

Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben

Reg.-Nr.: MF 110086

FuE-Einrichtung: Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V.

Titel: Entwicklung der Verfahrenstechnik zur Direktverarbeitung von carbonfaserverstärkten Thermoplasten im LFT-D-Prozess

Projektlaufzeit: 01.01.2012 bis 31.12.2013

Rudolstadt, den 27.06.2014

Name und Telefonnummer des Projektleiters:

Dr.-Ing. T. Reußmann, Tel. 03672/379310

Firmenstempel

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



Unterschrift des Projektleiters



rechtsverbindliche Unterschrift

Gliederung

I	Einleitung und wissenschaftliche Arbeitsziele	4
II	Darstellung der erzielten Ergebnisse	5
1	Stand der Technik beim CFK-Recycling	5
1.1	Faserrecycling aus Gelege- und Gewebeabfällen	5
1.2	Geeignete Verfahren zur Herstellung von Faservliesen	7
1.3	Prozesse zur Herstellung von Carbonfaserverbunden	8
2	Eingesetzte Anlagentechnik	11
2.1	LFT-D-Anlage	11
2.2	Presse und Werkzeug	12
3	Versuchsmaterialien	13
3.1	Matrixpolymere und Haftvermittler	13
3.2	Verwendete Fasermaterialien	14
4	Werkstoffprüfungen	14
4.1	Faserprüfungen	14
4.2	Verbundprüfungen/Probenahme	15
5	Verbundherstellung im LFT-Direktverfahren	16
5.1	Basisversuche zur Einstellung der Anlage	16
5.1.1	Faseröffnung und Vliesherstellung	16
5.1.2	Faserdosierung an der LFT-D-Anlage	17
5.1.3	Grundeinstellungen und Schlussfolgerungen für die weiteren Versuche	19
5.2	Verbundherstellung mit PP-Matrix	20
5.2.1	Prozessparameter für die Herstellung der PP-Verbunde	20
5.2.2	Übersicht zu den gefertigten PP-Varianten	21
5.3	Verbundherstellung mit PA6-Matrix	21
5.3.1	Prozessparameter für die Herstellung der PA6-Verbunde	21
5.3.2	Übersicht zu den gefertigten Verbunden mit PA6-Matrix	22
6	Eigenschaften der hergestellten Verbundvarianten	23
6.1	Verarbeitungsverhalten im LFT-D-Verfahren	23
6.2	Faserorientierungen im Pressprozess	24
6.3	Ergebnisse aus der Verarbeitung von PP-Verbunden	26
6.3.1	Einfluss der Prozessoptimierung auf die Verbundeigenschaften	26
6.3.2	Effekte der Haftvermittlung	27
6.3.3	Einfluss der Faserorientierungen auf die mechanischen Eigenschaften	30

	3
6.4 Verbundeigenschaften bei Einsatz von PA6-Matrix	32
6.4.1 Einfluss des eingesetzten Haftvermittlers	32
6.4.2 Verbundeigenschaften in Abhängigkeit des Fasergehaltes	33
6.5 Gegenüberstellung der Verbundwerte mit PP- und PA6-Matrix	35
6.6 Eigenschaftsvergleich mit Konkurrenzmaterialien	37
6.7 Herstellung von Demonstrationsbauteilen	39
7 Zusammenfassung	40
III Bewertung der Ergebnisse und Gegenüberstellung mit den Zielsetzungen	41
IV Wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse, aktualisierter Verwertungsplan	43
V Bewertung des aktualisierten Verwertungsplans, Vergleich zum Ursprungskonzept	48
VI Angaben zu Schutzrechten für Vorhabensergebnisse	49
VII Zusammenstellung der erfolgten und geplanten Veröffentlichungen	49
VIII Danksagung	49
IX Literaturverzeichnis	50

I Einleitung und wissenschaftliche Arbeitsziele

Der Einsatz von CFK-Bauteilen wird in der Automobilindustrie aktuell in Verbindung mit der Entwicklung der Elektromobilität und der damit verbundenen Notwendigkeit der Herstellung von Leichtbauteilen stark forciert [1-3]. Im Zusammenhang mit dem zunehmendem Einsatz dieser Werkstoffe stehen aber noch viele Fragen und Probleme im Raum, die nur durch konsequente Weiterentwicklung der Materialien und Fertigungsverfahren gelöst werden können. Wesentliche Defizite bei der Herstellung von Carbonfaserverbunden sind derzeit vor allem die geringe Produktivität und die hohen Kosten bei der Herstellung von CFK-Bauteilen sowie die großen Abfallmengen, die bei der konventionellen Bauteilherstellung mit Gewebe- und Gelegestrukturen anfallen. Außerdem sind die Umformgrade bei Verwendung von Fasergelegen oder Prepregs sehr begrenzt. Auch bei der Fügetechnik zur Verbindung mit anderen Materialien sind noch viele Fragen offen. Diese Umstände verhinderten bisher einen breiteren Einsatz dieser Werkstoffe für Leichtbauanwendungen in der Automobilindustrie. Trotzdem haben CFK-Verbunde durch ihr geringes Gewicht ein enormes Potenzial und werden sich in zunehmendem Maße etablieren. Das trifft vor allem auf thermoplastische CFK-Verbunde zu, die große Vorteile beim Recycling bieten.

Das TITK hat sich bereits intensiv mit der Entwicklung und Optimierung von Verarbeitungsverfahren zur Herstellung von Verbundwerkstoffen und auch dem Recycling von Hochleistungsfasern befasst. Diese Entwicklungen stellen gegenwärtig eine wichtige Basis für die Lösung einiger aktueller Probleme bei der Verarbeitung von Carbonfaserverbunden dar. Insbesondere das Faserrecycling ist eine Schlüsseltechnologie zur wirtschaftlichen Verarbeitung von CFK-Verbunden, da beim Zuschnitt der textilen Halbzeuge (Gelege und Gewebe) 20 bis 30 % der Halbzeuge als Rand- und Konturbeschnitt anfallen. Mit einer im TITK entwickelten modifizierten Mühlentechnik lassen sich die textilen Produktionsabfälle wiederverwerten und lange Fasern rückgewinnen. Das eröffnet neue Wege für eine effizientere Herstellung von CFK-Verbunden unter Verwendung von Carbon-Stapelfasern.

Ein weiterer wichtiger Schritt auf dem Weg der Verwertung von CFK ist die Rückführung der recycelten Fasern bei der Herstellung von Verbundwerkstoffen. Das Recyclingmaterial liegt nach der Rückgewinnung in Form von Stapelfasern mit endlicher Faserlänge vor und muss entweder wieder mit gerichteter Orientierung abgelegt werden oder in einer anderen Form dosierbar aufbereitet werden. In der Kunststoffindustrie können meist nur Halbzeuge (Granulate, Rovings oder textile Flächengebilde) verarbeitet werden. Diese Halbzeuge lassen sich bei Anpassung der Verarbeitungsverfahren mit textilen Techniken erzeugen. Entscheidend ist dabei vor allem, dass die Aufbereitung preiswert und in wenigen Schritten erfolgt, um das Material nicht zu sehr zu verteuern. Für die weitere Verarbeitung zur Herstellung von thermoplastischen Verbunden bieten sich verschiedene Verfahren wie Spritzguss, Extrusion oder der LFT-D-Prozess an. Speziell für die Verarbeitung von langen Verstärkungsfasern ist der LFT-D-Prozess sehr gut geeignet, da er sehr faserschonend ist und die Herstellung von großflächigen Strukturteilen mit Langfaserverstärkung ermöglicht.

Dieses Verfahren wurde schon vor mehr als 10 Jahren für die Herstellung von Glasfaserverbunden bis zur Serienreife entwickelt und kommt derzeit bei der Fertigung von langfaserverstärkten Kunststoffbauteilen zum Einsatz. Für die Verarbeitung von recycelten Carbonfasern im LFT-D-Verfahren gibt es allerdings bisher noch keine fertigen Lösungen.

Im Rahmen des Projektes sollten grundlegende Untersuchungen zur Werkstoff- und Verfahrensentwicklung für die Herstellung von Carbonfaser-Verbundbauteilen durchgeführt werden. Mit dem Forschungsprojekt wurden folgende Schwerpunkte verfolgt:

- Direkte Verarbeitung von Stapelfasern und Produktionsabfällen (Gewebe- und Gelegeabfälle) aus der CFK-Verbundherstellung
- Erhöhung der Produktivität bei der Herstellung von thermoplastischen Carbonfaserverbunden
- Bestimmung des erreichbaren Eigenschaftspotenzials von C-Faserverbunden mit thermoplastischer Matrix
- Durchführung von Untersuchungen zur Faser-Matrix-Haftung
- Optimierung der Prozessbedingungen im LFT-D-Verfahren
- Bestimmung der Fließfähigkeit der faserhaltigen Schmelze
- Nahezu abfallfreie Bauteilherstellung mit Carbonfaserverbunden im LFT-D-Verfahren

Im Ergebnis der Untersuchungen sollte ein optimiertes Verfahren zur direkten Verarbeitung von Carbon-Stapelfasern im LFT-D-Prozess resultieren.

II Darstellung der erzielten Ergebnisse

1 Stand der Technik beim CFK-Recycling

1.1 Faserrecycling aus Gelege- und Gewebeabfällen

Zum Recycling von Carbonfasern und CFK-Verbunden werden aktuell forschungsseitig große Anstrengungen unternommen, da die Problematik mit zunehmenden Mengen an Verbundwerkstoffen an Bedeutung gewinnt. Bisherige Arbeiten konzentrierten sich meist auf die Zerkleinerung (Vermahlung) von Faser- und Verbundabfällen, um daraus Füllstoffe zur Modifizierung der Steifigkeit und bei einigen Anwendungen auch der Leitfähigkeit zu gewinnen. Das ist allerdings eine Verwertung auf sehr niedrigem Niveau.

Zur Rückgewinnung von langen Fasern wurden sowohl von Forschungseinrichtungen als auch seitens der Industrie einige Lösungen erarbeitet, die eine Verwertung auf höherem Wertenniveau ermöglichen [4-7] sollen. Für den Wiedereinsatz der recycelten Fasern wurde bisher vor allem die Herstellung von Halbzeugen wie Organoblechen favorisiert. Eine direkte Verarbeitung von recycelten Stapelfasern in einem LFT-D-Prozess ist noch nicht bekannt.

Das TITK hat sich in den letzten Jahren ebenfalls intensiv mit dem Recycling von Hochleistungsfasern sowie der Entwicklung und Optimierung von Verarbeitungsverfahren zur Herstellung von Verbundwerkstoffen aus recycelten Carbonfasern befasst [8, 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 (Abbildungen 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 für einen Wiedereinsatz in Verbundwerkstoffen zur Verfügung.

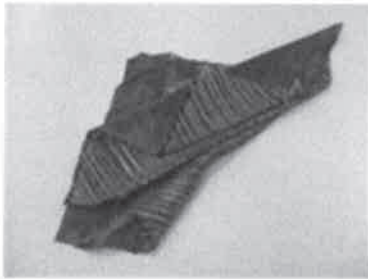


Abb. 1: Gelegeabfälle



Abb. 2: Gelegechips



Abb. 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 zum Einsatz. Die mechanischen Eigenschaften der einmal recycelten Carbonfasern liegen in einem Bereich von 85-90% der Eigenschaften von Primärware und ermöglichen einen hochwertigen Wiedereinsatz bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen.

1.2 Geeignete Verfahren zur Herstellung von Faservliesen

Ein wichtiger Schritt zur Wiederverwertung von recycelten Carbonfasern ist die Herstellung von textilen Halbzeugen für die Verbundfertigung. Je nach Faserlänge der recycelten Carbonfasern eignen sich verschiedene Vliesbildungsverfahren wie:

- ✓ Nassvliesherstellung (Faserlängen 3-10 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 Prozesse für die Verarbeitung von recycelten Carbonfasern testen. Zu beachten ist, 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/m². In Mischungen mit thermoplastischen Fasern eignet sich die Nassvliesherstellung auch für die Herstellung von Organoblechen. Durch die starke Zerkleinerung des Recyclingmaterials und die erforderliche Trocknung der Vliese ist die Aufbereitung 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. 100-200 g/m² und gerichteter Faserorientierung herstellen. Das kann sowohl mit 100% Carbonfasern als auch mit Mischungen aus Carbonfasern und thermoplastischen Fasern erfolgen. Gerichtete Vliese aus recycelten Carbonfasern kommen bereits bei der Herstellung von Serienbauteilen für den BMW i3 zum Einsatz (Abbildungen 4 und 5). Durch das Täfeln (Vervielfachen) des Faserflors sind mit der Krempel auch schwere Vliese herstellbar, die im LFT-D-Prozess weiterverarbeitet werden können.



Abb. 4: CFK-Dach für den BMW i3 [10]



Abb. 5: Sitzstruktur für den BMW i3 [10]

Aerodynamisch gelegte Vliese haben meist eine weniger ausgeprägte Faserorientierung als gekrempelte Vliese, da die Vliesbildung durch Luft unterstützt wird und keine intensive Faseröffnung vorgesehen ist. Dadurch wird das Fasermaterial weniger mechanisch beansprucht, was vorteilhaft für die sehr bruchempfindlichen Carbonfasern ist. Allerdings sind in der Regel die Fasermischungen 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/m². Diese Vliese eignen sich ebenfalls für den Einsatz in kunststoffverarbeitenden Prozessen wie z.B. im LFT-D-Verfahren.

Die Verfestigung von gekrempelten oder aerodynamisch gelegten Vliesen kann rein mechanisch durch Vernadeln und Vernähen oder auch thermisch durch Zusatz von Binfasern oder Bindepulver erfolgen. Im Hinblick auf die Direktverarbeitung im LFT-D-Prozess erscheint die mechanische Verfestigung durch Vernadeln als gut geeignet, da dieses Verfahren sehr einfach und kostengünstig ist. Allerdings muss dabei darauf geachtet werden, dass das Fasermaterial nicht zu stark verfestigt wird, um Faserschädigungen bei der Vernadelung zu vermeiden und eine gute Faseröffnung und Verteilung im Doppelschneckenextruder zu sichern.

1.3 Prozesse zur Herstellung von Carbonfaserverbunden

Aktueller Stand der Technik bei der Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen mit Carbonfasern (CFK) sind verschiedene Verfahren wie z.B. Prepreg- und Autoklav-Technologien, Tapelegen, das Wickeln und der RTM-Prozess, die meist aus der Luft- und Raumfahrttechnik kommen [11]. Bei diesen Technologien werden überwiegend duroplastische Harzsysteme als Matrix eingesetzt. Einige Verfahren sind allerdings auch für die Herstellung von thermoplastischen Hochleistungsverbunden geeignet (z.B. Tapelegen, Wickeln).

Die Autoklavtechnik ist auf die Verarbeitung von duroplastischen Prepregs zugeschnitten und eignet sich durch die langen Zykluszeiten nur für die Herstellung kleiner Stückzahlen. Allerdings lassen sich in diesem Prozess auch große Strukturbauteile mit hohen Fasergehalten und sehr guten mechanischen Eigenschaften herstellen.

Das aufwändige Handling der Prepregs und die beim Zuschnitt anfallenden großen Abfallmengen schränken die Anwendung des Verfahrens ein. Darüber hinaus gibt es viele Aktivitäten zum gerichteten Ablegen von Tapes über so genannte Tapelegeverfahren. Hierbei werden gerichtete Faserstränge (endlos) oder Abschnitte mit begrenzter Faserlänge über Roboter konturgenau abgelegt und somit zu einem Preformling verarbeitet. Vorteil bei dieser Technologie ist die kraftflussgerechte Ausrichtung der Fasern und das nahezu abfallfreie Erzeugen der Faserverbundstrukturen. Ein wesentliches Handicap ist allerdings die niedrige Prozessgeschwindigkeit. Dadurch ist die Anwendung dieses Verfahrens auf hochwertige Bauteile mit geringen Stückzahlen begrenzt. Sowohl bei der Prepregverarbeitung als auch beim Tapelegen werden in der Regel CF-Halbzeuge aus Endlofasern (Gelege), Gewebe, Bänder usw. eingesetzt [12-17]. Recycelte Fasern oder auch geschnittene Fasern lassen sich mit diesen Prozessen nicht verarbeiten.

Das RTM-Verfahren kommt ursprünglich auch aus der Luftfahrtindustrie, hat sich aber mittlerweile in anderen Anwendungen bewährt und wird als das geeignetste Verfahren zur Herstellung größerer Stückzahlen angesehen. Gegenwärtig werden vor allem in der Automobilindustrie große Anstrengungen unternommen, um mit dem Verfahren Bauteile für Karosseriestrukturen in Großserien herstellen zu können [18-21]. Die ersten Anwendungen von Automobilbauteilen aus dem RTM-Prozess liegen allerdings schon mehr als 20 Jahre zurück [22-24]. Seit dem haben sich sowohl die Werkstoffe als auch die Verfahrenstechnik weiterentwickelt und bieten gegenwärtig ein hohes Potenzial zur wirtschaftlichen Herstellung von größeren Stückzahlen.

Ein ebenso interessantes Gebiet wie die duroplastischen CFK sind faserverstärkte Kunststoffe mit thermoplastischer Matrix. Hier gibt es ebenfalls eine Reihe von Entwicklungen zur Herstellung von CFK, die aus der Luftfahrttechnik kommen. Betrachtet man nicht ausschließlich die aufwändige Verarbeitung von Endlofasern oder Gelegen, dann rücken auch hochproduktive Verfahren wie

- Spritzgießen (kurzfaserverstärkte Kunststoffe)
- Pressen von Organoblechen (Langfaserverstärkung)
- Strangablegen und Pressen (Langfaserverstärkung)

ins Blickfeld. Diese Verfahren werden industriell in der Großserie zur Verarbeitung von glasfaserverstärkten Kunststoffen eingesetzt und sind prinzipiell auch für die Herstellung von CFK-Bauteilen geeignet. Allerdings ist der Entwicklungsstand sehr unterschiedlich. Das effektivste Verfahren ist das Spritzgießverfahren, da hier eine Vollautomatisierung des Prozesses und hohe Stückzahlen erreicht werden können. Die Technologie kommt häufig zur Herstellung von komplexen Bauteilen mit verrippten Strukturen zum Einsatz. Es werden aber auch großflächige Strukturteile wie Unterbodenteile, Frontends und Sitzstrukturen im Spritzgießverfahren gefertigt [25-28]. Bei derartigen Teilen können auch Langfasergranulate mit Faserlängen von 10 mm oder mehr verwendet werden, um entsprechende Bauteilsteifigkeiten und Crasheigenschaften erzielen zu können.

Eine weitere Variante der Herstellung von CFK-Verbundbauteilen ist der Einsatz von Organoblechen aus lang- oder endlosfaserverstärkten Thermoplasten [29-31]. Durch die gerichtete Faserorientierung und die großen Faserlängen können bei diesen Materialien sehr hohe Festigkeiten und Steifigkeiten bei geringer Materialdichte erzielt werden. Das ermöglicht die Herstellung von Strukturbauteilen. Allerdings ist der fertigungstechnische Aufwand bei diesen Materialkombinationen noch recht hoch, da in jedem Fall erst Halbzeuge aus dem Faserverbundmaterial erzeugt werden müssen. Ein weiteres Problem ist die begrenzte Umformbarkeit der Halbzeuge mit gerichteter Faserorientierung. Bei hohen Umformgraden können Falten und Löcher in dem Material auftreten, die zu Schwachstellen im Bauteil führen. Dadurch sind Organobleche nur für weniger komplexe Geometrien geeignet. In Kombination mit dem Spritzgießverfahren lassen sich jedoch auch komplexe Strukturen darstellen [32, 33].

Langfaserstrukturen sind auch durch den Einsatz von Stäbchengranulaten im Spritzgießprozess, GMT-Materialien oder Strangablegeverfahren (LFT-D-Prozess) herstellbar [34-38]. Im LFT-D-Prozess können Glas- oder Carbonfasern direkt in einen Extruder oder eine Spritzgießmaschine eingezogen werden. Dadurch lassen sich größere Faserlängen als bei Verwendung von Granulaten erzielen. Die Technologie wird in der Automobilindustrie zur Herstellung von Frontends, Instrumententafeln, Batterieträgern und anderen Strukturbauteilen eingesetzt und ist auch für die Verarbeitung von Carbonfasern geeignet. Für die Herstellung von CFK-Bauteilen ist der LFT-D-Prozess bisher noch nicht systematisch untersucht worden.

Insbesondere die Verwertung von recycelten Fasermaterialien aus Zuschnitt- und Preformprozessen ist nicht bekannt, eröffnet aber im Hinblick auf die Verwertung von Recycling-Carbonfasern und die nahezu abfallfreie Bauteilherstellung mit CFK interessante Alternativen. Das TITK hat sich bereits vor 10 Jahren mit der Entwicklung einer geeigneten Dosiertechnik zur Verarbeitung von Stapelfasern befasst und die Anlagentechnik entsprechend modifiziert [39, 40]. Die Dosierung der Stapelfasern kann bei diesem Verfahren in Form eines gering verfestigten Fasergeleges erfolgen (Abbildung 6).

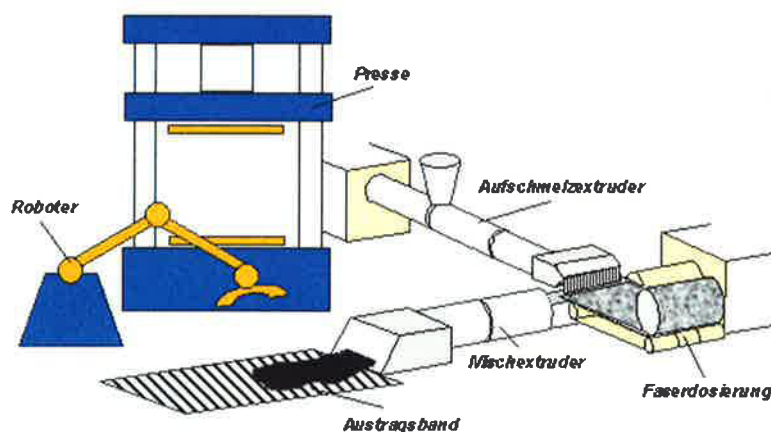


Abb. 6: Direktdosierung von Stapelfasern

Das Fasergelege wird mit Hilfe konventioneller textiler Anlagentechnik (Krempeln oder aerodynamische Vlieslegung) hergestellt und ermöglicht eine kontinuierliche Zuführung mit hohem Durchsatz. Durch die getrennte Plastifizierung des Matrixmaterials gelangen die Verstärkungsfasern in der Übergabezone direkt in die Kunststoffschmelze. Bei der Schmelzaufbereitung können auch Additive wie Stabilisatoren und Haftvermittler zugeführt werden. Die Dispergierung der Fasern erfolgt im Doppelschnecken-Mischextruder mit einem Schneckendurchmesser von 75 mm. Durch eine entsprechende Schneckenauslegung werden ein sicheres Einzugsverhalten und eine faserschonende Plastifizierung erreicht. Im Gegensatz zur Glasfaser-Direktdosierung müssen die recycelten Carbonfasern nicht definiert verkürzt werden, da bereits Stapelfasern in den Extruder einlaufen. Damit ist diese Technologie ideal für die Verarbeitung von endlich langen Carbonfasern geeignet.

Das LFT-D-Verfahren hat sich bereits in einer Reihe von Großserienanwendungen in der Automobilzulieferindustrie bewährt und könnte mit einigen Anpassungen auch für die Herstellung von CFK-Verbunden eingesetzt werden. Im Hinblick auf eine industrielle Umsetzung der Forschungsergebnisse sind deshalb sehr gute Voraussetzungen gegeben.

2 Eingesetzte Anlagentechnik

2.1 LFT-D-Anlage

Bei den Versuchen zur Direktverarbeitung von Carbonfasern wurde eine LFT-D-Anlage von der Firma Dieffenbacher eingesetzt. Die Anlage besteht aus 2 Extrudern (Aufschmelz und Mischextruder), die im 90° Winkel zueinander angeordnet sind.

Als Aufschmelzextruder wurde ein Kannegiesser- Einschneckenplastifiziergerät mit einem Schneckendurchmesser von $D=80$ mm und einer Verfahrenslänge von $L:D=26$ eingesetzt. Der Extruder ist mit einer 300 mm breiten Schlitzdüse ausgerüstet. Die Dosierung des Matrixmaterials und der erforderlichen Additive erfolgte als fertiges Compound bzw. Gemisch, da die Maschine nicht über gravimetrische Dosierungen verfügt. Der Kunststoff wird durch die Schneckenrotation in den beheizten Plastifizierzylinder eingezogen, aufgeschmolzen, homogenisiert, gefördert und anschließend als Schmelzefilm durch die Schlitzdüse ausgetragen und dem Mischextruder zugeführt.

Der Mischextruder ist ein speziell für den kontinuierlichen Einzug von langen bzw. endlosen Verstärkungsfasern konzipiertes Gerät von der Firma Dieffenbacher. Er ist als Doppelschneckenextruder (ZSG) mit einem Schneckendurchmesser von $D=75$ mm und einer Verfahrenslänge von $L:D=14$ ausgelegt. Eine spezielle Übergabezone ermöglicht den gleichzeitigen Einzug von Polymerschmelze und Faservlies mit einer maximalen Breite von 300 mm.

Im ZSG wird durch die Scherwirkung der Schnecken eine Auflösung des Faservlieses und die Dispergierung der Fasern in der Matrix erreicht. Der kontinuierliche Austrag des so erzeugten Plastifikates erfolgt anschließend über eine 175 mm breite Rechteckdüse (Abbildung 7).

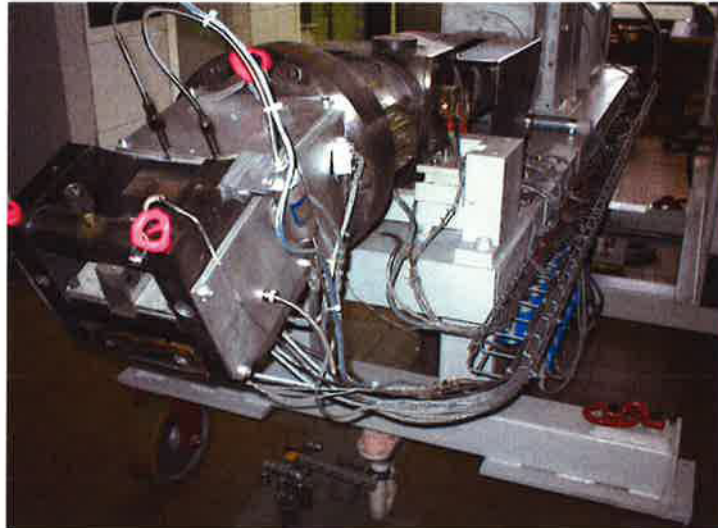


Abb. 7: Mischextruder mit Rechteckdüse (ZSG)

Die Anlagendaten des Mischextruders können wie folgt zusammengefasst werden:

- Schneckendrehzahl Mischextruder: 20 bis max. 300 U/min
- Verarbeitungstemperatur: max. 300°C
- Zuführbreite für das Fasermaterial: max. 300 mm
- Plastifikatbreite: 175 mm
- Plastifikatdicke: 5 bis 25 mm
- Durchsatz: max. 500 kg/h

2.2 Presse und Werkzeug

Das plastifizierte Material wird nach dem Austrag aus dem Mischextruder mit einem hydraulisch betätigten Schneidmesser abgetrennt und direkt im Anschluss manuell in die Presse (Typ KV287, Rucks Maschinenbau GmbH) eingelegt. Die Presse mit einer maximalen Presskraft von 2000 kN besitzt eine Werkzeugaufspannfläche von 600 x 900 mm.

Als Versuchswerkzeug wurde ein Fließpresswerkzeug konstruiert und gebaut, welches die Herstellung von ebenen Platten mit lokalen Verrippungen ermöglicht (Abbildung 8). Die Tiefe der Rippen beträgt 30 mm, um Aussagen zur Fließfähigkeit des Materials treffen zu können. Die Bauteilwandstärke beträgt an unterschiedlichen Stellen 2 und 3 mm. Die Plattengröße ermöglicht die Entnahme von Probekörpern sowohl im Einlegebereich als auch im Fließbereich in verschiedenen Richtungen. Damit können fließbedingte Faserorientierungen erfasst werden.

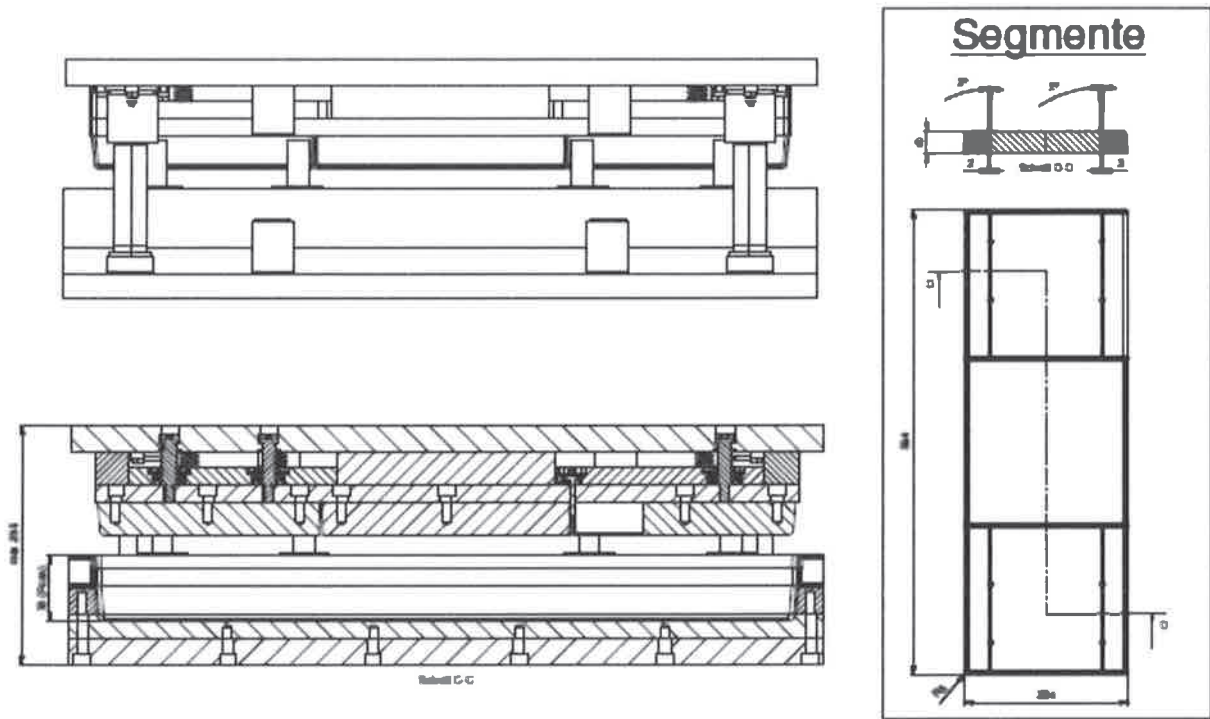


Abb. 8: Fließpresswerkzeug

3 Versuchsmaterialien

3.1 Matrixpolymere und Haftvermittler

Für die im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen wurden 2 PP und PA6-Typen mit unterschiedlichen Fließfähigkeiten eingesetzt. Außerdem wurden zur Optimierung der Faser-Matrix-Haftung 2 Masterbatches mit Haftvermittler (für PP und PA6) getestet. Als Referenz zu der Masterbatchvariante wurde bei dem Matrixmaterial PP noch ein hochkonzentrierter Haftvermittler von der Firma Clariant verwendet. Eine Übersicht zu den Materialbezeichnungen und Herstellern zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Eingesetzte Materialien

Material	Hersteller	Kurzbezeichnung
MOPLEN (PP)	LyondellBasell Industries	MOPLEN (M)
TATREN (PP)	Slovnafit Plc.	TATREN (T)
Grodnamid (PA6)	PTC "Khimvolokno" JSC "Grodno Azot"	Grodnamid (G)
Ultramid B (PA6)	BASF SE	Ultramid (U)
Masterbatch für PP	Optipolymers GmbH	Masterbatch PP
Licomont AR 504 (für PP)	Clariant International Ltd.	Licomont
Masterbatch für PA6	Optipolymers GmbH	Masterbatch PA
geöffnete Carbonfasern	SGL Automotive Carbon Fibers	

3.2 Verwendete Fasermaterialien

Für die LFT-D-Versuche mit recycelten Carbonfasern standen verschiedene Ausgangsmaterialien aus dem Produktionsprozess von Gelegen und Preforms zur Verfügung:

- C-Faser-Primärmaterial (Rovings)
- Rovingabfälle auf Restspulen
- Gewebereste
- Gelegereste

Die Fasermaterialien wurden vorsortiert und hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften geprüft. Eine Gegenüberstellung der Prüfwerte von ausgewählten Fasermaterialien enthält Tabelle 2.

Tabelle 2: Faserkennwerte von recycelten Carbonfasern

Parameter		Flechtschlauch		Fadenwirre		Faser- wirre	Gelegereste	
		Ausgang	Recyclingfaser	Ausgang	Recyclingfaser		Ausgang	Recyclingfaser
Dichte	g/cm ³	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Feinheit	dtex	0,79	0,9	0,92	1,14	0,72	0,82	0,76
Durchmesser	µm	7,5	8,0	8,1	9,0	7,1	7,6	7,3
Reißkraft	cN	18,4	21,8	19,4	19,8	8,4	18,6	15,8
V d. Reißkraft	%	34,6	38,3	51,3	36,6	42,1	21,6	22,2
feinheitsbez. Reißkraft	cN/tex	233	245	225	182	117	228	207,6
Höchstzugkraft	N/mm ²	4.194	4.410	4.050	3.276	2.106	4.104	3.737
Reißdehnung	%	2,26	2,53	2,55	2,14	3,2	2,4	2,26
E-Modul (0,5-0,7%)	cN/tex	10.848	9.679	8.781	8.802	3.786	9.579	9497
	kN/mm ²	195,3	174,2	158,1	158,4	68,1	172,4	170,9
mittlere Faser-/bündellänge	mm	endlos	32	endlos	35,4	27		

Ausgehend von den am Markt zur Verfügung stehenden Mengen wurden für die weiteren Versuche stets Gelegereste eingesetzt. Diese fallen als Randbeschnitt und Preformabfälle in der Produktion von Bauteilen für die beiden Fahrzeuge BMW i3 und BMW i8 in großen Mengen an. Die anderen Materialien standen nur in kleineren Mengen zur Verfügung und haben wirtschaftlich eine geringere Bedeutung.

4 Werkstoffprüfungen

4.1 Faserprüfungen

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der recycelten Carbonfasern wurden folgende Faserprüfungen durchgeführt:

Faserfeinheit:

- Durchführung nach DIN EN ISO 1973

Festigkeit/Reißdehnung:

- Durchführung nach DIN EN ISO 5079
- Prüfgerät Fafegraf M

E-Modul:

- Durchführung in Anlehnung an DIN EN ISO 5079
- Prüfgerät Fafegraf M

Faserbündellänge:

- Durchführung nach SAA 3.5 P016 (Werkstandard)

Zerfaserungsgrad:

- Durchführung nach SAA 3.5 T001 (Werkstandard)

4.2 Verbundprüfungen/Probenahme

Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der hergestellten Verbunde erfolgte mit Hilfe von Zug-, Biege- und Schlagbiegeversuchen. Geeignete Proben für die mechanische Prüfung wurden zunächst über Dichtebestimmungen (zur Berechnung des Fasergehaltes) ausgewählt. Die Prüfungen erfolgten unter den nachstehend aufgeführten Bedingungen.

Dichtebestimmung mittels Auftriebswägung

- Durchführung nach DIN EN ISO 1183-1 Verfahren A (2004)
- Probenmaße: 20 x 20 mm

Fasergehaltsbestimmung mittels Verglühen

- Durchführung nach DIN EN ISO 1172-A
- Probenmaße: 20 x 20 mm
- Trocknen der Proben: 105 °C (2 h)
- Verglühen Schritt 1: 400 °C (2 h)
- Verglühen Schritt 2: 800 °C (4 h)

Zugprüfung

- Durchführung nach DIN EN ISO 527
- Prüfgerät: Universalprüfmaschine Instron 5900R
- Probenmaße: 180 mm x 20 mm x Dicke

Biegeprüfung

- Durchführung nach DIN EN ISO 178
- Prüfgerät: Universalprüfmaschine Instron 4466
- Probenmaße: Breite: 20 mm
 Länge: = 16 x Dicke + 15 mm

Schlagbiegeprüfung nach Charpy an ungekerbten Proben

- Durchführung nach DIN EN ISO 179
- Prüfgerät: Schlagpendel Zwick (Typ: B5113.300), Pendel: 5J
- Probenmaße: Breite: 15 mm
 Länge L: 25 x Dicke

Die Proben für die mechanischen Prüfungen wurden sowohl aus dem Einlege- als auch aus dem Fließbereich jeweils in Längs- und Querrichtung entnommen (siehe Abbildung 9). Die Bezeichnung richtet sich nach den sichtbaren Faserorientierungen auf der Plattenoberseite.

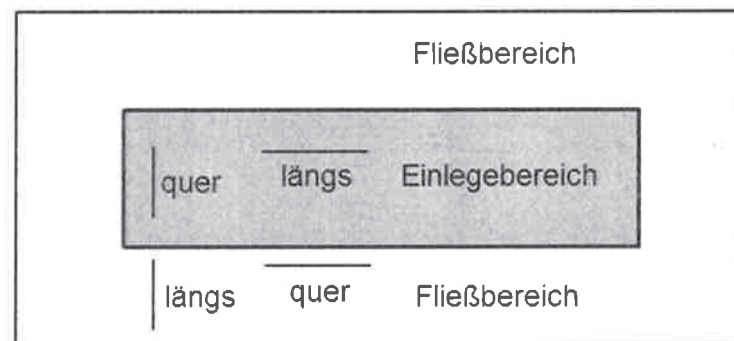


Abb. 9: Definition der Entnahmerichtungen [41]

5 Verbundherstellung im LFT-Direktverfahren

5.1 Basisversuche zur Einstellung der Anlage

5.1.1 Faseröffnung und Vliesherstellung

Die Faseraufbereitung erfolgte nach einem im TITK entwickelten Recyclingverfahren. Die Gelegeabfälle wurden zunächst in Chips mit einer Kantenlänge von 40 x 40 mm geschnitten und nachfolgend in einer modifizierten Hammermühle geöffnet. Das Fasermaterial wurde anschließend noch entstaubt und hinsichtlich der mittleren Faserbündellänge, des Öffnungsgrades und der mechanischen Eigenschaften geprüft.

Für die Vliesherstellung standen verschiedene Verfahren zur Auswahl (Krempelanlage, Wirrvliesanlage). In ersten Versuchen wurden gekrempelte und vernadelte Vliese mit einer Flächenmasse von ca. 300 g/m² hergestellt. Die Faseröffnung und Vereinzelung der recycelten Carbonfasern ist durch das Krempeln sehr intensiv, was zu sehr homogenen Vliesen führt. Die Vliese wurden dann auf eine Breite von 300 mm zugeschnitten und an der LFT-D-Anlage getestet. Dabei konnte die Dosierbarkeit der Vliese erfolgreich nachgewiesen werden.

In weiteren Versuchen wurden aerodynamisch gelegte Wirrfaservliese getestet. Die Vliese wurden auf einer speziellen Laboranlage im TITK hergestellt. Da die Faseröffnung bei diesem Verfahren weniger intensiv ist, erfolgt die Vliesbildung sehr faserschonend. Die Flächenmassen lagen bei diesen Vliesen in einem Bereich von 400-500 g/m². Die Vliese wurden durch eine geringe Vernadelungsintensität nur soweit verfestigt, dass das Handling und die Dosierung an der LFT-D-Anlage gegeben waren.

5.1.2 Faserdosierung an der LFT-D-Anlage

Die Faserdosierung im LFT-D-Prozess erfolgt üblicherweise in Form von endlosen Rovings. Bei der Verwendung von recycelten Carbonfasern ist das nicht möglich, da nach dem Faseraufschluss des Recyclingmaterials nur endlich lange Fasern zur Verfügung stehen. In Anlehnung an frühere Forschungsarbeiten wurde deshalb die Zuführung der Recyclingcarbonfasern auf der Basis von gering verfestigten Faservliesen realisiert. Das Fasermaterial kann so zunächst unter Nutzung konventioneller textiler Techniken (Speisung, Öffnung, Vliesbildung) mit hoher Produktivität aufbereitet und als dosierbares Halbzeug bereitgestellt werden.

Bei der Faserdosierung lässt sich das Vlies in der für die LFT-D-Anlage maximalen Breite von 300 mm zudosieren. Das Flächengewicht und die Einzugsgeschwindigkeit sind entscheidend für die dosierte Fasermenge pro Zeiteinheit. Da die Schnecken des ZSG das Faservlies aufwickeln, wird die Einzugsgeschwindigkeit hauptsächlich durch die Schneckendrehzahl beeinflusst.

In früheren Versuchen wurde festgestellt, dass die Schneckengeschwindigkeit des ZSG nur in einem recht engen Bereich (10 bis 50 U/min) variiert werden kann. Niedrigere Schneckendrehzahlen führen zu langen Verweilzeiten im Extruder. Bei hohen Drehzahlen ist die Verweilzeit zu kurz und das Fasermaterial wird nicht mehr homogen in der Polymerschmelze verteilt. Aus diesem Grund sollte sowohl der Aufschmelzextruder als auch der Mischextruder unter möglichst optimalen Prozessbedingungen betrieben werden (Schneckendrehzahl und Polymerdurchsatz konstant). Zur Einstellung verschiedener Fasergehalte musste demzufolge bei bekannter Flächenmasse des Vlieses die Breite der Vliesstreifen variiert werden. Die Berechnung der Vliesbreite bei gegebener Flächenmasse und Einzugsgeschwindigkeit kann nach folgender Formel erfolgen:

$$b = \frac{\dot{m} \cdot \varphi}{(100 - \varphi) \cdot v_{\text{Einzug}} \cdot m_A}$$

b	- Vliesbreite
\dot{m}	- Schmelzedurchsatz
φ	- Faseranteil in Gew.-%
v_{Einzug}	- Vlieseinzugsgeschwindigkeit
m_A	- Flächenmasse des Vlieses

Tabelle 3 zeigt exemplarisch die erforderlichen Streifenbreiten für Vliese mit Flächenmassen von 450 und 500 g/m², eine Einzugsgeschwindigkeit von 4 m/min und Fasergehalte von 20 bis 40 Gew.-%.

Tabelle 3: Streifenbreiten bei verschiedenen Flächenmassen und Fasergehalten

Matrix-durchsatz [g/min]	Faser-Gehalt [Gew.-%]	Soll-Faser-dosierung [g/min]	Einzug Faservlies [m/min]	Flächen-masse Vlies [g/m ²]	Streifen-breite [mm]
900	20	225,0	4	450	12,5
	25	321,4			17,9
	30	450,0			25,0
	35	525,0			29,2
900	20	225,0	4	500	11,3
	25	321,4			16,1
	30	450,0			22,5
	35	525,0			26,3

Nach der Berechnung der notwendigen Breiten wurde das Vlies manuell zugeschnitten und auf Papphülsen aufgerollt. Über einen Rollenhalter neben dem Mischextruder konnte das Fasermaterial kontinuierlich vom Mischextruder eingezogen werden (Abbildung 10).



Abb. 10: Einzug von Vliesstreifen in den Mischextruder

Durch die Rotation der Schnecken werden sowohl das Vlies als auch das Matrixmaterial in die Einzugsöffnung des Mischextruders eingezogen. Die Fasern kommen dabei bereits in der Einzugszone mit dem Schmelzefilm in Kontakt und werden mit dem Polymer benetzt. Die vollständige Vermischung des Matrixmaterials mit dem Fasermaterial erfolgt dann im ZSG.

5.1.3 Grundeinstellungen und Schlussfolgerungen für die weiteren Versuche

Bei der Verarbeitung von PP zeigte sich, dass der Plastifizierextruder bei einem Massedurchsatz von 900-1000 g/min am gleichmäßigsten Material fördert. Die entsprechende Schneckendrehzahl für diesen Durchsatz wurde vor jeder Versuchsreihe neu bestimmt. Um eine geringe Viskosität des Matrixpolymers zu gewährleisten, wurde die Zylindertemperatur des Plastifizierextruders für die Verarbeitung von PP auf 240°C gesetzt. Diese Temperatur hatte sich in Vorversuchen für die Homogenisierung und gleichmäßige Benetzung des Fasermaterials bewährt. Bei der Verarbeitung von PA6 wurden am Plastifizierextruder 280°C eingestellt, um eine kontinuierliche Aufschmelzung des Matrixmaterials zu gewährleisten.

Ausgehend von dem konstanten Massedurchsatz des Plastifizierextruders wurde zur Realisierung unterschiedlicher Fasergehalte die dosierte Fasermenge über die Anpassung der Streifenbreite eingestellt. Die Einzugsgeschwindigkeit des Mischextruders wurde vor jeder Versuchsreihe durch Vliesstreifen mit bekannter Länge bestimmt und genau eingestellt.

Die Ablängung des kontinuierlich extrudierten Strangs erfolgte an der Düse des Mischextruders alle 50 Sekunden. Dieses Zeitintervall wurde in Abhängigkeit von der Ausstoßleistung festgelegt, damit ausreichend große Plattenflächen resultierten und im Zusammenspiel mit dem Presszyklus keine Unterbrechungen des Extrusionsprozesses auftraten.

Der Pressvorgang wurde bei einer Schließkraft von 2000 kN und einer Werkzeugtemperatur von 80°C durchgeführt. So sollte gewährleistet werden, dass die Platten auf 2 mm Dicke gepresst werden können und das Material während des Pressens fließfähig bleibt und nicht zu schnell abkühlt. Die Zykluszeit wurde so eingestellt, dass der Transport des Plastifikates vom Extruder zur Presse, die Schließzeit, die Haltezeit, die Zeit zum Öffnen und die Entnahmezeit der Platte die 50 Sekunden zwischen den Schnitten nicht überschreiten. Die wichtigsten Schlussfolgerungen aus den Vorversuchen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Für die gleichmäßige Beschickung der Filmdüse am Plastifizierextruder hat sich ein Polymerdurchsatz von 900 g/min bewährt.
- Praktisch gut realisierbare Schneckengeschwindigkeiten am Mischextruder bewegen sich in einem Bereich von 10-max. 50 U/min.
- Die optimale Einzugsgeschwindigkeit für die Dosierung der Faserbänder liegt in einem Bereich von 2-4 m/min.
- Unter konstanten Prozessbedingungen kann die Einstellung des Fasergehaltes durch Anpassung der Streifenbreite erfolgen.
- Die im Hinblick auf einen stabilen Prozess geeigneten Fasergehalte liegen zwischen 20 und 30 Gew.-%. Anteile über 30 Gew.-% führen zu Faseragglomeraten und Masseschwankungen.

5.2 Verbundherstellung mit PP-Matrix

5.2.1 Prozessparameter für die Herstellung der PP-Verbunde

Die bei den Verarbeitungsversuchen mit PP-Matrix eingestellten Prozessparameter können Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4: Prozessparameter bei der Verarbeitung von PP

	VR 1 PP-Matrix	VR 2 PP-Matrix	VR 3 PP-Matrix
Matrixwerkstoff	Moplen Tatren	Moplen	Moplen
Haftvermittler	Masterbatch PP (4 %)	Masterbatch PP (4 %)	Licomont (2 %)
Flächenmasse Vlies	390 g/m ² 500 g/m ² 510 g/m ² 550 g/m ²	548 g/m ²	420 g/m ² 508 g/m ²
Durchsatz Plastifizierextruder	900 g/min	900 g/min	900 g/min
Einzug Faservlies	4 m/min	3 m/min	2,5 m/min
Drehzahl Plastifizierextruder	14 min ⁻¹	14 min ⁻¹	14 min ⁻¹
Temperatur Plastifizierextruder	240 °C	240 °C	240 °C
Drehzahl Mischextruder	40 min ⁻¹	20 min ⁻¹	18 min ⁻¹
Temperatur Mischextruder	220 °C	240 °C	240 °C
Extrudierzeit	50 s bis Schnitt (ca. 800-1100 g)		
Presskraft	2000 kN		
Presswerkzeug	Plattenwerkzeug (2 mm)		
Werkzeugtemperatur	80 °C		
Kühlzeit	20 s		

Es wurden mehrere Versuchsreihen mit PP als Matrixmaterial durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe wurden Moplen und Tatren, zwei PP-Typen mit unterschiedlichen Fließigenschaften, getestet. Bei der Verarbeitung konnte festgestellt werden, dass Tatren zu zähfließend ist, deshalb wurde in den Versuchsreihen 2 und 3 nur noch die PP-Type Moplen eingesetzt.

Bei den weiteren Versuchen wurden die Prozessbedingungen angepasst (Verringerung der Einzugsgeschwindigkeit des Faservlieses und Erhöhung der Massetemperatur). Dadurch konnte ein stabilerer Austrag des Plastifikates (geringere Masseschwankungen, bessere Homogenität der faserhaltigen Schmelze) sichergestellt werden. Außerdem wurde ein weiterer für PP-Verbunde geeigneter Haftvermittler getestet.

5.2.2 Übersicht zu den gefertigten PP-Varianten

Nach dem Herstellungsprozess wurden zunächst an kleinen Proben die Fasergehalte der hergestellten Platten bestimmt. Anhand folgender Auswahlkriterien wurden geeignete Platten für die Zug-, Biege- und Schlagprüfung ausgewählt:

- Fasergehalt
- Verteilung und Größe von Dick- und Dünnstellen
- Größe und Ausdehnung des Einlege- bzw. Fließbereiches

Nach erfolgter Vorauswahl der Verbundplatten wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Varianten hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften geprüft.

Tabelle 5: Übersicht zur Plattenauswahl der Versuchsreihen mit PP-Matrix

VR 1 PP Bezeichnung	Fasergehalt [Gew.-%]	VR 2 PP Bezeichnung	Fasergehalt [Gew.-%]	VR 3 PP Bezeichnung	Fasergehalt [Gew.-%]
M 1.2	29,6	M 2.2	22,3	M 3.3	16,9
M 1.4	26,7	M 2.3	20,3	M 3.5	16,6
M 1.5	23,4	M 2.13	37,3	M 3.9	23,1
M 1.6	26,6	M 2.14	33,0	M 3.12	18,9
M 1.7	28,1	M 2.16	33,8	M 3.13	31,1
M 1.11	42,2	M 2.17	41,1	M 3.14	21,8
M 1.20	49,7	M 2.18	33,5	M 3.15	22,6
M 1.24	55,8	M 2.19	41,0	M 3.16	26,8
		M 2.20	34,0	M 3.17	22,6
		M 2.25	39,6	M 3.18	19,4
		M 2.26	18,1	M 3.20 HV	23,3
		M 2.29	22,8	M 3.23 HV	27,4
				M 3.25 HV	25,4
				M 3.26 HV	27,9
				M 3.27 HV	30,1
				M 3.33 HV	22,4
				M 3.34 HV	19,4
				M 3.35 HV	18,9
				M 3.36 HV	17,0
				M 3.37 HV	17,3

5.3 Verbundherstellung mit PA6-Matrix

5.3.1 Prozessparameter für die Herstellung der PA6-Verbunde

Zur Herstellung von PA6-Verbunden kamen ebenfalls zwei verschiedene Matrixmaterialien zum Einsatz (Grodnamid und Ultramid). Beide Polymere sowie das Masterbatch mit Haftvermittler wurden vor Beginn der Verarbeitungsversuche vier Stunden bei 90°C getrocknet. Die Prozesstemperatur lag bei 280°C, um ein homogenes Aufschmelzen des PA6-Matrixmaterials zu gewährleisten. Die Einzugs geschwindigkeit des Fasermaterials wurde wie bei den erfolgreichsten Versuchen mit PP-Matrix auf 2,5 m/min festgelegt. Die bei den Versuchen mit PA6-Matrix eingestellten Prozessparameter können Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 6: Prozessparameter bei der Verarbeitung von PA6-Verbunden

	VR 4 PA6-Matrix Grodnamid	VR 5 PA6-Matrix Ultramid
Matrixwerkstoff	Grodnamid	Ultramid
Haftvermittler	Masterbatch PA6 (4 %)	Masterbatch PA6 (4 %)
Flächenmasse Vlies	420 g/m ²	420 g/m ²
Durchsatz Plastifizierextruder	900 g/min	900 g/min
Einzug Faservlies	2,5 m/min	2,5 m/min
Drehzahl Plastifizierextruder	14 min ⁻¹	14 min ⁻¹
Temperatur Plastifizierextruder	280 °C	280 °C
Drehzahl Mischextruder	19 min ⁻¹	19 min ⁻¹
Temperatur Mischextruder	280 °C	280 °C
Extrudierzeit	50 s bis Schnitt (ca. 800-1100 g)	50 s bis Schnitt (ca. 800-1100 g)
Presskraft	2000 kN	2000 kN
Presswerkzeug	Plattenwerkzeug (2 mm)	Plattenwerkzeug (2 mm)
Werkzeugtemperatur	100 °C	100 °C
Kühlzeit	20 s	20 s

5.3.2 Übersicht zu den geprüften Verbunden mit PA6-Matrix

Von den gefahrenen Versuchsreihen mit PA6-Matrix wurden zunächst ausgewählte Platten mit dem Matrixmaterial Grodnamid geprüft. Die Platten wurden anhand des jeweiligen Fasergehaltes, der Fehlstellen auf der Oberfläche und der Ausprägung des Einlege- bzw. Fließbereiches für die weitere Prüfung ausgewählt (Tabelle 7).

Tabelle 7: Übersicht zur Plattenauswahl der Versuchsreihen mit PA6-Matrix

VR 4 PA6 Bezeichnung	Fasergehalt [Gew.-%]
G5	11,7
G10	11,9
G14	33,0
G16	31,4
G21	30,8
G22	39,2
G23	37,0
G30	22,0
G35	22,9
G42	31,5

6 Eigenschaften der hergestellten Verbundvarianten

6.1 Verarbeitungsverhalten im LFT-D-Verfahren

Zur Realisierung eines industriell umsetzbaren Verarbeitungsprozesses wurden die Prozessparameter an der LFT-D-Anlage bei der Direktdosierung von recycelten Carbonfasern optimiert. Bereits während des Herstellungsprozesses in Versuchsreihe 1 zeigten sich folgende Auffälligkeiten:

- Der Einzug des Fasermaterials lief bei 4 m/min Einzugsgeschwindigkeit nicht kontinuierlich, sodass das Vlies teilweise manuell nachgeschoben werden musste.
- Das Extrudat wurde ungleichmäßig ausgestoßen. Variierende Längen der Stränge waren die Folge.
- In einigen Bereichen des extrudierten Stranges waren die Fasern ungenügend mit dem Matrixmaterial benetzt.
- Verbunde mit einem Fasergehalt von 40 Gew.-% hatten viele Fehlstellen und waren nicht reproduzierbar herzustellen.

Nach dem Überführen des Extrudats in die Presse und dem anschließenden Pressvorgang konnten an den Platten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- Bei hohen Fasergehalten war der Rand der Platten ungleichmäßig.
- Die Proben mit Haftvermittler machten einen homogeneren Eindruck als Platten gleicher Fasergehalte ohne Haftvermittler.
- Auf allen Proben traten Oberflächenunebenheiten durch Faseragglomerate auf.
- In einigen Bereichen waren unbenetzte Fasern an der Oberfläche zu erkennen.
- Vliese mit Flächenmassen größer als 550 g/m² führten zu vielen Dickstellen auf den verpressten Platten.
- Je höher der Fasergehalt war, desto größer war die Plattendicke. Es konnten nur Platten mit geringem Kohlefaseranteil auf 2 mm verpresst werden.

Aus den o.g. Gründen wurden bei den nächsten Versuchsreihen die Verarbeitungsparameter angepasst. Die Reduzierung der Einzugsgeschwindigkeit des Kohlefaservlieses und die Erhöhung der Temperatur im Mischextruder brachten in der zweiten Versuchsreihe folgende Verbesserungen:

- Die Faserbündel des Kohlefaservlieses konnten gut aufgelöst und homogenisiert werden. Auch die Benetzung mit dem Matrixmaterial wurde verbessert.
- Das extrudierte Material war wesentlich gleichmäßiger. Dies äußerte sich durch einen kontinuierlichen Austrag und kompakte Materialstränge.
- Der gesamte Herstellungsprozess verlief weitestgehend störungsfrei, d.h. das Vlies wurde kontinuierlich eingezogen.
- Platten mit hohen Carbonfaseranteilen von 40 Gew.-% konnten auch weiterhin nicht ohne Dickstellen und Faseragglomerate hergestellt werden.

Die Parameteroptimierung verbesserte auch die Qualität der hergestellten Verbunde dahingehend dass:

- die Platten eine geringere Anzahl an Dick- und Dünnstellen aufwiesen
- die Ränder der Proben wesentlich gleichmäßiger waren
- die Fasern an der Oberfläche in der Regel vollständig benetzt wurden
- die Platten auch mit höheren Fasergehalten auf eine Dicke von ca. 2 mm gepresst werden konnten

Die positiven Effekte, die in Versuchsreihe 2 erreicht werden konnten, ließen sich durch das weitere Reduzieren der Einzugsgeschwindigkeit des Vlieses nochmals verbessern (Versuchsreihe 3).

Bei den Versuchsreihen 4 und 5 wurde PA6 als Matrixmaterial verwendet. Im Verarbeitungsprozess und an den verpressten Platten konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- Im Schmelzefilm des Plastifizierextruders bildeten sich Blasen. Diese entstanden vermutlich durch das Verdampfen von Restfeuchte des Materials.
- Der Vliesezug verlief ungleichmäßig, sodass teilweise von Hand nachgeschoben werden musste.
- Die Extrudatstränge waren sehr kurz, wodurch nur geringe Plattengrößen erreicht wurden.
- Die Aufheizung der PA6-Matrix war durch die höhere Verarbeitungstemperatur mit dem vorhandenen Plastifizierextruder problematisch.

Ein Ausfall der Heizzone am Plastifizierextruder während Versuchsreihe 5 hatte zur Folge, dass das Matrixmaterial nicht vollständig aufgeschmolzen werden konnte. Weiterhin sank die Schneckendrehzahl am Plastifizierextruder durch erhöhte Scherkräfte beim Aufschmelzen und Materialtransport. Der benötigte Schmelzedurchsatz konnte nicht länger gewährleistet werden, daher musste die Versuchsreihe vorzeitig abgebrochen werden.

6.2 Faserorientierungen im Pressprozess

Bei langfaserverstärkten Werkstoffen hat die Orientierung der Verstärkungsfasern einen maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Verbunde. Da im Fließpressverfahren die vollständige Formfüllung erst durch das Fließen der faserverstärkten Schmelze erreicht wird, können je nach Einlegestrategie und Fließweglänge große Eigenschaftsunterschiede durch fließbedingte Orientierungen auftreten. Um Unterschiede an den Verbunden abzuprüfen, wurden den gepressten Platten 100x100 mm Proben entnommen und anschließend im Muffelofen verglüht.

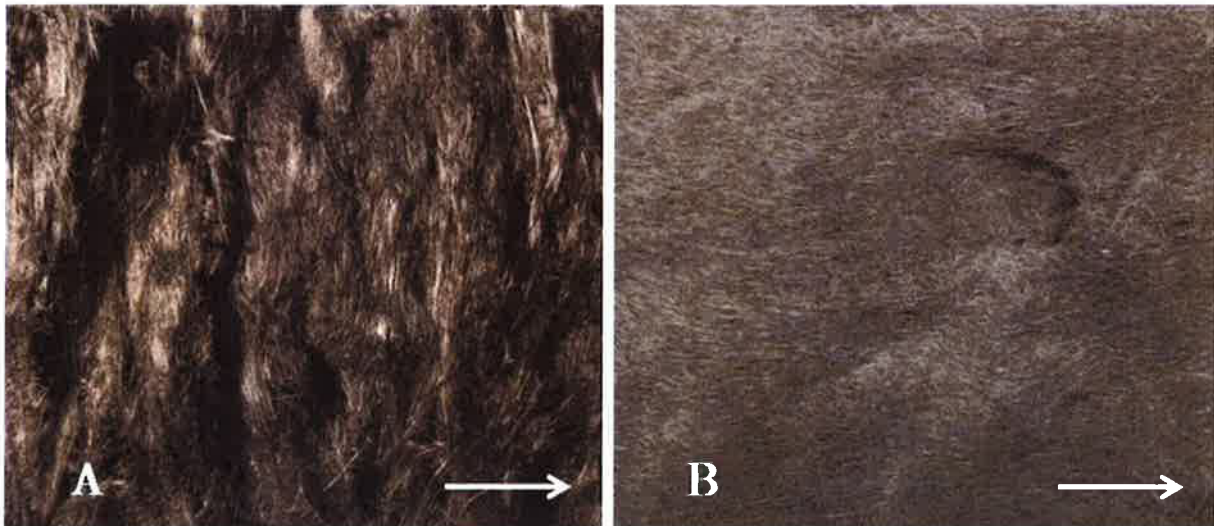


Abb. 11: Faserorientierung im Einlegebereich

Der Einlegebereich ist auf den verpressten Platten durch eine sichtbare Faserorientierung in Extrusionsrichtung des Stranges erkennbar. Dies war auch nach der Veraschung des Matrixmaterials sichtbar (Abbildung 11 B). Durch das rasche Abkühlen am Plattenwerkzeug war der äußere Bereich des Extrudats nicht mehr fließfähig. Die Fasern konnten folglich nicht durch eine Fließströmung umorientiert werden. Im Inneren des Strangs war das Material hingegen noch sehr heiß. Dadurch wurden auch im Einlegebereich Fasern umorientiert, allerdings nur unterhalb der erkalteten Oberfläche (Abbildung 11 A). Die Fasern im Einlegebereich waren sowohl längs, als auch quer orientiert, was Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften hatte.

Bei der Betrachtung der veraschten Probe aus dem Fließbereich fiel auf, dass die meisten Fasern an der Oberfläche, als auch im Inneren der Probe senkrecht zur Einlege- bzw. zur Extrusionsrichtung des Stranges verliefen (Abbildung 12).



Abb. 12: Faserorientierung im Fließbereich

Daran wird deutlich, dass die Fasern beim Pressen bevorzugt in Fließrichtung der Schmelze im Werkzeug umorientiert wurden. Nur wenige Fasern lagen parallel zur Einlegerichtung. Es ist nicht auszuschließen, dass beim Abtrennen der oberen Schicht einzelne Fasern mitgerissen und umgelegt wurden. Der Fließbereich ist somit ein hochorientierter Bereich, dessen Festigkeiten in Faserrichtung deutlich größere Werte als quer dazu erreichen sollten.

6.3 Ergebnisse aus der Verarbeitung von PP-Verbunden

6.3.1 Einfluss der Prozessoptimierung auf die Verbundeigenschaften

Die Prozessoptimierung erfolgte in mehreren Schritten, wobei stets besonderes Augenmerk auf einen kontinuierlichen Verfahrensablauf und hohe mechanische Eigenschaften der Verbunde gelegt wurde. Die veränderten Prozessbedingungen wirkten sich signifikant auf die mechanischen Eigenschaften aus. So konnte durch die geringere Einzugsgeschwindigkeit von Versuchsreihe 1 auf 2 ein höheres Niveau der Zugfestigkeit erreicht werden (Abbildung 13). Während bei Versuchsreihe 1 mit zunehmendem Fasergehalt kein Anstieg der Zugfestigkeit zu verzeichnen war, konnte in Versuchsreihe 2 eine Abhängigkeit der Kennwerte vom Fasergehalt nachgewiesen werden.

Durch die weitere Reduzierung der Einzugsgeschwindigkeit des Fasermaterials in Versuchsreihe 3 (Erhöhung der Verweilzeit im Extruder) und Einsatz des Haftvermittlers Licomont wurde eine nochmalige Verbesserung der Verbundwerte erzielt, sodass mit zunehmendem Carbonfaseranteil eine sehr deutliche Steigerung der Zugfestigkeit resultierte.

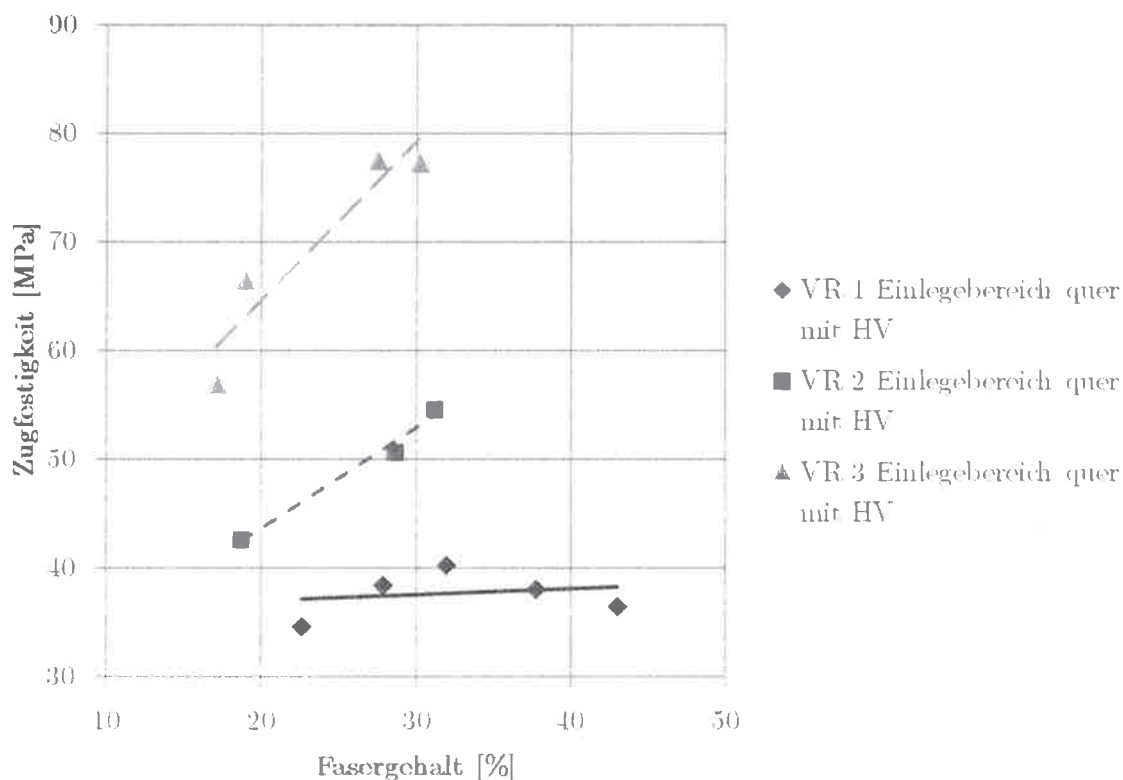


Abb. 13: Zugfestigkeit von PP/RCF-Verbunden in Abhängigkeit des Fasergehaltes

Beim Zug-E-Modul konnten ebenfalls deutliche Verbesserungen von Versuchsreihe 1 auf 2 beobachtet werden (Abbildung 14). Dabei ist die Abhängigkeit der Steifigkeit vom Fasergehalt bei allen Versuchsreihen erkennbar. Die E-Modulwerte der Versuchsreihen 2 und 3 liegen auf etwa gleichem Niveau. Bei homogener Verteilung der Fasern in der Schmelze führt eine verbesserte Haftung offenbar nicht zu einem weiteren Anstieg des E-Moduls.

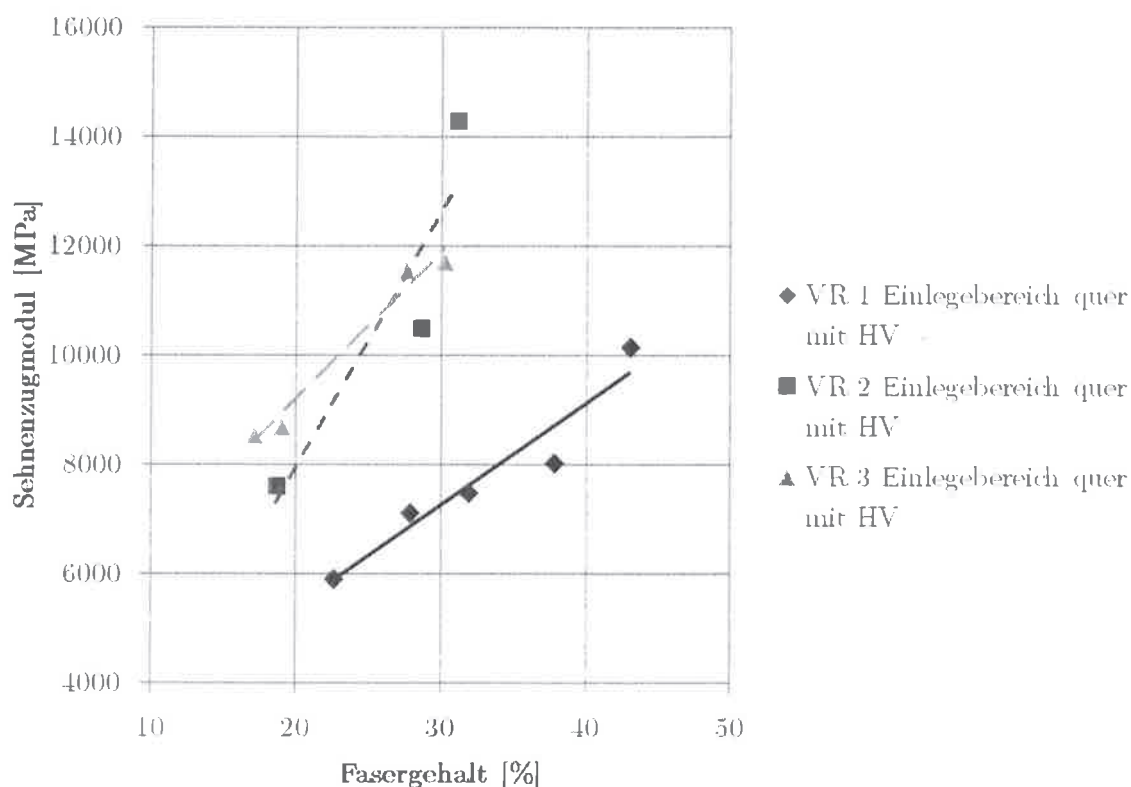


Abb. 14: Zug-E-Modul von PP/RCF-Verbunden in Abhängigkeit des Fasergehaltes

6.3.2 Effekte der Haftvermittlung

Der Einfluss der Faser-Matrix-Haftung auf die mechanischen Eigenschaften der PP-Verbunde wurde im Zusammenhang mit der Optimierung der Prozessbedingungen untersucht. In Versuchsreihe 1 erfolgte die Verarbeitung zunächst ohne Zusatz von Haftvermittler. Anhand vieler Faseragglomerate und trockener Stellen in den Verbundplatten war erkennbar, dass die Homogenisierung der Fasern in der Schmelze und die Anbindung der Carbonfasern an die Matrix optimiert werden müssen.

In den Versuchsreihen 2 und 3 wurden zwei unterschiedliche Haftvermittler eingesetzt, wobei die besten Effekte mit dem Haftvermittler Licomont (Clariant) in Versuchsreihe 3 erzielt werden konnten. Abbildung 15 zeigt die Zugfestigkeit von Proben, die aus verschiedenen Bereichen der Verbundplatten entnommen wurden.

Die Zugfestigkeit der haftvermittelten Verbunde mit einem Fasergehalt von 30 Gew.-% ist deutlich höher als ohne optimierte Faser-Matrix-Haftung. Das wird vor allem bei Proben aus dem Einlegebereich quer und dem Fließbereich längs deutlich, weil die Fasern dort eine bevorzugte Orientierung in Belastungsrichtung haben. Quer zur Vorzugsorientierung der Fasern wirken sich die Effekte der Haftvermittlung weniger aus.

Beim E-Modul sind die Steigerungen nicht ganz so hoch. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass die kritische Faserlänge zur Erzielung optimaler Steifigkeiten niedriger als bei der Zugfestigkeit ist. Das heißt, bei ausreichend großen Faserlängen (was bei den LFT-D-Verbunden gegeben ist) werden auch bei nicht optimalen Haftungsverhältnissen hohe Steifigkeiten erreicht. Wichtig für maximale Verbundsteifigkeiten sind vor allem eine homogene Faserverteilung und die gute Vereinzelung der Verstärkungsfasern (Auflösung von Faserbündeln). Das kann hauptsächlich durch die Optimierung der Verarbeitungsbedingungen erreicht werden.

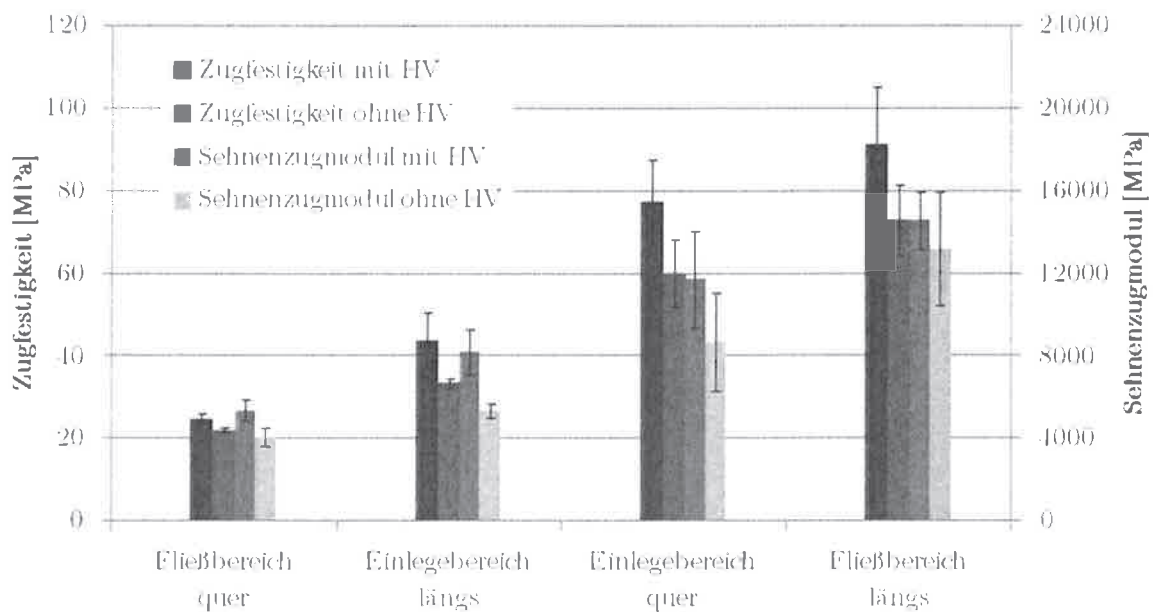


Abb. 15: Einfluss der Haftung auf die Zugeigenschaften von PP/RCF30-Verbunden

Noch deutlichere Effekte der Haftvermittlung zeigen sich bei Betrachtung der Biegeeigenschaften. (Abbildung 16). So konnte in der Versuchsreihe 3 sowohl bei der Biegefestigkeit als auch beim Biegemodul ein starker Anstieg der Eigenschaften durch den Einsatz des Haftvermittlers beobachtet werden. Wie auch bei den Zugeigenschaften werden diese Kennwertsteigerungen vor allem bei Proben aus dem Einlegebereich quer und dem Fließbereich längs erreicht.

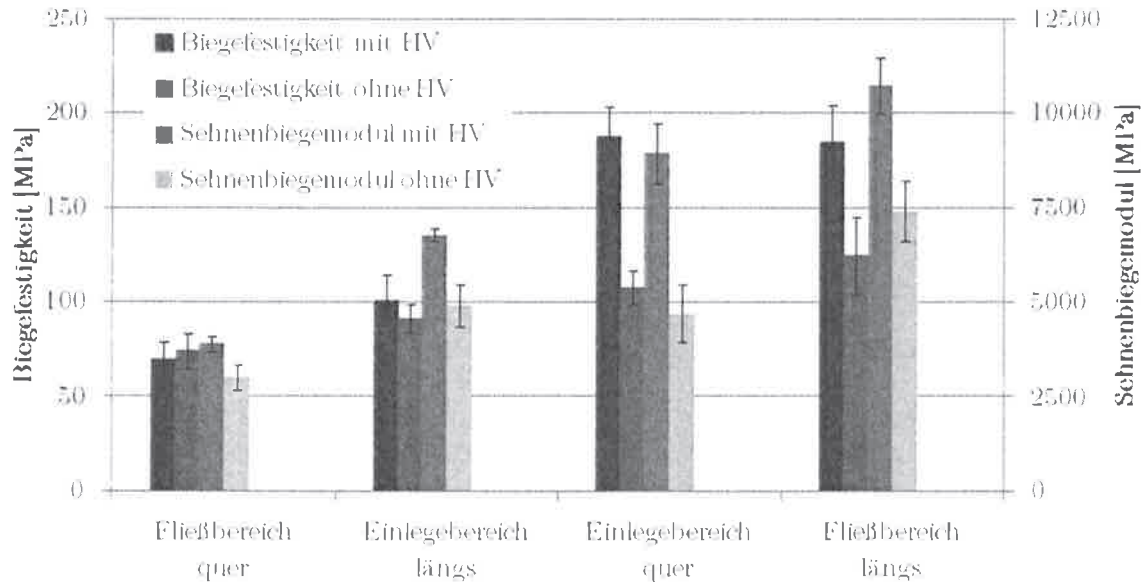


Abb. 16: Einfluss der Haftung auf die Biegeeigenschaften von PP/RCF30-Verbunden

Bei der Schlagzähigkeit ergibt sich ein etwas anderes Bild (Abbildung 17). Bei fast allen Entnahmerichtungen werden ohne Zusatz von Haftvermittler höhere Schlagzähigkeiten gemessen als nach der Optimierung der Haftung durch spezielle Additive. Dieses Phänomen ist auch aus der Fachliteratur bekannt. Die Schlagzähigkeit wird sowohl von der Festigkeit der Fasern, der Faserlänge und dem Fasergehalt als auch von der Haftung beeinflusst. Bei nicht optimaler Haftung und langen Verstärkungsfasern kann durch einen starken Faser-pull-out-Effekt bei schlagartiger Beanspruchung viel Energie absorbiert werden. Wenn nun durch Verbesserung der Haftung der Pull-out-Effekt verringert wird, führt das zu einer Abnahme der Schlagzähigkeit.

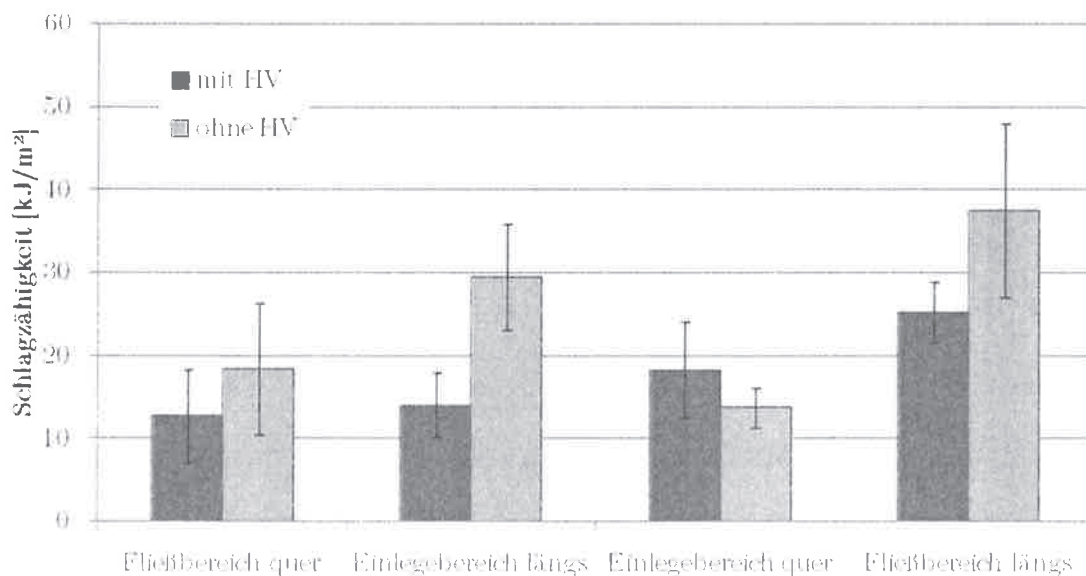


Abb. 17: Einfluss der Haftung auf die Schlagzähigkeit von PP/RCF30-Verbunden

6.3.3 Einfluss der Faserorientierungen auf die mechanischen Eigenschaften

Bei der Verarbeitung von Langfasern im LFT-D-Prozess können durch das Fließen der Schmelze im Werkzeug starke Faserorientierungen entstehen, die erhebliche Eigenschaftsunterschiede hervorrufen. Um dies Problematik zu untersuchen, wurden die Proben für die Werkstoffprüfung aus unterschiedlichen Bereichen der hergestellten Platten entnommen. Abbildung 18 zeigt die Zugfestigkeit von Proben aus dem Einlege- und Fließbereich in Abhängigkeit des Fasergehaltes.

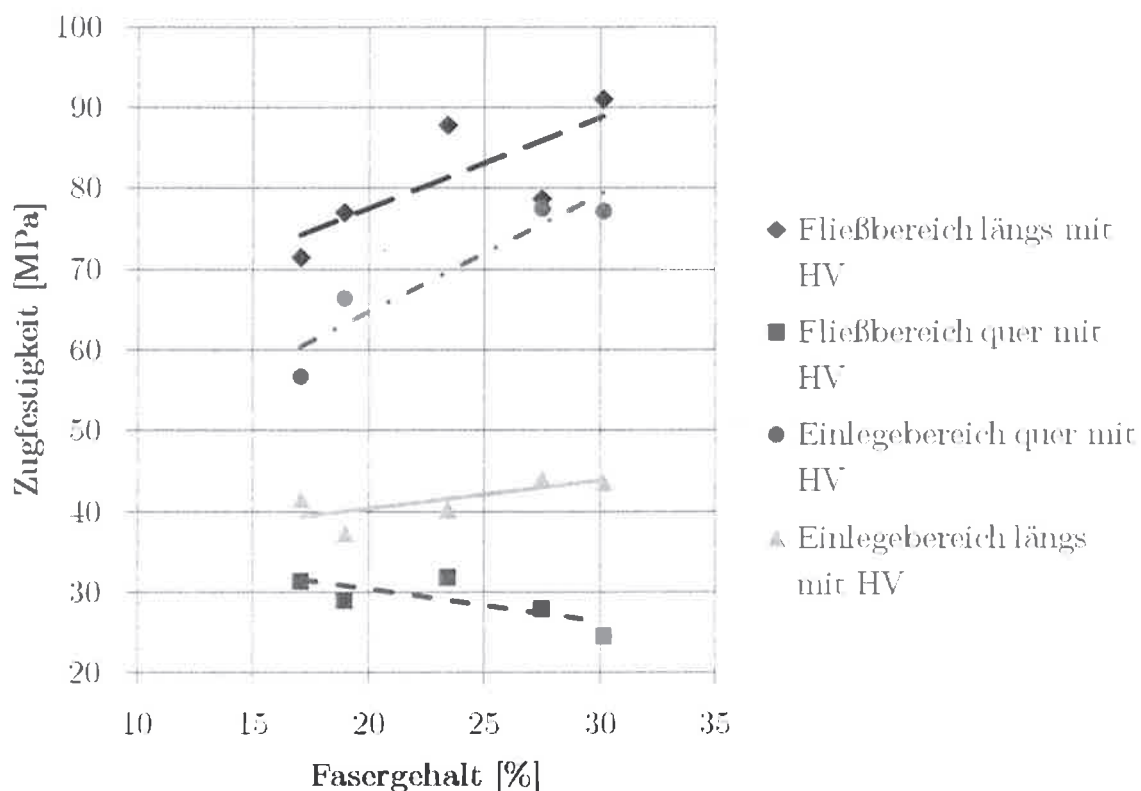


Abb. 18: Zugfestigkeit von PP/RCF-Verbunden in verschiedenen Entnahmerichtungen

Vergleicht man die Kennwerte aus dem Einlege- und dem Fließbereich, dann erkennt man recht große Unterschiede. Die absolut höchsten Zugfestigkeiten wurden im Fließbereich längs zur Faservorzugsorientierung ermittelt. Allerdings resultieren durch die starke Ausrichtung der Fasern im Fließbereich quer zur Faservorzugsorientierung dann auch sehr niedrige mechanische Eigenschaften, die sogar mit steigendem Fasergehalt noch abfallen. Quer zur Vorzugsrichtung der Fasern spielt die Haftung eine große Rolle, da praktisch nur die Grenzfläche geprüft wird. Das erklärt auch den Eigenschaftsabfall bei höheren Fasergehalten.

Im Einlegebereich sind die Eigenschaftsunterschiede längs und quer nicht so groß wie im Fließbereich, da die Fasern bevorzugt in zwei Richtungen (längs und quer) orientiert sind. An der Plattenoberfläche bleibt im Einlegebereich die Faserorientierung, die ursprünglich in dem extrudierten Strang vorlag, erhalten. Im Inneren dagegen, wo das Material noch heiß ist, kommt es zu fließbedingten Faserumorientierungen.

Die bei der Zugfestigkeit festgestellten Tendenzen sind auch beim E-Modul erkennbar. Die größten Eigenschaftsunterschiede liegen im Fließbereich vor, wobei es allerdings quer zur Fließrichtung mit steigendem Fasergehalt nicht zu einer Abnahme der Steifigkeit kommt.

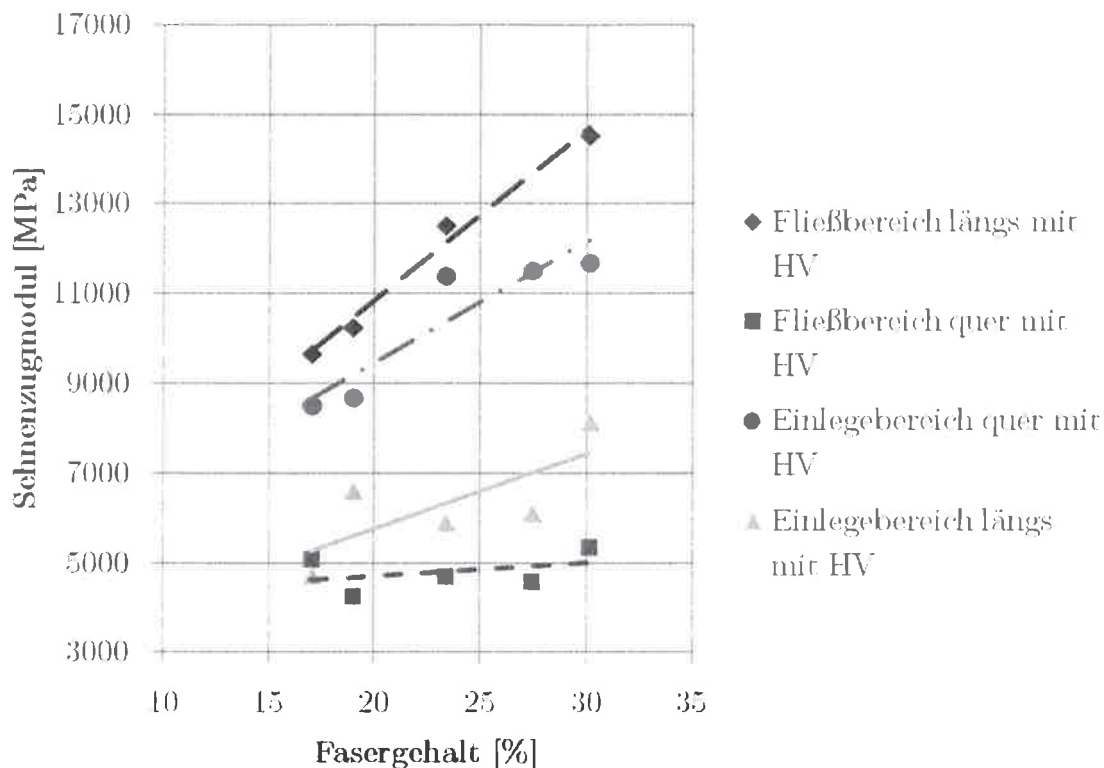


Abb. 18: Zug-E-Modul von PP/RCF-Verbunden in verschiedenen Entnahmerichtungen

Bei der Schlagzähigkeit zeigen sich interessanterweise die Eigenschaftsunterschiede in den verschiedenen Entnahmerichtungen nicht ganz so deutlich wie bei der Zugprüfung. Es bestätigt sich aber wieder, dass in Faserrichtung höhere Schlagzähigkeiten gemessen werden als quer zur Faservorzugsrichtung (Abbildung 19).

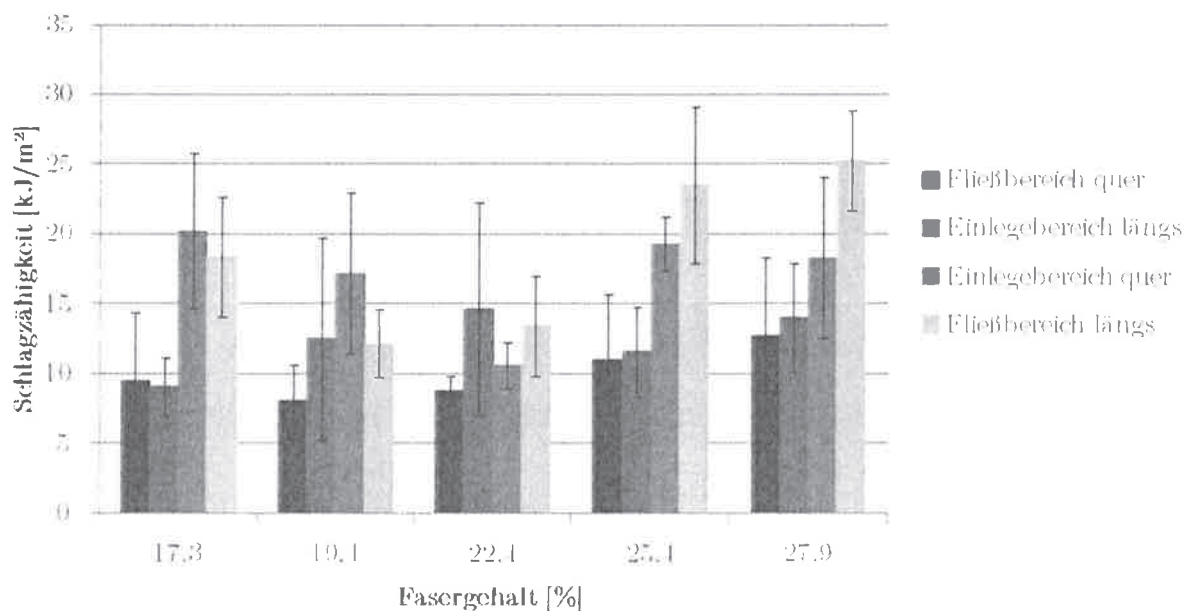


Abb. 19: Schlagzähigkeit von PP/RCF-Verbunden

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Zugprüfung konnte keine lineare Abhängigkeit der Schlagzähigkeit vom Fasergehalt festgestellt werden. Bei einigen Fasergehalten ist ein leichter Trend zu höheren Schlagzähigkeitswerten erkennbar. Möglicherweise haben bei der Schlagbiegeprüfung lokale Unterschiede des Fasergehaltes und der Faserverteilung in den Proben einen größeren Einfluss als bei der Zugprüfung.

Insgesamt bestätigen die Grafiken recht gut die im Kapitel 6.2 getroffenen Annahmen aus der Bestimmung der Faserorientierungen:

- Die größten Eigenschaftsunterschiede und Faserorientierungen treten im Fließbereich auf.
- Im Einlegebereich liegt eine zweidimensionale Faserorientierung vor, die zu geringeren Abweichungen der Kennwerte längs/quer führt.
- Mittelt man die Kennwerte der verschiedenen Entnahmerichtungen, dann ergibt sich im Einlege- und Fließbereich ein etwa gleiches Wertenniveau.

6.4 Verbundeigenschaften bei Einsatz von PA6-Matrix

6.4.1 Einfluss des eingesetzten Haftvermittlers

Da für die Herstellung von Strukturbauteilen auch Polyamid als potenzielles Matrixmaterial sehr interessant ist, wurden weitere Tests mit PA6-Matrix durchgeführt. Ziel der orientierenden Untersuchungen war die Bestimmung des Einflusses einer anderen Matrix auf das Verarbeitungsverhalten und die mechanischen Eigenschaften. Bei den Versuchen mit PA6-Matrix wurden sowohl Platten ohne Haftvermittler als auch unter Einsatz eines speziellen Masterbatches für PA6 hergestellt. Abbildung 20 zeigt die Zugeigenschaften von Proben aus verschiedenen Entnahmebereichen.

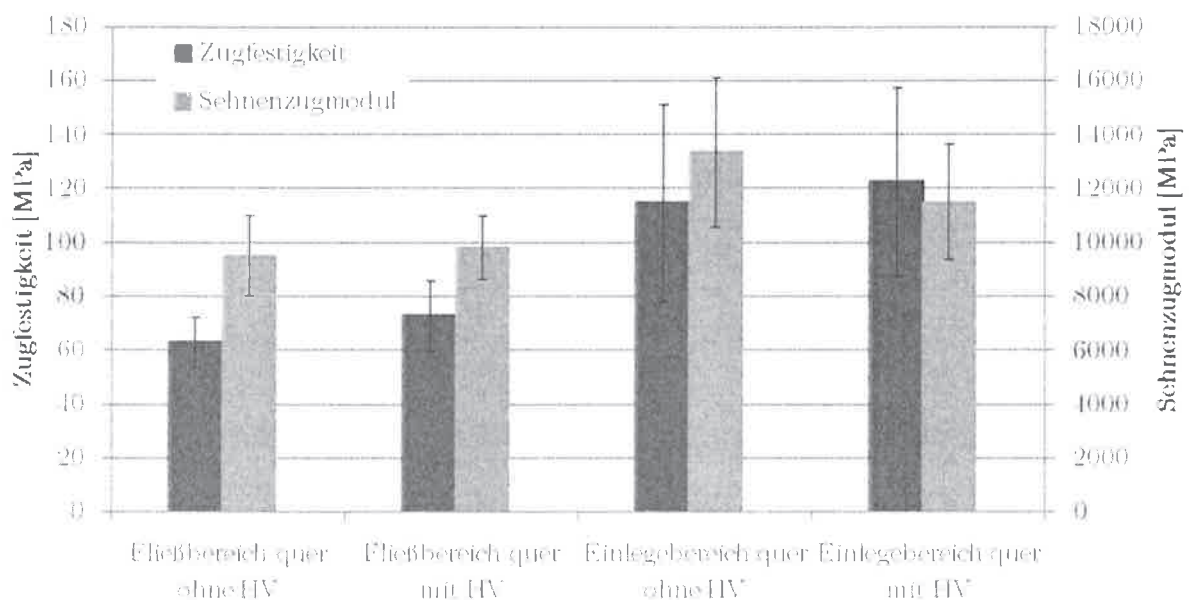


Abb. 20: Einfluss der Haftvermittlung auf die Zugeigenschaften von PA6/RCF-Verbunden

Aufgrund zu geringer Plattengröße konnten die Proben für den Zugversuch nur aus dem Einlege- und Fließbereich quer entnommen werden. Die Zugfestigkeiten des Einlegebereiches quer lassen aber darauf schließen, dass sich auch die Zugwerte im Fließbereich längs auf einem hohen Niveau befinden, weil die Faserorientierungen im Fließbereich längs noch höher sind als im Einlegebereich quer.

Die Zugfestigkeiten und –steifigkeiten konnten durch den Einsatz des Haftvermittler-Masterbatches nur geringfügig gesteigert werden. Aus früheren Versuchen mit PA6-Organoblechen war allerdings bereits bekannt, dass die Faser-Matrix-Haftung bei Einsatz von Polyamid recht gut ist, da die Kennwerte nahe an das Eigenschaftsniveau von Epoxidharzverbunden heranreichen. Inwieweit sich andere Eigenschaften wie die Stabilisierung gegen thermischen Abbau oder die Langzeitbeständigkeit durch die Zugabe des Haftvermittlers verbessern, konnte bei diesen Versuchen noch nicht geklärt werden.

Die Ergebnisse der Zugprüfungen wurden durch die Kennwerte aus dem Biegeversuch bestätigt (Abbildung 21). Aufgrund der kleineren Probekörper konnten beim Biegeversuch alle Entnahmerichtungen geprüft werden. Wie bereits vermutet, resultierten im Fließbereich längs die höchsten Festigkeiten und Steifigkeiten. Die Haftvermittlung führte allerdings nicht in allen Entnahmerichtungen zu einer Steigerung der Kennwerte.

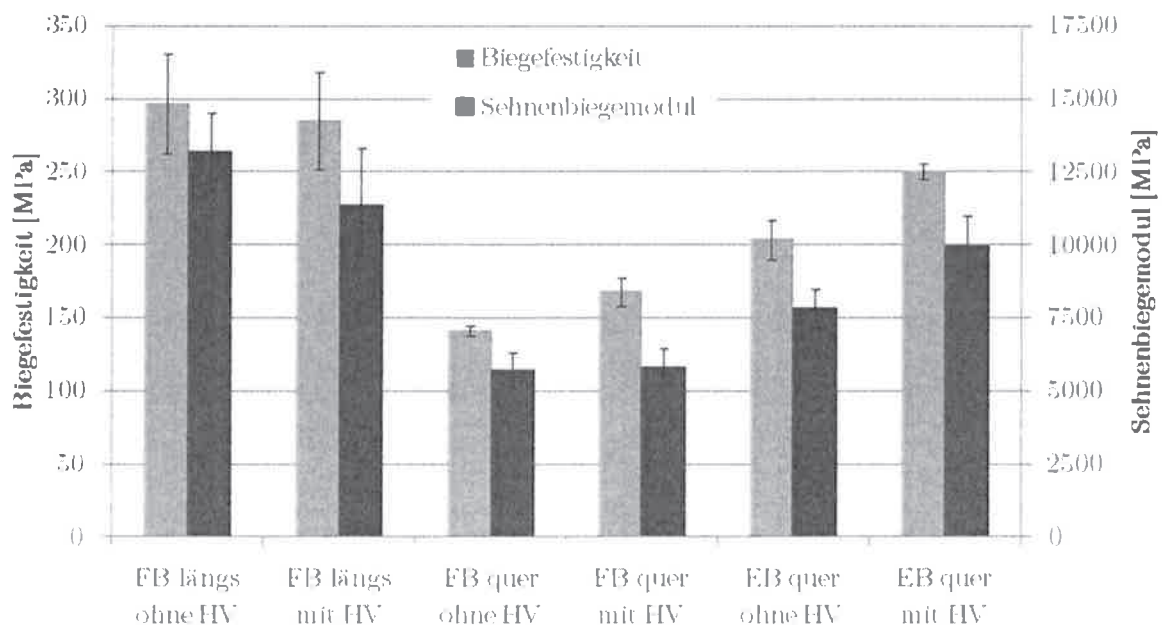


Abb. 21: Einfluss der Haftvermittlung auf die Biegeeigenschaften von PA6/RCF-Verbunden

6.4.2 Verbundeigenschaften in Abhängigkeit des Fasergehaltes

Nach Untersuchung des Einflusses der Haftvermittlung wurden auch aus den PA6-Verbunden Platten mit verschiedenen Fasergehalten gepresst und geprüft. Die dabei erzielten Ergebnisse sind in den Abbildungen 22-24 dargestellt. Entgegen der Theorie fällt die Zugfestigkeit mit steigendem Fasergehalt ab (Abbildung 22). Das kann möglicherweise auf eine nicht optimale Vermischung von Faser und Matrix zurückgeführt werden.

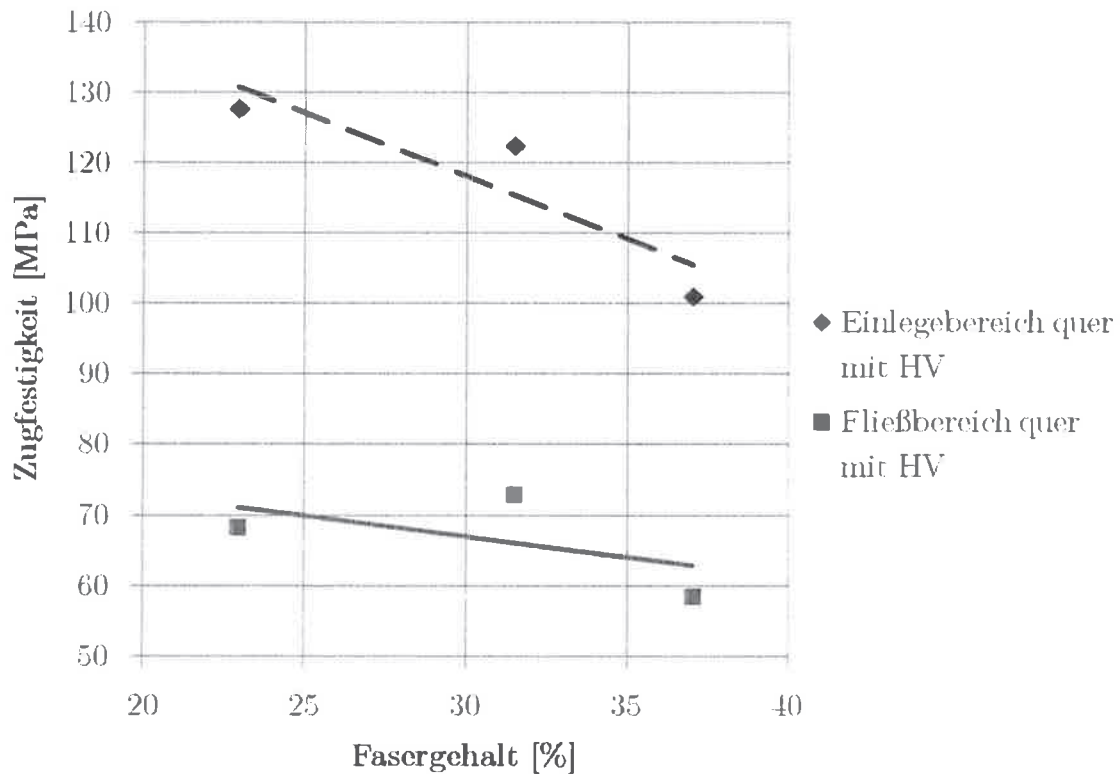


Abb. 22: Zugfestigkeit von PA6/RCF-Verbunden in Abhängigkeit des Fasergehaltes

Ein etwas anderes Bild zeigt sich bei den Biegewerten (Abbildungen 23 und 24).

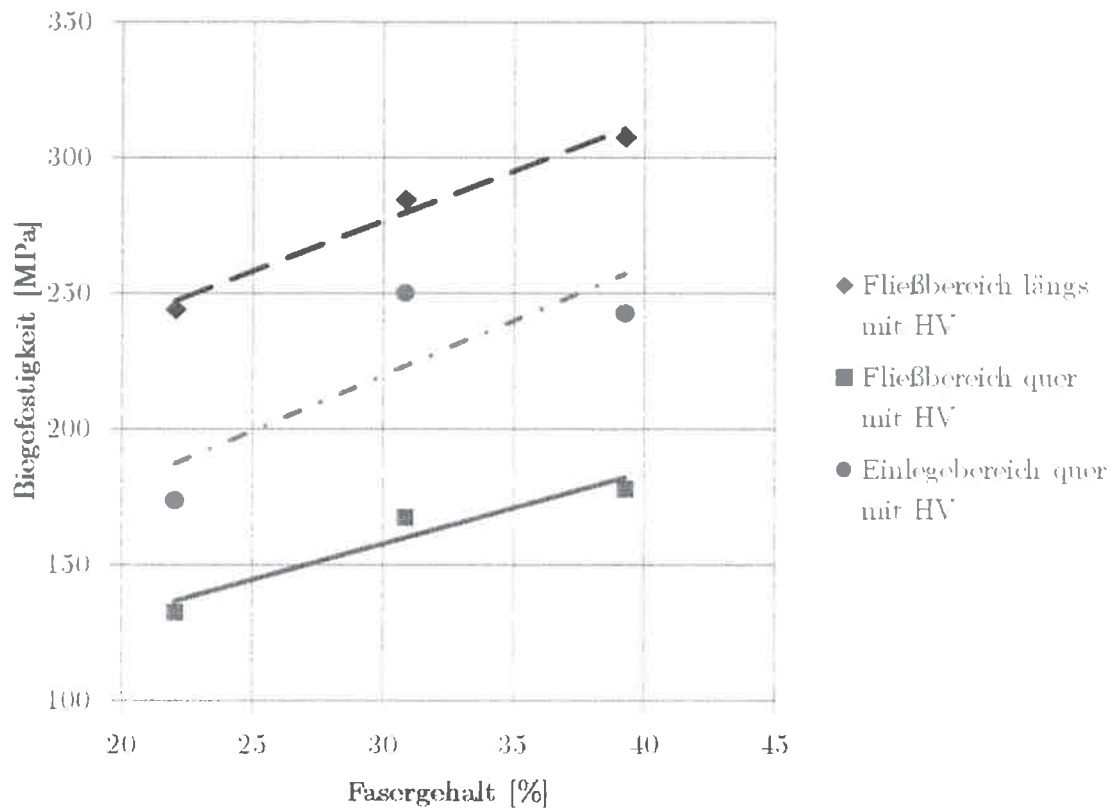


Abb. 23: Biegefestigkeit von PA6/RCF-Verbunden in Abhängigkeit des Fasergehaltes

Die Biegefestigkeit steigt in allen Entnahmerichtungen mit zunehmendem Fasergehalt linear an. Die höchsten mechanischen Kennwerte wurden wieder im Fließbereich längs geprüft. Beim Biege-E-Modul sind ähnliche Abhängigkeiten wie bei der Biegefestigkeit erkennbar (Abbildung 24). Allerdings streuen die Mittelwerte des Einlegebereiches quer sehr stark.

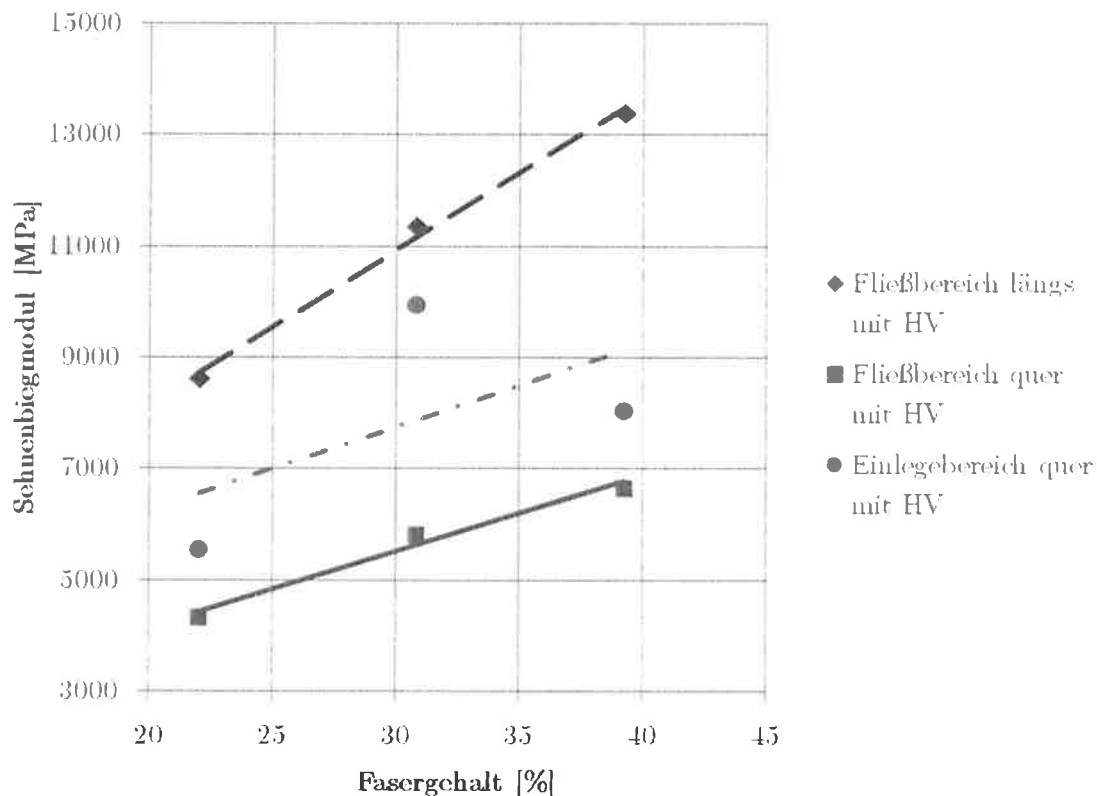


Abb. 24: Biegesteifigkeit von PA6/RCF-Verbunden in Abhängigkeit des Fasergehaltes

6.5 Gegenüberstellung der Verbundwerte mit PP und PA6-Matrix

Beim Eigenschaftsvergleich zwischen den Verbunden mit unterschiedlichen Matrixmaterialien wird deutlich, dass mit PA6-Matrix höhere mechanische Kennwerte erreichbar sind als bei Einsatz von PP. Das trifft sowohl auf die Festigkeiten als auch Steifigkeiten (Abbildungen 25 und 26) zu. Bei den PP-Verbunden ist erst mit geeigneten Haftvermittlern ein deutlicher Verstärkungseffekt durch die langen Recycling-Carbonfasern feststellbar. Die Verwendung des Haftvermittler-Masterbatches für PA brachte hingegen keine deutlichen Verbesserungen der mechanischen Kennwerte.

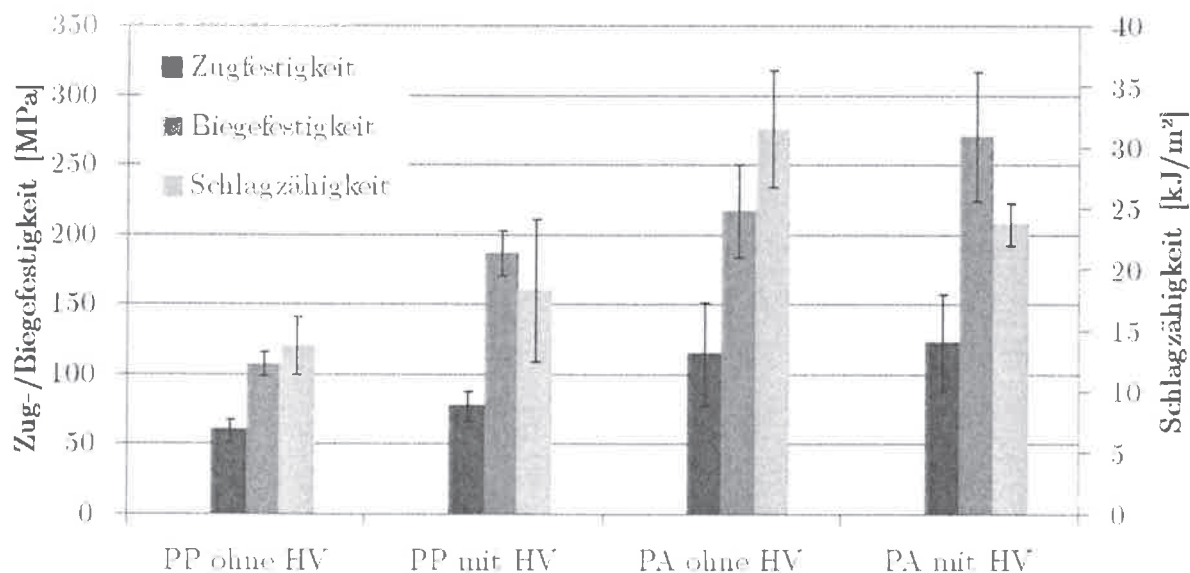


Abb. 25: Festigkeiten und Schlagzähigkeiten von PP/RCF- und PA6/RCF-Verbunden (Fließbereich längs, Fasergehalt ca. 30 Gew.-%)

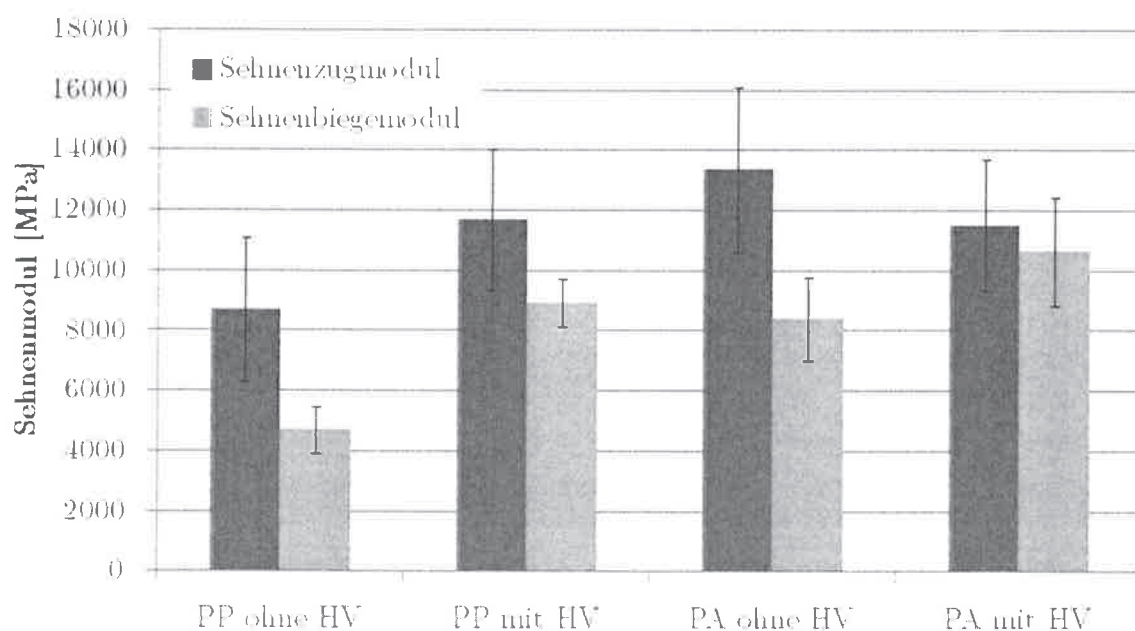


Abb. 26: Zug- Und Biegesteifigkeiten von PP/RCF- und PA6/RCF-Verbunden (Fließbereich längs, Fasergehalt ca. 30 Gew.-%)

Das Verarbeitungsverhalten bei der Direktverarbeitung von recycelten Carbonfasern mit dem Matrixmaterial PP kann als serientauglich bezeichnet werden. Bei den PA6-Verbunden müssen die Verarbeitungsbedingungen jedoch noch optimiert werden, um bessere Plattenqualitäten und eine weitere Steigerung der mechanischen Eigenschaften zu erzielen. So könnten zum Beispiel die Temperaturen im Plastifizierextruder und Mischextruder noch etwas erhöht oder ein PA6-Typ mit besseren Fließeigenschaften eingesetzt werden. Aus verarbeitungstechnischer Sicht wäre es auch von Vorteil die Verweilzeit im Extruder sowie die Temperaturen und Haltezeiten an der Presse anzupassen.

6.6 Eigenschaftsvergleich mit Konkurrenzmaterialien

Zur Bewertung des mit recycelten Carbonfasern im LFT-D-Prozess erzielten Eigenschaftsniveaus können konkurrierende Technologien wie z.B. das Spritzgießen oder auch RCF-Organobleche herangezogen werden. Unter Berücksichtigung, dass die Verarbeitung bei den PA6-Verbunden noch nicht optimal war, wurden zunächst ausschließlich die PP-Materialkennwerte zum Vergleich verwendet.

Die drei Technologien unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der erzielbaren Faserlängen. Im Spritzgießverfahren werden üblicherweise Granulate mit 2-3 mm Schnittlänge verwendet. Für Strukturanwendungen sind aber auch Langfasergranulate mit 10 mm Faserlänge im Einsatz. Durch die Scherwirkung der Schnecken kommt es im Spritzgießprozess zu einem erheblichen Abbau der Faserlänge, sodass im Bauteil in der Regel nur max. 1-2 mm lange Fasern vorliegen. Die Faservereinzelung und -verteilung ist allerdings bei gespritzten Verbunden sehr homogen.

Im LFT-D-Prozess können durch die faserschonende Plastifizierung größere mittlere Faserlängen von 20-30 mm erzielt werden. Das sollte sich auch in den mechanischen Eigenschaften widerspiegeln.

Die in Organoblechen erreichbaren Faserlängen sind nochmals deutlich größer als bei der Verarbeitung im LFT-D-Prozess. Durch die Einbringung von Gewebe- oder Gelegestrukturen sind sogar Endlosfaserverstärkungen möglich. Setzt man recycelte Carbonfasern für die Herstellung von Organoblechen ein, können Faserlängen von 30-80 mm resultieren. Das wirkt sich auch auf die mechanischen Verbundeigenschaften aus (Abbildung 27).

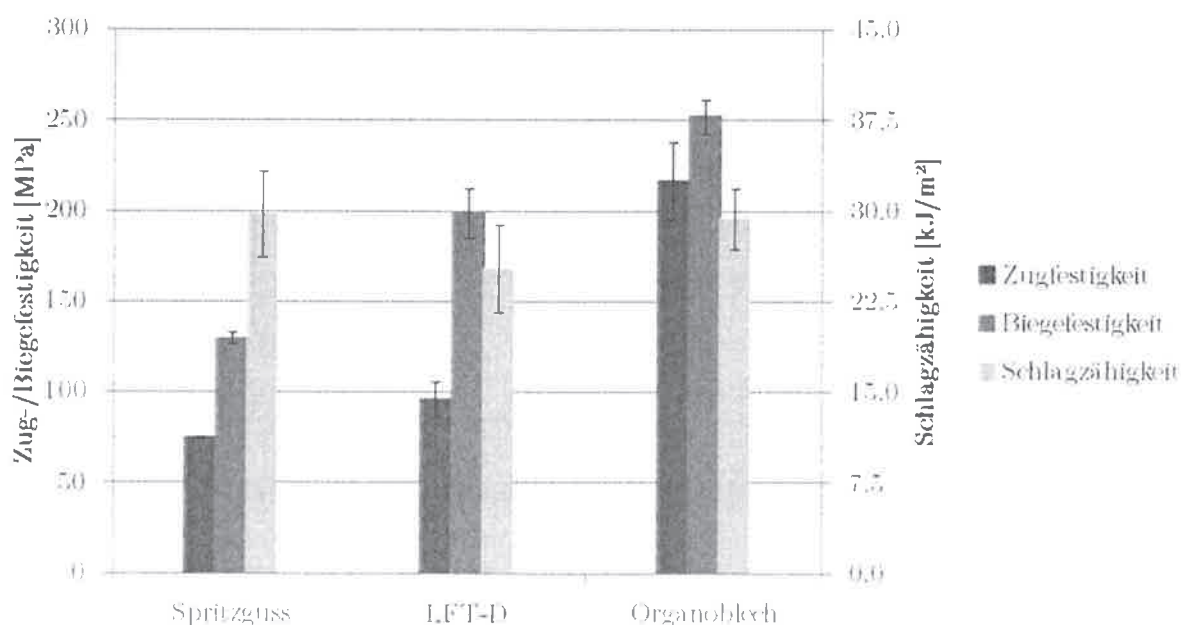


Abb. 27: Festigkeiten und Schlagzähigkeiten von verschiedenen PP/RCF-Verbunden (Fasergehalt ca. 30 Gew.-%)

Aufgrund der großen Faserlängen erreichten die Organobleche erwartungsgemäß die höchsten Festigkeiten, gefolgt von den LFT-D- und Spritzgussproben. Interessant sind allerdings die Effekte bei der Schlagzähigkeit. Trotz der sehr kurzen Faserlängen in den gespritzten Proben wurde im Vergleich zu den anderen Verfahren eine hohe Zähigkeit erreicht. Das kann derzeit noch nicht schlüssig erklärt werden und bedarf weiterer Untersuchungen.

Bei den Zug- und Biegesteifigkeiten ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Festigkeiten (Abbildung 28). Die Organobleche erreichen die höchsten Steifigkeiten gefolgt von den Proben aus dem LFT-D- und Spritzgießprozess.

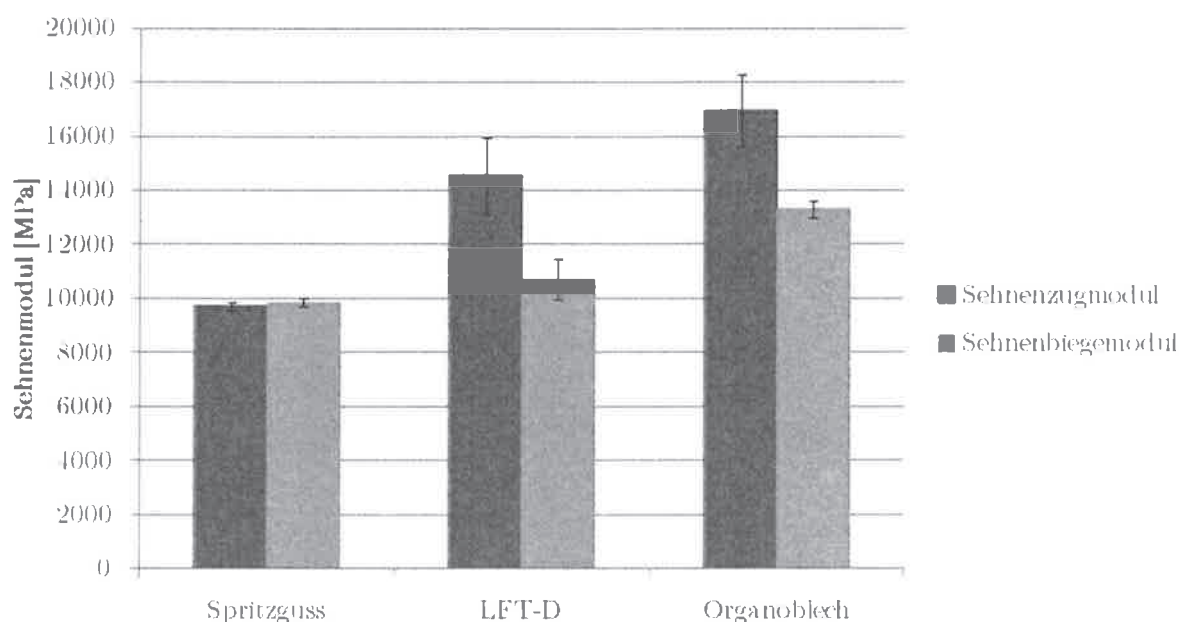


Abb. 28: Zug- und Biegesteifigkeiten von verschiedenen PP/RCF-Verbunden (Fasergehalt ca. 30 Gew.-%, mit Haftvermittler)

Unter optimalen Verarbeitungsbedingungen sollten sich im LFT-D-Prozess ähnliche Eigenschaften wie mit Organoblechen aus recycelten Carbonfasern erreichen lassen. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass die Verbundeigenschaften stark richtungsabhängig sein können, da sich die Verstärkungsfasern bevorzugt in Fließrichtung der Schmelze orientieren. Bei der Belegung des Werkzeuges ist das zu beachten.

6.7 Herstellung von Demonstrationsbauteilen

Die Herstellung von Demonstrationsbauteilen erfolgte sowohl im TITK als auch bei einem Industriepartner unter praxisnahen Bedingungen. Im TITK wurde das Versuchswerkzeug mit Rippenstruktur eingesetzt. Die extrudierten Materialstränge mit Fasergehalten von 20 und 30 Gew.-% wurden längs in die Pressform eingelegt und mit maximaler Schließkraft verpresst. Dabei fließt das Matrixmaterial bevorzugt in Längsrichtung der eingelegten Stränge, sodass Platten mit hohen Faserorientierungen resultieren. Die im Werkzeug enthaltenen Längs- und Querrippen konnten bei Wandstärken von 2-3 mm gut ausgefüllt werden. Bei entsprechend hoher Belegung des Werkzeuges konnte eine vollständige Formfüllung erreicht werden (siehe Abbildung 29).



Abb. 29: Demonstrationsbauteil mit Verrippungen

Bei den Pressversuchen in der Industrie wurden auf einer Serien-LFT-D-Anlage ebenfalls Plastifikate mit Fasergehalten von 20-30 Gew.-% erzeugt und nachfolgend verpresst. Dazu wurde ein dort vorhandenes Versuchswerkzeug eingesetzt. Auch bei diesen Versuchen konnten positive Ergebnisse erzielt werden, welche die im TITK ermittelten Werte bestätigen.

7 Zusammenfassung

Gegenstand des Forschungsvorhabens waren Werkstoff- und Verfahrensentwicklungen für die Herstellung von thermoplastischen Carbonfaserverbunden im LFT-D-Prozess. In einem ersten Schritt wurden dazu von einem Hersteller von Carbonfasern und textilen Halbzeugen, trockene Produktionsabfälle aus der Verbundfertigung beschafft und mit Hilfe eines im TITK entwickelten Recyclingprozesses aufgeschlossen. Die resultierenden Fasern wurden geprüft und hinsichtlich der Eignung für den Einsatz im LFT-D-Prozess bewertet. Die Faserfestigkeit der recycelten Carbonfasern liegt im Vergleich zum Kennwerteniveau von Primärfasern bei ca. 85-90% und ermöglicht eine Wiederverwertung bei der Herstellung von Langfaserverbunden.

Zur Gewährleistung einer kontinuierlichen Dosierung der Recyclingfasern an der LFT-D-Anlage wurden aus dem losen Fasermaterial gering verfestigte Fasergelege mit einer speziellen Vlieslegetechnologie erzeugt. Die Vliese wurden an der LFT-D-Anlage getestet und für die Einstellung verschiedener Fasergehalte in Streifen mit definierter Breite geschnitten. In einem weiteren Schritt folgten kontinuierliche Verarbeitungsversuche wobei die Prozessbedingungen für die Herstellung von Verbunden mit PP und PA6-Matrix optimiert wurden.

Für die Herstellung von Demonstrationsbauteilen wurde ein Fließpresswerkzeug mit Rippenstruktur konstruiert und gefertigt. Mit dem Versuchswerkzeug wurden Platten mit verschiedenen Wanddicken gepresst. Es konnten Fasergehalte von 20-40 Gew.-% eingestellt werden. Die Verbunde wurden hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften geprüft. Die besten Verbundeigenschaften resultierten bei Fasergehalten von 20-30 Gew.-%. Zur Optimierung der Faser-Matrix-Haftung wurden ausgewählte Haftvermittler getestet. Bei den PP-Verbunden konnten dadurch die mechanischen Eigenschaften deutlich verbessert werden. Bei PA6-Matrix wurden durch die Haftvermittlung keine signifikanten Effekte erzielt.

Die mechanischen Eigenschaften der Verbunde aus dem LFT-D-Prozess liegen zwischen den Kennwerten von gespritzten Carbonfaserverbunden und Organoblechen aus Recyclingfasern. Die Eigenschaften sind stark abhängig von der Faserorientierung und somit auch der Belegung des Werkzeuges. Zur Umsetzung der grundlegenden Untersuchungen wurden sowohl im TITK als auch bei einem Industriepartner Musterteile mit 3-D-Geometrie hergestellt. Es wurde der Nachweis erbracht, dass bei entsprechender Aufbereitung des Fasermaterials eine kontinuierliche Verarbeitung von recycelten Carbonfasern im LFT-D-Prozess möglich ist. Die Forschungsarbeiten konnten erfolgreich abgeschlossen werden und ermöglichen die praktische Umsetzung des Verfahrens.

III Bewertung der erzielten Ergebnisse und Gegenüberstellung mit den Zielsetzungen

In dem Projekt wurden grundlegende Werkstoff- und Verfahrensentwicklungen für die Herstellung von Carbonfaser-Verbundbauteilen im LFT-Direktprozess durchgeführt. Verglichen mit den geplanten Entwicklungszielen konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

Beschaffung und Prüfung von Carbon-Recyclingmaterialien

Für die LFT-D-Versuche wurden verschiedene Ausgangsmaterialien (C-Faser-Primärmaterial, Restspulen, Gewebereste, Gelegereste) beschafft, vorsortiert und hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften geprüft.

Aufschluss der unterschiedlichen Recyclingmaterialien

Das Recycling der Carbonfasern erfolgte mit einer im TITK entwickelten modifizierten Mühlentechnik in drei Schritten:

1. Grobzuschnitt der CF-Reststoffe
2. Schneiden von Chips
3. Mühlenbehandlung und Entstaubung

Für die weiteren Versuche wurden Gelegeabfälle eingesetzt (stehen in großen Mengen zur Verfügung).

Herstellung von Fasergelegen zur definierten Zuführung im LFT-D-Prozess

Um eine kontinuierliche Dosierung der recycelten Fasern im LFT-D-Verfahren zu ermöglichen, wurden aus den Recyclingfasern Vliese mit verschiedenen Flächenmassen hergestellt, verfestigt und auf definierte Breiten zugeschnitten. In den Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die mechanische Verfestigung als auch die thermische Verfestigung (bei Einsatz von Bindefasern) möglich sind.

Konstruktion, Bau und Test eines Versuchswerkzeuges für die LFT-D-Verarbeitung

Es wurde ein Versuchswerkzeug mit praxisrelevanter Bauteilgeometrie konstruiert. Das Werkzeug ist als Tauchkantenwerkzeug mit unterschiedlichen Radien, Verrippungen und ebenen Bereichen ausgelegt und passt auf eine im TITK vorhandene Laborpresse. Das Werkzeug konnte erfolgreich getestet und in Betrieb genommen werden.

Direktverarbeitung der Fasergelege im LFT-D-Prozess, Werkstoffprüfung

Die Faservliese wurden über einen speziellen Fasereinzug direkt der im TITK vorhandenen LFT-D-Anlage zugeführt. Als Matrixmaterialien kamen PP und PA6 zum Einsatz. Der Fasergehalt wurde in den Grenzen von 20 bis 40 Gew.- % variiert. Aus den Plastifikaten wurden ebene Platten mit 2 mm Dicke gepresst und nachfolgend hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften geprüft.

Optimierung der Prozessbedingungen im LFT-D-Prozess

Ziel der Parametervariation war die Bestimmung eines geeigneten Prozessfensters für die Verarbeitung von recycelten Carbonfasern im LFT-D-Prozess. Es wurden folgende Größen untersucht und optimiert:

- Flächenmasse der Faservliese
- Prozesstemperaturen im LFT-D-Prozess
- Schneckendrehzahl des Doppelschneckenextruders
- Durchsatz (Leistungsfähigkeit in kg/h)
- Fasergehalt des Plastifikates

Bestimmung des Fließverhaltens der carbonfaserhaltigen Plastifikate

Die Bestimmung des Fließverhaltens der carbonfaserverstärkten Plastifikate erfolgte mit dem dazu gefertigten Versuchswerkzeug. Es zeigte sich, dass praktikable Fließwege und eine Füllung der Rippenstruktur nur mit gut fließfähigen Matrixmaterialien und Fasergehalten von 20-30 Gew.-% erzielt werden konnten. Höhere Fasergehalte führen zu Faseragglomeraten und nicht vollständiger Formfüllung.

Untersuchungen zur Faser-Matrix-Haftung

Zur Optimierung der Haftung zwischen den eingesetzten Matrixmaterialien und den Recyclingcarbonfasern wurden Masterbatchvarianten für PP und PA6-Matrix getestet. Bei den Polyamidverbunden konnten keine deutlichen Eigenschaftsverbesserungen erzielt werden. Hier ist die Faser-Matrix-Haftung bereits recht gut. Deutlichere Effekte wurden bei den PP-Verbunden mit dem Einsatz von Maleinsäureanhydrid erreicht.

Herstellung und Prüfung von Demonstrationsbauteilen mit Recycling-Carbonfasern

Die Herstellung von Demonstrationsbauteilen erfolgte sowohl im TITK als auch in der Industrie. Im TITK wurde das im Rahmen des Projektes gefertigte Versuchswerkzeug eingesetzt. Bei einem Industriepartner des TITK wurden auf einer Serienanlage erste Teile für Anwendungen im Automobilbereich hergestellt. Die Versuche waren erfolgreich und zeigten die Umsetzbarkeit des Prozesses.

Prozessbeschreibung, Erstellung von Datenblättern/Berichtslegung

Die wichtigsten Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden in einer Prozessbeschreibung und dem Abschlussbericht zusammengestellt. Die ausführliche Darstellung aller Versuchsergebnisse ist in einer projektbegleitenden Bachelorarbeit enthalten [41].

IV Wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse, aktualisierter Verwertungsplan

Zielgruppen, Anwendungsbereiche

Aus ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten wird der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen (vor allem CFK) in der Automobilindustrie in den nächsten Jahren stark zunehmen (Abbildung 30). Um die angestrebten Ziele (Verringerung des Kraftstoffverbrauches und der CO₂ Emissionen) zu erreichen, sind konsequente Leichtbauweisen erforderlich. Das gilt auch für die Entwicklung von Elektroautos. Damit das Mehrgewicht der Batterien kompensiert werden kann, müssen bezahlbare Leichtbaustrukturen in Serienanwendungen realisiert werden. Dabei wird vor allem die intelligente Mischbauweise (Multi Material Design) zukünftig eine große Rolle spielen. Bei einer Vielzahl von Bauteilen wie z.B. Frontends werden derzeit noch kurzfaserverstärkte Kunststoffe oder LFT-Materialien mit Glasfaserverstärkung eingesetzt. Hier ergibt sich aber auch ein großes Potenzial für CFK-Strukturen, wenn es gelingt, die Taktzeiten bei der Bauteilherstellung zu verkürzen und die Kosten zu senken.

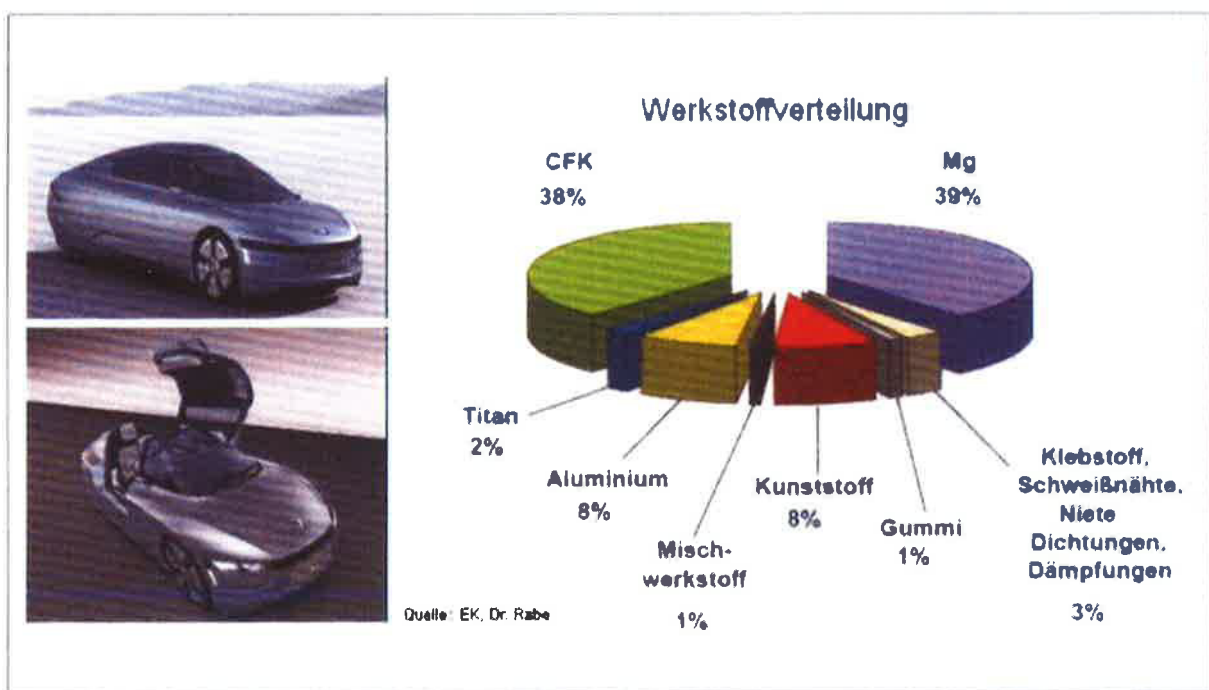


Abb. 30: Werkstoffverteilung bei Anwendung konsequenter Leichtbauweise [42]

Aus diesem Grund wird vor allem an der Entwicklung der Fertigungsverfahren gearbeitet. An dieser Stelle kann das geplante Forschungsvorhaben einen wesentlichen Beitrag leisten, da einerseits die Möglichkeit besteht, Recyclingmaterialien wieder bei der Verbundherstellung einzusetzen und andererseits die Zykluszeit bei der Herstellung von CFK-Bauteilen deutlich abzusenken. Aus diesem Grund werden die Erfolgsaussichten für das geplante Forschungsvorhaben als sehr positiv eingeschätzt.

Marktsituation, Marktentwicklung

Die Charakterisierung der Marktgröße kann einerseits anhand der Marktsituation für Verbundwerkstoffe erfolgen, muss aber auch im Zusammenhang mit den aktuell in der Automobilindustrie zu beobachtenden Trends in Deutschland und Europa gesehen werden.

Die Gesamtmenge der produzierten faserverstärkten Kunststoffe liegt aktuell bei über 1 Mio. Tonnen pro Jahr [43] (siehe Tabelle 8). Davon nimmt das Segment GMT/LFT (incl. LFT-D-Verarbeitung) mit einem Anteil von ca. 100.000 t/Jahr etwa 10 % ein. Diese Menge wird allerdings fast ausschließlich mit glasfaserverstärkten Kunststoffen umgesetzt.

Tabelle 8: GFK-Produktionsmengen in Europa [43] * geschätzt

	2013*	2012	2011	2010	2009
	Kt	Kt	Kt	Kt	Kt
SMC	184	188	198	198	160
BMC	71	70	69	69	56
Sum SMC/BMC	255	258	267	267	216
Hand lay-up	142	145	160	160	123
Spray-up	90	90	98	92	74
Sum Open mould	232	235	258	252	197
RTM	126	120	120	113	94
Sheets	84	78	77	72	56
Pultrusion	47	47	51	47	39
Sum Continuous processing	131	125	128	119	95
Filament winding	78	80	86	82	69
Centrifugal casting	66	67	69	66	55
Pipes and Tanks	144	147	155	148	124
GMT/LFT	114	108	105	100	75
Others	18	17	16	16	14
Sum	1.020	1.010	1.049	1.015	815

Der Markt für carbonfaserverstärkte Kunststoffe ist wesentlich kleiner. Die Gesamtmenge der weltweit produzierten Carbonfasern liegt nur bei ca. 110.000 t pro Jahr [2, 43]. Allerdings werden mit CFK-Materialien hohe Umsätze erzielt, da die Preise für Carbonfasern mit über 20 €/kg Fasermaterial sehr hoch sind. Der Gesamtumsatz der Branche beträgt ca. 5,8 Mrd. € und ist in den letzten Jahren um mehr als 7% gewachsen [43].

Aufgrund der Themen wie generelle Gewichtsreduktion, CO₂-Flottenausstoß-Strafzahlungen, Leichtbau, E-Mobilität, Druckbehälter für Gasautos, die momentan den Automotive-Bereich dominieren, wird dieser nach wie vor als größter Treiber und Zukunftsmarkt für CF bzw. CFK gesehen. 2012 wurden in diesem Segment rund 2150 t CF eingesetzt. Die Analysten rechnen bei diesem Segment mit einem jährlichen Wachstum von ca. 34%.

Diese Steigerungen sind auch nur deshalb möglich, da man von einem doch relativ niedrigen Niveau aus startet. Für 2020 sollen somit rund 23.000 t CF in diesem Bereich eingesetzt werden. Dies würde auch bedeuten, dass bis 2020 dieses Marktsegment vom Kleinmengensegment zu den Top 3 aufsteigen wird. CF-Mengen, die für CNG-Autotanks eingesetzt werden, sind bei dieser Betrachtung noch nicht enthalten. Die Fachwelt ist sich allerdings einig, dass dieses Szenario nur dann zum Tragen kommen wird, wenn im Automotive-Bereich die Kosten für CFK-Bauteile auf ein Niveau von ca. 20 - 30 €/kg Bauteilgewicht sinken. Potentiale zur Kostenreduktion werden beim Materialeinsatz (bis zu 50 % gegenüber 2010) und beim Bauteilherstellprozess (bis zu 90 % gegenüber 2010) gesehen. Wenn die angenommenen Kostenreduktionspotenziale gehoben werden können, sollten die Preisvorstellungen der OEM durchaus erreichbar sein. Dem Durchbruch zur großtechnischen Serienfertigung von CFK-Werkstoffen sollte dann nichts mehr im Wege stehen [43].

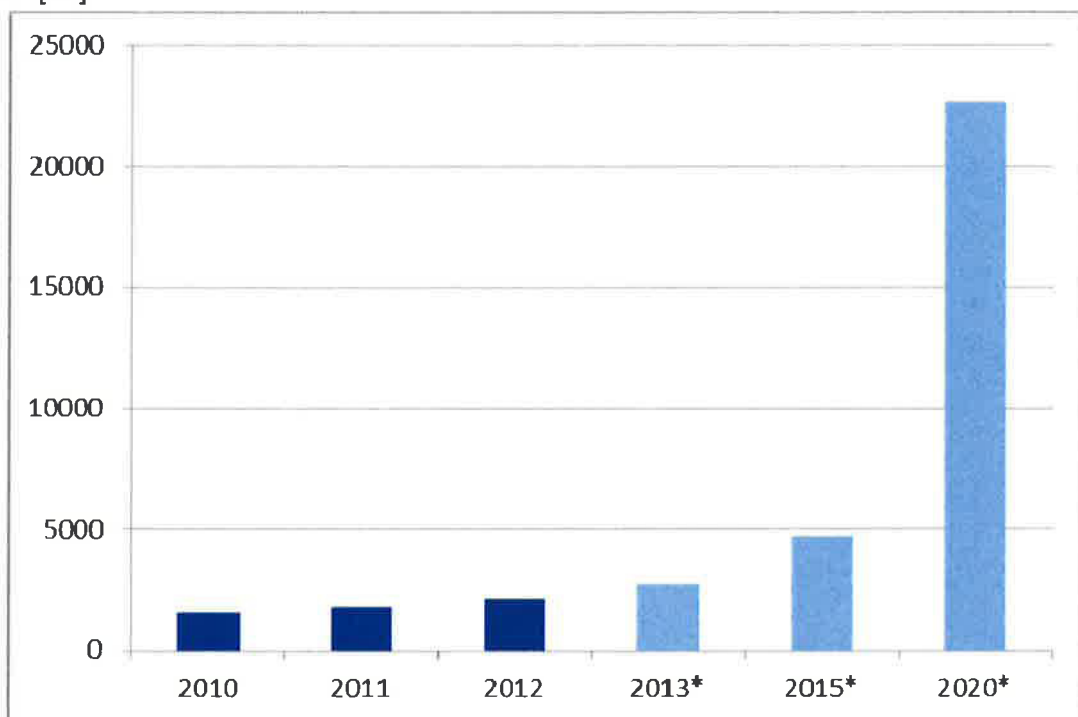


Abb. 31: Marktentwicklung bei CFK-Verbunden für die Automobilindustrie [43] * geschätzt

Die möglichen Marktanteile für Anwendungen in der Automobilindustrie sind aktuell noch sehr schwer abschätzbar, da sich dieser Bereich im Moment erst entwickelt und - außer bei Nischenanwendungen und im Rennsport - praktisch noch keine nennenswerten Mengen im Markt sind. Ein Vorreiterprojekt ist das Joint Venture von BMW und SGL-Carbon zur Herstellung von Strukturkomponenten für das „Megacity-Vehicle“, einem Elektroauto in CFK-Bauweise. Bei diesem Projekt werden erstmals CFK-Bauteile in größeren Serien hergestellt und verarbeitet. Im günstigsten Fall könnte bei der CFK-Herstellung der Marktanteil der LFT-Verbunde ähnlich wie bei den Glasfaserverbunden in eine Größenordnung von 5-10% des Gesamtmarktes kommen. Realistisch gesehen könnte man mit ersten Anwendungen zunächst einen Umsatz von 3 bis 5 Mio. € erwarten.

Marketing- und Vertriebskonzeption

Im Bereich der CFK-Industrie laufen im Zusammenhang mit der zunehmenden Anwendung dieser Werkstoffe in der Automobilindustrie umfangreiche Arbeiten zur Lösung des Recyclingproblems, zur Entwicklung von thermoplastischen CFK-Verbunden und der Verringerung der Zykluszeiten bei der Bauteilherstellung. Die Entwicklung eines Verfahrens zur direkten Verarbeitung von Stapelfasern (Recycling oder Neuware) im LFT-D-Prozess kann dabei einen wichtigen Beitrag leisten. Insbesondere durch den hochwertigen Wiedereinsatz von Carbonfasern und die nahezu abfallfreie Bauteilherstellung in einem Direktprozess können die Produktionskosten gesenkt werden. Der Ergebnistransfer ist in folgenden Schritten geplant:

- Vermarktung durch direkte Industriekontakte (Röchling Automotive, Weber-Fibertech)
- Veröffentlichungen in Fachzeitschriften der Kunststoffbranche
- Vorträge auf international bekannten Tagungen
- Präsentationen im Technikum des TITK
- Kurzveröffentlichung auf der Internetseite des TITK
- Vorstellung von Demonstrationsbauteilen auf Fachmessen

Ein direkter Transfer der Forschungsergebnisse ist vor allem durch die enge Zusammenarbeit mit namhaften Industriepartnern im Rahmen der Projektbearbeitung sichergestellt. Das ermöglicht eine schnelle Einführung der neuen Verfahrenstechnik in die industrielle Praxis.

Umsatzerwartungen (TITK und Drittunternehmen)

Aus den dargestellten Prognosen und deren Auswirkungen auf das TITK ergeben sich folgende kalkulierte Umsätze:

Für das TITK werden folgende wirtschaftliche Effekte mit der Bearbeitung des Forschungsvorhabens erwartet (Tabelle 9):

Tabelle 9: Wirtschaftliche Effekte im TITK (aktualisiert)

Aktivität des TITK	Geschätzter Anteil, der mittel/unmittelbar auf Projektergebnissen beruht	TITK Umsatz €/Jahr 1. Jahr nach Projektende	TITK Umsatz €/Jahr 2.-5. Jahr nach Projektende
Zusammenarbeit mit Industriepartnern im Rahmen geförderter FuE	<i>ursprünglich</i> 100 % aktualisiert 100 %	<i>ursprünglich</i> 35.000 aktualisiert 30.000	<i>ursprünglich</i> 100.000 aktualisiert 100.000
Direkteinnahmen aus FuE zur Direktverarbeitung von Carbonfasern	75 %	35.000	50.000
Prüfaufträge zur Testung unterschiedlicher Carbonfasern	50 %	20.000	35.000
Lizenzeeinnahmen	im Moment nicht abschätzbar		
Kosteneinsparungen	im Moment nicht abschätzbar		

Bei externen Unternehmen werden durch die Bearbeitung des Forschungsvorhabens folgende wirtschaftliche Effekte erwartet (Tabelle 10):

Tabelle 10: Wirtschaftliche Effekte in externen Unternehmen (aktualisiert)

Kosteneinsparungen bei Anwendern nach Art und Umfang	Geschätzter Anteil, der auf Projektergebnissen beruht	Extern Umsatz €/Jahr 1. Jahr nach Projektende	Extern Umsatz €/Jahr 2.-5. Jahr nach Projektende
Einsparung von Material- und Prozesskosten	75 %	150.000	>500.000
Reduzierung und Wiederverwertung von Produktionsabfällen	75 %	180.000	>500.000
Reduzierung der Energiekosten	im Moment nicht abschätzbar		
Umwelteffekte durch Abfallminimierung	im Moment nicht abschätzbar		

Technologietransfer

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeiteten Ergebnisse werden vom TITK zunächst auf nationaler und internationaler Ebene in Fachvorträgen und auf Messen vorgestellt und nachfolgend durch Veröffentlichungen in Fachzeitschriften publiziert.

Der Know-how-Transfer erfolgt über die Kette Forschungsinstitut (TITK)→ Carbonfaserhersteller/Vlieshersteller (SGLACF)→ Bauteilhersteller (Röchling Automotive, Weber Fibertec) und Endanwender (SGL, BMW u.a.) Es entsteht ein unmittelbarer Nutzen in mehreren Industriezweigen.

Der Nutzen für die klein- und mittelständischen Unternehmen entsteht vor allem bei Vlies- und Bauteilherstellern in der Zulieferindustrie. Die Anwendung der entwickelten Technologien kann in verschiedenen Industriezweigen (Textilindustrie, Kunststofftechnik, Autoindustrie) erfolgen.

V Bewertung des aktualisierten Verwertungsplans, Vergleich zum Ursprungskonzept

Der aktualisierte Verwertungsplan lässt eine erfolgreiche Umsetzung der Forschungsergebnisse erwarten. Die Verwertung der Forschungsergebnisse erfolgt in Zusammenarbeit mit Industriepartnern wie SGLACF, Röchling Automotive, Weber Fibertec und BMW.

Die Firma SGLACF wendet bereits das im TITK entwickelte Recyclingverfahren im industriellen Maßstab an und setzt recycelte Carbonfasern wieder bei der Herstellung von Gelegekomplexen für automobiler Anwendungen ein. SGLACF kann Vliese für verschiedene Anwendungen herstellen und ist damit das erste Unternehmen in der Verwertungskette. Die Firmen Röchling Automotive und Weber Fibertec sind Zulieferer in der Automobilindustrie und verfügen über die Anlagentechnik zur Verarbeitung von Carbonfasern im LFT-D-Verfahren. Mit dem im TITK entwickelten Know-how kann bei diesen Firmen die direkte Umsetzung der Forschungsergebnisse erfolgen. Die Firma BMW setzt bereits bei einigen neuen Fahrzeugmodellen recycelte Carbonfasern zur Herstellung von Bauteilen ein. Es besteht großes Interesse an der Anwendung des LFT-D-Verfahrens, da es ein sehr kostengünstiges Verfahren zur Herstellung von Strukturbauteilen ist. Durch all diese Kontakte ist eine schnelle Marktdurchdringung und industrielle Anwendung der Forschungsergebnisse möglich.

Der aktualisierte Verwertungsplan weicht in den wesentlichen Punkten nicht vom ursprünglich angenommenen Verwertungskonzept ab und wird zu den geplanten Vermarktungseffekten führen.

VI Angaben zu Schutzrechten für Vorhabensergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden keine Schutzrechte, die in direktem Zusammenhang mit den Entwicklungsergebnissen stehen, beantragt oder erteilt.

VII Zusammenstellung der erfolgten und geplanten Veröffentlichungen

Nach Abschluss der Projektarbeiten sind folgende Veröffentlichungen erfolgt bzw. in Vorbereitung:

- Kurzveröffentlichung auf der Website des TITK
- Veröffentlichung in der Fachpresse (Plastverarbeiter)
- Vorstellung der Ergebnisse bei den Industriepartnern des TITK
- Präsentation der Entwicklung auf Fachmessen (Materialica, JEC)

VIII Danksagung

Wir danken der EuroNorm GmbH für die finanzielle Förderung des Vorhabens Nr. MF 110086 welche als Zuwendung im Rahmen der Forschung und Entwicklung bei Wachstumsträgern in benachteiligten Regionen (INNO-WATT) erfolgte.

IX Literaturverzeichnis

- [1] Stewart, R.:
Carbon fibre composites poised for dramatic growth
Reinforced plastics 5/2009, S. 16-21
- [2] Schult, K.:
Wohin geht es mit den Faserkapazitäten, Produkten und Entwicklungstrends?
Lightweightdesign 1/2010, S. 20-25
- [3] Brady, M.:
Automotive composites: Wich way are we going?
Reinforced plastics 11/2007, S. 32-35
- [4] Ortlepp, G.; Lützkendorf, R.:
Lange Carbonfasern aus textilen Abfällen
Technische Textilien 3/2006, S. 153-154
- [5] Carberry, B.:
Boeing recycles carbon fibre from fuselage for interior parts
Technical Textiles International, 12/2009, S. 4
- [6] Marsh, G.:
Carbon recycling: a soluble problem
Reinforced plastics 5/2009, S. 22-27
- [7] Junghans, J.:
Carbonfaser-Recycling
Automobilindustrie 1-2/2014, S.62-63
- [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] NN:
Präsentation der BMW-AG 2014
- [11] Mitschang, P.:
Schlüsseltechnologien für die Preform-LCM-Prozesskette
8. Internationale AVK-Tagung, September 2005
- [12] Heißler, H.:
Verstärkte Kunststoffe in der Luft- und Raumfahrttechnik
Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart 1986
- [13] Schnabel, A.:
Automatisiertes textiles Preforming
Lightweightdesign 3/2009, S. 44-47

- [14] Posca, L.:
High-modulus carbon fibres in super-structural compounds
JEC Composites Magazine, 7/8/2009, S. 55-58
- [15] Melilli, J.:
Applying automation to the fabrication of composite-based aerospace parts
JEC Composites Magazine, 4/2010, S. 58-61
- [16] Sachmucker, J.:
TFP-RTM-Bindertechnologie in hochbelasteten Kohlefaserbauteilen
Lightweightdesign 1/2010, S. 38-42
- [17] Verdenhalven, J; Heine, M.:
Industrialization of the composite industry
JEC Composites Magazine, 3/4/2009, S. 24-25 und 5/2009, S. 22-23
- [18] R. Stewart.:
Rebounding automotive industry welcome news for FRP
Reinforced Plastics 1/2/2011, S. 38-44
- [19] W. Michaeli; M. Pöhler,; L. Winkelmann.:
Großserien-Fertigungstechnologien für Leichtbauprodukte aus FVK
www.lightweight-design.de
- [20] NN.:
CFK im modernen Fahrzeug
K-Zeitung 10 2011, S. 12
- [21] R. Stewart.:
Carbon fibre market poised for expansion
Reinforced Plastics 3/4/2011, S. 26-31
- [22] Flury, M.:
BMW-Roadster Z1 im Kunststoffkleid
Kunststoffe – Plastics 12/1987, S. 18-19
- [23] NN.:
The road to success
Advanced Composite Engineering 11/1989, S. 8-10
- [24] Woite, B.; Schönleber, G.:
BMW Z1 – Ein klassischer Roadster mit innovativen Kunststoffanwendungen
Kunststoffe im Fahrzeugbau – Technik und Wirtschaftlichkeit
VDI Verlag Düsseldorf, 1988, S. 25-63
- [25] Müller, T.; Cheyyab, A.-A.; Schmachtenberg, E.:
In-Mould-Forming (IMF): Hybride Hochleistungsverbunde großserientauglich fertigen
10. Internationale AVK-Tagung, 5.-6. November 2007
- [26] Bürkle, E.:
Potenziale der Spritzgießtechnik von kurzglasfaserverstärkten Thermoplastbauteilen
– ausgeschöpft?
10. Internationale AVK-Tagung, 5.-6. November 2007

- [27] Spörrer, A.; Altstädt, V.; Sandler, J.:
Verarbeitung von langfaserverstärkten, hochgefüllten Thermoplasten im einstufigen Spritzgießprozess
8. Internationale AVK-Tagung, Baden-Baden, September 2005
- [28] Häberle, H.:
Faserverstärkte Thermoplaste in der MAN-LKW-Karosserie
10. Internationale AVK-Tagung, Stuttgart, 5.-6. November 2007
- [29] Kalmbach, K.-H.:
Rückwandträger Nissan Murano in GMT/GMTex
8. Internationale AVK-Tagung, Baden-Baden, September 2005
- [30] NN.:
Bei Leichtbau ein Innovations-Schwergewicht
Automobil Industrie Insight, S.48-50
- [31] Geiger, O.; Henning, F. et. al.:
LFT-D: materials tailored for new applications
Reinforced plastics 1/2006, S. 30-35
- [32] Bürkle, E.:
Verfahren und Trends beim Spritzgießen.
Kunststoffe 1/2000, S.40-45
- [33] Lutter, F.:
Leicht und hoch belastbar
Kunststoffe 11/2010, S. 74-77
- [34] Dittmar, H.:
Neue Materialien und Problemlösungen für zukünftige Fahrzeugunterböden
9. Internationale AVK-Tagung, Essen, September 2006
- [35] Schemme, M.:
LFT-development status and perspectives
Reinforced plastics 1/2008, S. 32-39
- [36] NN.:
Effiziente Leichtgewichte
Plastverarbeiter 12/2009, S.28-29
- [37] NN.:
Herausforderungen und Lösungen für die Großserie
Automobil Industrie Insight, S. 10-13
- [38] Krause, W.; Geiger, O.; Henning, F.:
Lokale Endlosfaserverstärkung
Kunststoffe 2/2006, S. 112-115
- [39] Reußmann, T.; Mieck, K.-P.:
Direktverfahren auf dem Vormarsch
BW Technics 4/2001
- [40] Reußmann, T.; Mieck, K.-P.; Brüssel, R.:
Direktverarbeitung von Naturlangfasern im Plastifizier-Pressprozess
Kunststoffe 7/2002, S. 86-89

- [41] Mantke, E.:
Untersuchungen zur Verarbeitung und Eigenschaftsoptimierung von
carbonfaserverstärkten Thermoplasten im LFT-D-Verfahren
Unveröffentlichte Bachelorarbeit, FH Jena 2013
- [42] Dröder, D.; Moede, M.:
Leichtbaustrategien für zukünftige Fahrzeuggenerationen
Automobilindustrie März 2010, s.24-27
- [43] Witten, E.; Jahn, B.:
Composites- Marktbericht 2013
Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, Frankfurt 2013

Thüringisches Institut für Textil- und
Kunststoff-Forschung e.V.

Breitscheidstr. 97, 07407 Rudolstadt

Kurzfassung (Zielstellung, technische und wirtschaftliche Ergebnisse)

Gegenstand des Forschungsvorhabens waren Werkstoff- und Verfahrensentwicklungen für die Herstellung von thermoplastischen Carbonfaserverbunden im LFT-D-Prozess. In dem Projekt wurden folgende Entwicklungsschwerpunkte verfolgt:

- Direkte Verarbeitung von Stapelfasern und Produktionsabfällen (Gewebe- und Gelegeabfälle) aus der CFK-Verbundherstellung
- Erhöhung der Produktivität bei der Herstellung von thermoplastischen Carbonfaserverbunden
- Bestimmung des erreichbaren Eigenschaftspotenzials von C-Faserverbunden mit thermoplastischer Matrix
- Durchführung von Untersuchungen zur Faser-Matrix-Haftung
- Optimierung der Prozessbedingungen im LFT-D-Verfahren
- Herstellung von Demonstrationsbauteilen

In einem ersten Schritt wurden zunächst in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner trockene Produktionsabfälle aus der Verbundfertigung beschafft und mit Hilfe eines im TITK entwickelten Recyclingprozesses aufgeschlossen. Die recycelten Carbonfasern wurden hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften geprüft und im Hinblick auf den Einsatz im LFT-D-Prozess bewertet.

Aus den Recyclingcarbonfasern wurden zur Umsetzung einer kontinuierlichen Dosierung gering verfestigte Faservliese mit einer speziellen Vlieslegetechnologie erzeugt. Die Vliese wurden an der LFT-D-Anlage getestet und für die Einstellung verschiedener Fasergehalte in Streifen mit definierter Breite geschnitten. In einem weiteren Schritt folgten kontinuierliche Verarbeitungsversuche wobei die Prozessbedingungen für die Herstellung von Verbunden mit PP und PA6-Matrix optimiert wurden.

Für die Herstellung von Demonstrationsbauteilen wurde ein Fließpresswerkzeug mit Rippenstruktur konstruiert und gefertigt. Mit dem Versuchswerkzeug wurden Musterplatten mit verschiedenen Wanddicken gepresst. Es konnten Fasergehalte von 20-40 Gew.-% eingestellt werden. Die Verbunde wurden hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften geprüft.


Die besten Verbundeigenschaften resultierten bei Fasergehalten von 20-30 Gew.-%. Zur Optimierung der Faser-Matrix-Haftung wurden ausgewählte Haftvermittler getestet. Bei den PP-Verbunden konnten dadurch die mechanischen Eigenschaften deutlich verbessert werden. Bei PA6-Matrix wurden durch die Haftvermittlung keine signifikanten Effekte erzielt.


Zur Umsetzung der grundlegenden Untersuchungen wurden anschließend Musterteile mit 3-D-Geometrien hergestellt. Damit konnte der Nachweis erbracht werden, dass bei entsprechender Aufbereitung des Fasermaterials eine kontinuierliche Verarbeitung von recycelten Carbonfasern im LFT-D-Prozess möglich ist.

Veröffentlichungen: **Ergebnisdarstellung auf den Internetseiten des TITK**
 Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift in Vorbereitung

Patentanmeldungen: **keine**

Datum: 27.06.2014


Projektleiter:


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