anwendungen in Epoxidharzverbunden optimiert

wurde. Deutlich niedrigere mechanische Eigenschaften resultieren bei Einsatz von PP. Offenbar ist bei Polyolefinen die Faser-Matrix-Haftung zu Carbonfasern erheblich schlechter. Eine verbesserte Anbindung der recycelten Carbonfasern an die Polyolefinmatrix lässt sich durch Zusatz von Haftvermittler auf Basis von Maleinsäureanhydrid erreichen (Vergleich Abbildung 6). Die dargestellten Werte der PP-Varianten wurden an Verbunden ohne Haftvermittler ermittelt.

Die Ergebnisse aus dem Schlagbiegeversuch nach Charpy an ungekerbten Proben mit einem Carbonfasergehalt von ca. 40 ma% sind in Abbildung 14 dargestellt. Mit dem Matrixmaterial PP (ohne Haftvermittler) werden die höchsten Zähigkeitswerte erzielt.

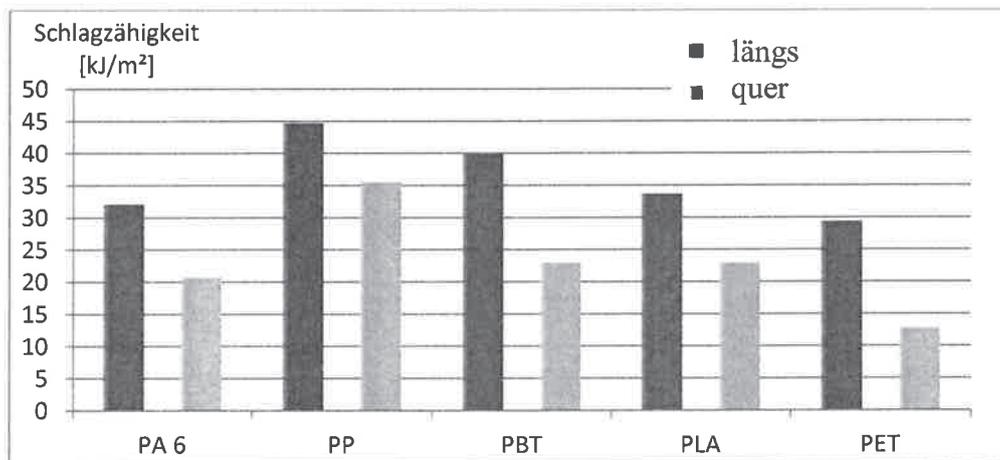


Abb. 14: Ergebnisse aus dem Schlagbiegeversuch

### 5.2.4 Umformverhalten von Organoblechen

Das Umformverhalten der Organobleche aus Stapelfasern ist im Vergleich zu Organoblechen aus Gewebe- und Gelegestrukturen sehr gut. Bedingt durch die endliche Faserlänge und homogene Faserablage bilden sich beim Verpressen von 3-D-Konturen weder Löcher noch Falten. Es können höhere Umformgrade dargestellt werden, als bei Verwendung von endlosen Verstärkungsfasern. (Bei Organoblechen aus Gewebe- oder Gelegestrukturen kann es zur Verschiebung ganzer Faserstränge kommen.)

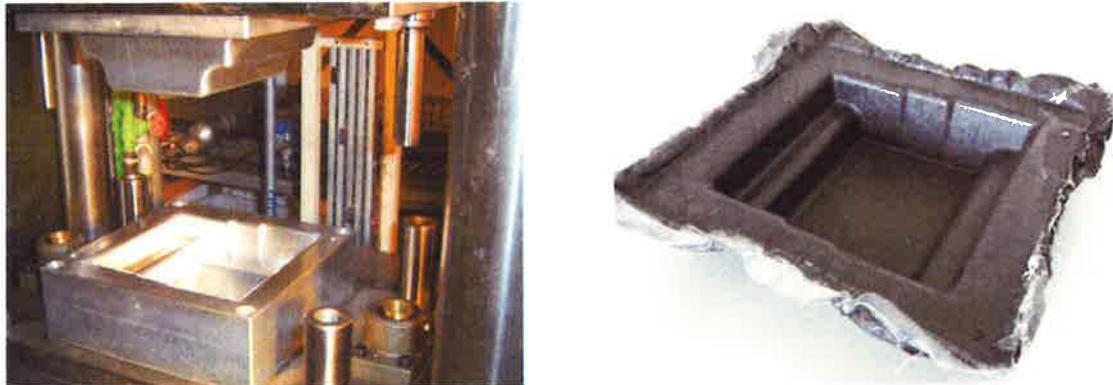


Abb. 15: Umformwerkzeug und Musterbauteil aus RCF/PP-Organoblech

Zur praxisnahen Prüfung wurden Demonstrationsbauteile mit verschiedenen Radien und Entformungsschrägen hergestellt. Im TITK stehen dazu 2 unterschiedliche Werkzeuge zur Verfügung. Abbildung 15 zeigt ein Musterbauteil mit den Abmessungen von etwa 30 x 30 cm. In Abbildung 16 und 17 ist ein Musterbauteil von etwa 80 x 40 cm zu sehen.

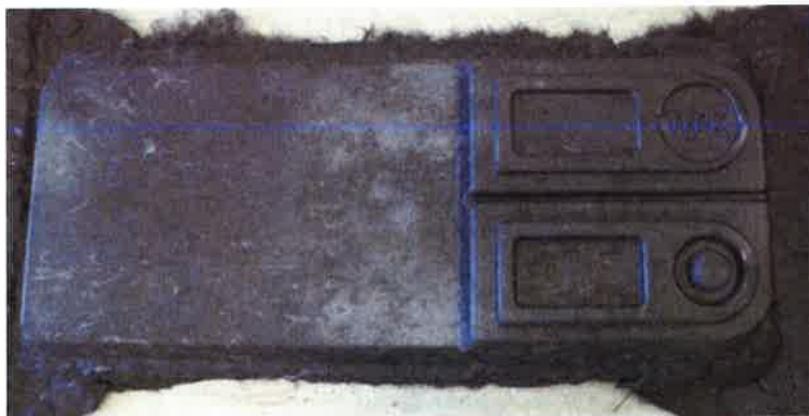


Abb. 16: Musterbauteil (ohne Randbeschnitt)



Abb. 17: Ausschnitt eines Musterbauteils

Für die Bauteilherstellung können entweder die Vlies-Halbzeuge direkt in einer Werkzeugform verpresst werden, dabei gewährleisten die endlichen Längen der Verstärkungsfasern und Matrixfasern bereits im nicht erwärmten Zustand eine gute Drapierfähigkeit, oder es werden vorkonsolidierte Organobleche verwendet, welche aufgeheizt und anschließend umgeformt werden.

Zur Vermeidung von großen Wandstärkendifferenzen bei sehr hohen Umformgraden oder zur Ausbildung von dickeren Bauteilbereichen können bei Verwendung von Mischvliesen lokal zusätzliche Halbzeugzuschnitte in die Werkzeugform eingelegt werden. Bei den Musterbauteilen aus Abbildung 15, 16 und 17 ist dies nicht notwendig gewesen.

## 6 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojektes war die Entwicklung von Stapelfaser-Halbzeugen aus endlich langen Hochleistungsverstärkungsfasern, wie sie beispielsweise in Recyclingprozessen anfallen. Die Halbzeuge sollen sich dadurch auszeichnen, dass sie eine Faserorientierung aufweisen, eine gute Haftung zur thermoplastischen Polymermatrix ausbilden und ein optimales Verarbeitungsverhalten im nachfolgenden, thermischen Umformprozess zeigen.

Zur Erreichung der Forschungsziele wurden recycelte Carbonfasern endlicher Länge mit Hilfe unterschiedliche Herstellungstechnologien zu Vliesen verarbeitet. Dabei stellte sich heraus, dass eine hohe Faserorientierung nur durch die Abwandlung bestehender Vliesherstellungsverfahren zu erreichen ist. Das neu entwickelte Verfahren „Längslegen“ basiert auf einem konventionellen Krempelprozess von Stapelfasern. Die dabei erzeugten Florlagen werden in ihrer Ausrichtung unverändert übereinander gelegt. Dabei wird eine deutlich höhere Orientierung der Fasern erzeugt, als mit dem üblicherweise anschließenden Prozessschritt des Quertäfelns.

Durch die hohe Orientierung der Verstärkungsfasern in längsgelegten Vliesen besitzen die daraus hergestellte Organobleche die höchsten mechanischen Kennwerte. Mit PA6 oder PBT als Matrixwerkstoff sind E-Modul-Werte von 35 bis 45 GPa und Festigkeiten über 300 MPa realisierbar. Die Kennwerte von verpressten RCF-Vliesen mit duroplastischer Matrix liegen auf demselben Niveau. Für hohe Festigkeits- und Steifigkeitswerte mit PP-Matrix sind Haftvermittler wie Maleinsäureanhydrid erforderlich. Ein Gehalt an Verstärkungsfasern von 40-45 ma% hat sich als optimal erwiesen. Höhere Fasergehalte führen durch den Anstieg des Porengehaltes zu niedrigeren mechanischen Kennwerten.

Bei der Herstellung von quergelegten Vliesen lassen sich deutlich höhere Flächenmassen erzeugen. Die maximal erreichbaren mechanischen Kennwerte fallen aufgrund der schwächeren Faserorientierung allerdings geringer aus.

In aerodynamisch gelegten Vliesen liegen die Fasern wirt verteilt vor und besitzen keine Vorzugsorientierung. Der große Vorteil des Verfahrens liegt in der schnellen Herstellung von hohen Flächenmassen. Daher ist das Verfahren kostengünstiger.

Nassvliese besitzen eine sehr homogene Faserverteilung. Da herstellungsbedingt allerdings nur kurze Fasern zum Einsatz kommen können, fallen die mechanischen Kennwerte Zugfestigkeit und E-Modul am niedrigsten aus. Die Schlagzähigkeit der aus Nassvliesen hergestellten Organobleche ist allerdings am höchsten.

Insgesamt besitzen sowohl die Stapelfaser-Halbzeuge als auch die daraus hergestellten Organobleche ein gutes Umformverhalten. Bei der Bauteilherstellung sind höhere Umformgrade realisierbar als mit Gewebe- oder Gelegeverstärkten Organoblechen.

## 7 Wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse, aktualisierter Verwertungsplan

### 7.1 Zielmärkte und Wettbewerbssituation

Seit einigen Jahren ist Leichtbau in aller Munde. Verstand man in den ersten Jahren unter Leichtbau die Substitution von Stahlbauteilen durch innovative Aluminium- und Magnesiumwerkstoffe, wird heute auch der Einsatz faserverstärkter Kunststoffe mit Leichtbaulösungen verbunden. Auf Grund der aktuellen Situation bezüglich

- immer knapper werdender fossiler Energieträger und
- der Forderung nach Reduzierung des weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes zur Eindämmung der globalen Erwärmung

bestehen weltweit Forschungsaktivitäten hinsichtlich der Nutzung effizienter und umweltschonender Technologien. Hochleistungsfaserverstärkte Kunststoffe spielen eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung von Leichtbaulösungen; können doch mit ihnen 50 % Gewichtseinsparung gegenüber herkömmlicher Stahlbauweise bei gleichzeitiger Erhöhung der Crashesicherheit um den Faktor 1,5 erreicht werden [10]. Dementsprechend spielen Kohlefasern eine revolutionäre Rolle im **automobilen Leichtbau**, denn nur durch eine deutliche Gewichtsreduzierung kann der Aktionsradius der neuen, elektrisch betriebenen Fahrzeuggenerationen entsprechend erweitert werden [11] bzw. sind deutliche Reduzierungen des Kraftstoffverbrauchs realisierbar. Abbildung 18 zeigt eine mögliche Werkstoffverteilung bei konsequenter Leichtbauweise im Automobilbereich. Zu beachten ist der hohe Anteil an CFK von 38 %.



Abb. 18: Werkstoffverteilung bei Anwendung konsequenter Leichtbauweise [12]

Das Interesse vieler Automobilhersteller an zukunftsweisenden Kohlefasertechnologien ist groß, wie die Bildung folgender Kooperationen belegt:

- 2009 - Joint Venture von SGL Group und BMW Group [13]
- 2010 – Neues Karbonfaserwerk in den USA durch SGL und BMW [14]
- 2011 - VW Aktienbeteiligung an SGL Carbon [15]
- 2011 – Joint Venture von Daimler und dem Carbonfaserhersteller Toray [16]

In der **Flugzeugindustrie** steigen die Anteile faserverstärkter Strukturen rasant an. Aktuelle Beispiele sind der Dreamliner von Boeing und der A380 von Airbus. Im **Schiffsbau** als weiteren großen Markt dominieren zunehmend Leichtbaustrukturen. Dies betrifft sowohl die großen Handels- und Passagierschiffe als auch die Bereiche des Sportboote- und Jachtbaus. Im Bereich der **Windenergie** geht der Trend zu immer größeren Rotordurchmessern, die ohne den Einsatz der Hochleistungsfaser Carbon nicht realisierbar sind [11].

Insgesamt wird auch weiterhin von einem rasanten Wachstum des CFK-Marktes ausgegangen [17]. Die prognostizierte, erfolgreiche Serienfertigung setzt die Lösung der nachfolgend beschriebenen Diskrepanzen voraus.

Die hohen Rohstoffkosten der primären Verstärkungskomponente Kohlenstofffaser sowie die hohen Verarbeitungskosten und Abfallraten erklären den derzeitigen Einsatz im Hochpreissegment. Eine breite Akzeptanz der neuen Werkstoffgruppe wird nur gelingen, wenn durch effizientere Technologien die Herstellungskosten gesenkt werden und eine Amortisierung über die Gesamtlebenszeit des Bauteils bzw. der einzelnen Komponenten gegeben ist.

Gerade im Zusammenhang mit dem verstärkten Einsatz von CFK in der Automobilindustrie gewinnt das Thema des Faserrecyclings mehr und mehr an Bedeutung. Nach Entwicklung geeigneter Recyclingtechnologien konzentrieren sich die Entwicklungsarbeiten aktuell vor allem auf den Wiedereinsatz der recycelten Carbonfasern bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen. Gerichtete Vliese aus recycelten Carbonfasern kommen bereits bei der Herstellung von Serienbauteilen für den BMW i3 zum Einsatz (Abbildungen 19 und 20). Dabei werden aktuell duroplastische Matrixmaterialien verwendet.



Abb. 19: CFK-Dach für den BMW i3 [18]



Abb. 20: Sitzstruktur für den BMW i3 [18]

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass sich recycelte Carbonfasern auch sehr gut zur Herstellung von Organoblechen mit thermoplastischer Matrix eignen. In einem ersten Schritt ist jedoch zunächst die Fertigung von textilen Halbzeugen aus Stapelfasern notwendig. Gut geeignete Verfahren für eine direkte Weiterverarbeitung von recycelten Carbonfasern sind die Vliesherstellung durch Krempeln und die aerodynamische Vlieslegung. Durch Zumischung von thermoplastischen Fasern im Vliesbildungsprozess können Halbzeuge mit verschiedenen Kunststoffen hergestellt werden. Es ist aber auch möglich, das Matrixmaterial über Folien oder durch Schmelzeimprägnierung später in den Verbund einzubringen.

Die mit RCF-Organoblechen erreichbaren mechanischen Eigenschaften liegen bei PA6- und PBT-Matrix auf einem vergleichbaren Niveau wie bei Epoxidharzverbunden. Die Herstellung von leichten, mechanisch belastbaren Bauteilstrukturen ist somit gegeben. Bei Verbunden mit PP-Matrix ist eine Optimierung der Faser-Matrix-Haftung durch die Verwendung von Haftvermittlern möglich. Das Eigenschaftsprofil der entwickelten Organobleche mit Recycling-Carbonfasern liegt zwischen Organoblechen mit endlosen Fasern (Gewebe- oder Gelegestrukturen) und glasmattenverstärkten Thermoplasten (GMT).

Das Umformverhalten der thermoplastischen Organobleche aus recycelten Carbonfasern ist sehr gut und ermöglicht die Herstellung von komplizierten 3-D-Konturen. Das eröffnet interessante Anwendungsmöglichkeiten in der Automobilindustrie vor allem auch in Kombination mit Spritzgießprozessen. Ein großer Vorteil bei der Verwendung von thermoplastischen Matrixsystemen ist die erneute Recyclingfähigkeit des Verbundwerkstoffes, beispielsweise für die Herstellung von Spritzgussgranulaten.

Die entwickelten Vlieshalbzeuge mit Recycling-Carbonfasern eignen sich ebenfalls zur Herstellung von Sandwichstrukturen. Die Ergebnisse von aktuell laufenden Entwicklungsarbeiten sind vielversprechend. Insbesondere die Substitution von bisher verwendeten Glasfaservliesen führt zu deutlich steiferen Sandwichstrukturen. Eine Reduzierung der Deckschicht-Dicken mit dem Ziel vergleichbarer Eigenschaften wie bei konventionellen Sandwichstrukturen bietet ein hohes Leichtbaupotential. Mögliche Anwendungen im Automobilbereich reichen von Unterbodenverkleidungen bis hin zu mechanisch höherbelasteten Strukturanwendungen.

## 7.2 Charakterisierung der Marktgröße und des angestrebten Anteils

Im Jahr 2013 betrug das weltweite Produktionsvolumen an Carbonfasern 48.000 t [17]. Bei jährlichen Steigerungsraten von über 13 % wird für das Jahr 2020 eine Zunahme des Produktionsvolumens auf insgesamt 130.000 t Carbonfasern prognostiziert. Der Carbonfasermarkt unterteilt sich in die Hauptbereiche: Windkraftanlagen, Luft- und Raumfahrt (inklusive militärische Anwendungen) sowie Sport- und Freizeit. Der

Automobilmarkt ist aktuell noch recht klein, besitzt allerdings eines der höchsten Wachstumspotentiale. Großserienanwendungen wie die BMW-i Modelle bestätigen diese Entwicklung.

Geht man davon aus, dass auf dem Weg von der Carbonfaser bis zum fertigen Bauteil etwa 20 % Abfälle entstehen, entspricht das aktuell einer weltweiten Menge von etwa 10.000 t pro Jahr. In [19] wird die Zusammensetzung der Abfälle wie folgt charakterisiert:

- Gewebeprepregs (62%)
- UD-Gelegeprepregs (11%)
- CFK-Fertigungsabfälle (4%)
- Faserabfälle (8%)
- Webkantenverschnitt (15%)

Somit besteht der Hauptanteil (96%) aus textilartigen Abfällen, die mit dem im TITK entwickelten Mühlenrecyclingverfahren zu langen, krepelbaren Recyclingfasern aufbereitet werden können. Durch den erwarteten Anstieg bei der Carbonfaserherstellung gewinnen das Faserrecycling sowie die hochwertige Wiederverwertung der Fasern zunehmend an Bedeutung.

Gegenwärtig wird der Hauptteil der Carbonfasern zu Faserverbundwerkstoffen mit duroplastischer Matrix verarbeitet. Wie Literaturrecherchen zeigen, geht der Entwicklungstrend zunehmend in Richtung thermoplastischer Matrices, die gegenüber den Duroplasten den Vorteil einer sehr guten stofflichen Recycelbarkeit bei gleichzeitig verbessertem Crashverhalten aufweisen. Bisher ist die Marktverfügbarkeit solcher thermoplastischen CFK-Halbzeuge relativ gering. Im Folgenden werden aktuelle Produkte aufgeführt:

- Organobleche (z.B. CF-Gewebe/ PA6-Matrix) [20]
- Organofolien
- CF-Mattenverstärktes Thermoplast (isotrop)
- PA6 CF 10%- Spritzgießgranulat
- PP/ CF-LFT

Die im Projekt entwickelten Produkte aus RCF-Stapelfasern sind bezüglich ihres Verstärkungspotentials von thermoplastischen Kunststoffen neuartig, insbesondere durch die ausgeprägte Faserorientierung der endlichen Verstärkungsfasern. Bisher sind keine direkten Konkurrenzprodukte bekannt. Das Eigenschaftsprofil der innovativen Halbzeuge wie auch ihrer CFK-Bauteile liegt zwischen thermoplastischen Carbonfaser-Prepregs (gewebe- oder gelegeverstärkte Organobleche) und isotrop verteilten carbonfaserhaltigen, mattenverstärkten Thermoplasten, wobei letztgenannte FVK am

Markt bisher kaum vertreten sind. Das bedeutet, dass für solche Produkte ein Absatzmarkt entwickelt werden muss. Im Laufe des Projektes wurden bereits Industriepartner mit den neuartigen Halbzeugen beliefert, um Verarbeitungsversuche durchführen zu können. Nach erfolgreicher Herstellung von Musterbauteilen ist die Einführung der neuentwickelten Halbzeuge für erste Kleinserien vorstellbar.

### 7.3 Erzeugniskalkulation (Abschätzung)

Für die entwickelten RCF-Stapelfaser-Halbzeuge werden folgende Preise für ein Halbzeug mit 45 ma% Fasergehalt abgeschätzt:

Tabelle 3: Vergleich der Halbzeugkosten mit Primärfasern und Recyclingfasern

	Primärfasereinsatz	Recyclingfasereinsatz
Faserstoffpreis	20 €/kg	< 5 €/kg
Matrixmaterial	1,30 €/kg (PP), 2,10 €/kg (PA6)	1,30 €/kg (PP), 2,10 €/kg (PA6)
Faseraufbereitung/ Halbzeugherstellung	7 €/kg	< 5 €/kg
Gesamt Halbzeug	≈ 17 €/kg	≈ 8 €/kg

Welche Produktpreise letztendlich am Markt realisiert werden können, hängt maßgebend von den erreichbaren Verstärkungseffekten dieser neuartigen Mattenstrukturen wie auch von eventuell realisierbaren Anlagenkapazitäten für Recycling/Mattenfertigung, des Marktaufkommens und der Preise für Hochleistungsfaserabfälle, von aktuellen Abfallentsorgungskosten sowie wirtschaftlichen Zwängen der Kostenoptimierung und politischen Situation einer praktizierten Nachhaltigkeit von Produkten ab. Der Endpreis wird, wie in allen Systemen der nationalen Ökonomie durch die "Grenznutzentheorie" bestimmt. Diesbezüglich stehen die Strategien von Umwelt- und Klimaschutz, Nachhaltigkeit, Elektromobilität und Leichtbau im Einklang mit den Konsumenteninteressen für eine Vermarktung der Ergebnisse mit hohem Gewinnpotential.

### 7.4 Vertriebs- und Transferstrategie

Auf Grund des aktuell starken Interesses an Leichtbau-Konzepten ist in den kommenden Jahren mit einer rasanten Zunahme an CFK-Produkten zu rechnen. Die kohlenstofffaser-verarbeitende Industrie arbeitet intensiv an der Realisierung einer verbesserten Wertschöpfungskette der kostenintensiven Faser. Die Lösung dieser

Herausforderung ist für die CFK-Produzenten von entscheidender Bedeutung, denn nur so kann dem Kostendruck des Marktes entgegen getreten und eine breite Marktakzeptanz erzielt werden.

Das TITK als wirtschaftsnahe Forschungseinrichtung macht die Forschungsergebnisse öffentlich geförderter Projekte grundsätzlich durch Veröffentlichungen, Vorträge und seine vielfältigen Industriekontakte bekannt.

Der Ergebnistransfer soll durch folgende Maßnahmen erfolgen:

- Veröffentlichungen in Fachzeitschriften der Kunststoffbranche und Leichtbaubranche
- Vorträge auf international bekannten Tagungen
- Präsentationen im Technikum des TITK
- Kurzveröffentlichungen auf der Internetseite des TITK
- Vorstellung von Informationsmaterial und Demonstrationsbauteilen auf Fachmessen

Ein direkter Transfer der Forschungsergebnisse ist vor allem durch die enge Zusammenarbeit mit namhaften Industriepartnern (SGL Carbon GmbH, Schott Meissner Maschinen- und Anlagenbau GmbH) bereits während der Projektbearbeitung sichergestellt. Somit ist es möglich, die wissenschaftlichen Ergebnisse, das zunehmende Know-how der Werkstoff- und Prozessentwicklung auf dem Gebiet Leichtbau zeitnah in die industrielle Praxis zu überführen.

## 7.5 Einschätzung der Markteintrittschancen

An der Herausforderung des Recyclings von Abfällen aus der CFK-Produktion in Kombination mit einer höchstmöglichen Wiederverwertung wird gegenwärtig verstärkt gearbeitet. Aktuell werden für Carbonfaserabfälle technologische Strategien und technische Verarbeitungslinien zur hochwertigen Wiederverwertung eingeführt. Solche Abfallwiederverwertungslinien können in einer Reihe von Produkten darüber entscheiden, ob solche vorteilhaften Leichtbaustrukturen auf Basis von Faserverbundwerkstoffen wirtschaftlich zum Großserieneinsatz gebracht werden können.

Das F&E-Projekt wurde so konzipiert, dass die Ergebnisse für sehr unterschiedliche Zielgruppen in der Industrie potenziell nutzbar sind. Dies beginnt beim kleinen und mittelständischen Recycler, geht über die Mattenhersteller und Abfallverwerter bis hin zur Großindustrie in Automobilbau, Flugzeugfertigung, Windenergieanlagenbau bis hin zum Schiffs- und Bootsbau.

Insgesamt werden die Markteintrittschancen für das neue Verfahren und die daraus resultierenden innovativen RCF-Stapelfaser-Halbzeuge als sehr erfolgversprechend angesehen, da in den verschiedenen Industriezweigen, insbesondere im Bereich der Automobilherstellung, das erforderliche Equipment zur Weiterverarbeitung der neuen Produkte vorhanden ist.

Letztendlich hängen die Erfolgsaussichten auch von der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, den zukünftigen Unternehmensstrategien und den politischen Rahmenbedingungen ab.

## 7.6 Quantitative Einschätzung der zu erwartenden wirtschaftlichen Effekte

Eine quantitative Abschätzung der zu erwartenden internen und externen, wirtschaftlichen Effekte kann nur auf Grundlage der aktuellen wirtschaftlichen Situation erfolgen. Faktoren, welche sich aus einer möglichen Änderung der äußeren Rahmenbedingungen (Finanz- und Wirtschaftsmarktentwicklung, Unternehmenspolitik etc.) ergeben, können keine Berücksichtigung finden.

Folgende wirtschaftlichen Effekte bezüglich des konzipierten Projektes werden aus Sicht des TITKs erwartet:

Aktivitäten	erwartete wirtschaftlichen Effekte [k€] im Jahr nach Projektende				
	1	2	3	4	5
Eigene Umsätze aus Aufbereitung und Halbzeugfertigung	50	60			
F&E-Leistungen	50	100	100	100	100
Umsätze aus Aufbereitung und Halbzeugfertigung bei Anwendern	20	100	500	500	500
Lizeneinnahmen	Gegenwärtig nicht abschätzbar				
Kosteneinsparung	Gegenwärtig nicht abschätzbar				
Kosteneinsparungen bei Anwendern nach Art und Umfang	20	30	50	50	50
○ Rohstoffkosten	Gegenwärtig nicht abschätzbar, sehr hoch				
○ Energiekosten (beim Verfahren und durch Leichtbauteile)	Gegenwärtig nicht abschätzbar, sehr hoch				
○ Umwelteffekte durch Leichtbau, Ressourcenschonung, Abfallverwertung und Energieeinsparung	Gegenwärtig nicht abschätzbar, sehr hoch				

Die im Projektantrag formulierten wirtschaftlichen Effekte erscheinen weiterhin realistisch.

## 8 Danksagung

Wir danken der EuroNorm GmbH für die finanzielle Förderung des Vorhabens Nr. MF110118 welche als Zuwendung im Rahmen der Forschung und Entwicklung bei Wachstumsträgern in benachteiligten Regionen (INNO-WATT) erfolgte.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Witten, E. Composites in Europa. *Kunststoffe*. 12 2010, S. 18-19.
- [2] N.N. Kunststoffe im Automobilbau der Zukunft. *Konstruktion*. 03 2011, S. 9-11.
- [3] Grünweg, T. Leichtgewicht aus München - BMW Mega City Vehicle. [Online] 02. 07 2010. [Zitat vom: 07. 06 2011.] <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,druck-704072.html>.
- [4] Stock, A. und Hoch, P. Organobleche verlassen Hochpreissegment. *Composites World*. 2011, Februar.
- [5] N.N. Persönliche Mitteilung von SGL Carbon. 2011.
- [6] TU Clausthal, Faserinstitut Bremen. *Organofolien auf Basis rezyclierter Kohlenstofffasern (Organofolien)*. 2008-2010.
- [7] Ortlepp, G. Long carbon fibers from textile wastes. *Chemical fibers International*. 2006, 12.
- [8] Lützkendorf, R. Einsatz von Carbonfasern – neue Ansätze für textile Verarbeiter, 21. Hofer Vliesstofftage, 8. November 2006.
- [9] Röske, M; Reußmann, T.; Lützkendorf, R.: Nassvliese aus Hochleistungsfasern und ihr Potenzial für Verbundwerkstoffe, *Technische Textilien* 4/2008, S.188-189.
- [10] Stewart, R. Carbon fibre composites poised for dramatic growth. *Reinforced plastics*. 2009, Bde. p. 16-21, May.
- [11] Stauber, R. Leichtbau für das Automobil von morgen. [Online] 06. 04 2011. [Zitat vom: 15. 06 2011.] [http://www.vdi.de/6390.0.html?&tx\\_ttnews\[tt\\_news\]=53551&cHash=8154b8c20266c030a9e0fa58a0d5bde1](http://www.vdi.de/6390.0.html?&tx_ttnews[tt_news]=53551&cHash=8154b8c20266c030a9e0fa58a0d5bde1).
- [12] Dröder, D.; Moede, M.: Leichtbaustrategien für zukünftige Fahrzeuggenerationen Automobilindustrie 03/2010, s.24-27.
- [13] Schröder, C. BMW-Group-gruendet-Joint-Venture-mit-SGL-Group. [Online] 29. 10 2009. [Zitat vom: 06. 07 2011.] <http://www.atonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/10785/BMW-Group-gruendet-Joint-Venture-mit-SGL-Group.html>.

- [14] SGL Group und BMW Group: Neues Carbonfaserwerk wird in Moses Lake / USA errichtet . [Online] 06. 04 2010. [Zitat vom: 07. 06 2011.] <http://www.7-forum.com/news/news/SGL-Group-BMW-Group-Neues-Carbonfaserwe-3252.html>.
- [15] Reuters. VW wird zweitgrößter Aktionär bei SGL. [Online] 28. 02 2011. [Zitat vom: 06. 07 2011.] <http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/vw-wird-zweitgroesster-aktionaer-bei-sgl/3893692.html>.
- [16] *Daimler und Toray gründen Joint Venture für Leichtbau-Automobilteile*. N.N. 02, lightweight design : s.n., 2011, Bd. p. 9.
- [17] Schuster, A. Der CFK-Markt 2009/2010. [Buchverf.] E. Witten. *Composites-Marktbericht: Marktentwicklungen, Herausforderungen und Chancen*. Frankfurt/Main : AVK-VK, 2010, S. 15-24.
- [18] Witten E.; Jahn B.: Composites-Marktbericht 2013, Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., Carbon Composites e.V.
- [19] *Launching the carbon fiber recycling industry*. McConnell, V.P. March/April 2010, Reinforced Plastics, S. 33-37.
- [20] N.N. Bond laminates GmbH. [Online] [www.bond-laminates.com](http://www.bond-laminates.com)

**Reg.-Nr.:** MF110118  
**Kurztitel:** Thermoformbare hochleistungsverstärkte Halbzeuge  
**Laufzeit:** 01.01.2012 - 31.12.2013

Name und Anschrift des Zuwendungsempfängers

Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V.  
Breitscheidstraße 97  
07407 Rudolstadt

Kurzfassung (Zielstellung, technische und wirtschaftliche Ergebnisse)

Ziel des Forschungsprojektes war die Entwicklung von Stapelfaser-Halbzeugen aus endlich langen Hochleistungsverstärkungsfasern, wie sie beispielsweise in Recyclingprozessen anfallen. Die Halbzeuge sollen sich dadurch auszeichnen, dass sie eine Faserorientierung aufweisen, eine gute Haftung zur thermoplastischen Polymermatrix ausbilden und ein optimales Verarbeitungsverhalten im nachfolgenden, thermischen Umformprozess zeigen.

Zur Erreichung der Forschungsziele wurden recycelte Carbonfasern endlicher Länge mit Hilfe unterschiedliche Herstellungstechnologien zu Vliesen verarbeitet. Dabei stellte sich heraus, dass eine hohe Faserorientierung nur durch die Abwandlung bestehender Vliesherstellungsverfahren zu erreichen ist. Das neu entwickelte Verfahren „Längslegen“ basiert auf einem konventionellen Krempelprozess von Stapelfasern. Die dabei erzeugten Flirlagen werden in ihrer Ausrichtung unverändert übereinander gelegt. Dabei wird eine deutlich höhere Orientierung der Fasern erzeugt, als mit dem üblicherweise anschließenden Prozessschritt des Quertäfelns.

Durch die hohe Orientierung der Verstärkungsfasern in längsgelegten Vliesen besitzen die daraus hergestellte Organobleche die höchsten mechanischen Kennwerte. Mit PA6 oder PBT als Matrixwerkstoff sind E-Modul-Werte von 35 bis 45 GPa und Festigkeiten über 300 MPa realisierbar. Die Kennwerte von verpressten RCF-Vliesen mit duroplastischer Matrix liegen auf demselben Niveau. Für hohe Festigkeits- und Steifigkeitswerte mit PP-Matrix sind Haftvermittler wie Maleinsäureanhydrid erforderlich. Ein Gehalt an Verstärkungsfasern von 40-45 ma% hat sich als optimal erwiesen. Höhere Fasergehalte führen durch den Anstieg des Porengehaltes zu niedrigeren mechanischen Kennwerten.

Bei der Herstellung von quergelegten Vliesen lassen sich deutlich höhere Flächenmassen erzeugen. Die maximal erreichbaren mechanischen Kennwerte fallen aufgrund der schwächeren Faserorientierung allerdings geringer aus.

In aerodynamisch gelegten Vliesen liegen die Fasern wirt verteilt vor und besitzen keine Vorzugsorientierung. Der große Vorteil des Verfahrens liegt in der schnellen Herstellung von hohen Flächenmassen. Daher ist das Verfahren kostengünstiger.

Nassvliese besitzen eine sehr homogene Faserverteilung. Da herstellungsbedingt allerdings nur kurze Fasern zum Einsatz kommen können, fallen die mechanischen Kennwerte Zugfestigkeit und E-Modul am niedrigsten aus. Die Schlagzähigkeit der aus Nassvliesen hergestellten Organobleche ist allerdings am höchsten.

Insgesamt besitzen sowohl die Stapelfaser-Halbzeuge als auch die daraus hergestellten Organobleche ein gutes Umformverhalten. Bei der Bauteilherstellung sind höhere Umformgrade realisierbar als mit Gewebe- oder Gelegeverstärkten Organoblechen.

Aus dem geförderten Projekt ergaben sich Kundenaufträge, die sich mit der Entwicklung und insbesondere der Verarbeitbarkeit der neuen thermoplastischen Organobleche bzw. deren Halbzeuge beschäftigen. Weiterführende Untersuchungen zur Verwendung der Halbzeuge in Sandwichstrukturen werden ebenfalls mit Industriepartnern durchgeführt.

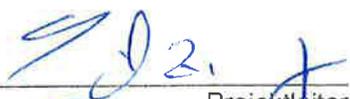
Veröffentlichungen

In Arbeit (in Zeitschriften der Kunststoffbranche)

Patentanmeldungen

keine

30.06.2014  
Datum

  
Projektleiter  
  
Thüringisches Institut für  
Textil- und Kunststoff-  
Forschung e.V.  
Breitscheidstraße 97  
07407 Rudolstadt-Schwarz