

Gebrüder Otto
Baumwollfeinzwirner GmbH & Co. KG

Institut für Textil- und Verfahrenstechnik
Denkendorf

Spinnverfahren für recycelte
Carbonfasern
- Phase 2 -

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 29910-2 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Andreas Merkel / Kathrin Wolf (Gebrüder Otto)

Uwe Heitmann / Stephan Baz / Olaf Reichert /
Larisa Ausheyks / Götz T. Gresser (ITV)

Dietenheim / Denkendorf, September 2016

Der Abschlussbericht ist erhältlich bei:

Gebrüder Otto Baumwollfeinzwirner GmbH & Co. KG

Königstraße 34

89165 Dietenheim

Tel. +49 (0)7347 / 9606 - 0

Fax +49 (0)7347 / 9606 - 60

info@otto-garne.com

Gebrüder Otto
Baumwollfeinzwirner GmbH & Co. KG

Institut für Textil- und Verfahrenstechnik
Denkendorf

Spinnverfahren für recycelte
Carbonfasern
- Phase 2 -

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 29910-2 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Andreas Merkel / Kathrin Wolf (Gebrüder Otto)

Uwe Heitmann / Stephan Baz / Olaf Reichert /
Larisa Ausheyks / Götz T. Gresser (ITV)

Dietenheim / Denkendorf, September 2016

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	29910	Referat	21/2	Fördersumme	€ 151.479.-
Antragstitel	Entwicklung eines Spinnverfahrens zur Herstellung eines Garnes aus recycelten Carbonfasern – Phase 2				
Stichworte	Verfahren, Recycling, Textil				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
1,5 Jahre	05.12.2014	05.06.2016	2		
Zwischenberichte	27.07.2015	29.01.2016			
Bewilligungsempfänger	Gebrüder Otto Baumwollfeinzwirnerei GmbH & Co. KG Königstraße 34 89165 Dietenheim			Tel	07347 9606-248
				Fax	07347 9606- 60
				Projektleitung	Andreas Merkel
				Bearbeiter	Kathrin Wolf
Kooperationspartner	SGL CARBON GmbH Werner-von-Siemens-Straße 18 86405 Meitingen				
	ITV Denkendorf Körschtalstraße 26 73770 Denkendorf				

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Carbon ist biologisch nicht abbaubar, was die Frage nach einem geeigneten Recyclingverfahren aufwirft. Die Carbonherstellung verursacht eine beträchtliche CO₂-Belastung, die Energieaufwendungen sind immens. Die CO₂-Bilanz wird deutlich verbessert, wenn die Carbonfasern nach dem Recycling in ähnlich hoch beanspruchten, carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) Anwendung finden wie die originären Endlosfilamente. Oft sind auch Bauteile mit geringerer mechanischer Belastung notwendig, die nicht aus Carbonfilamenten hergestellt werden müssen. Bisher wurden vor allem Projekte mit recycelten Carbonfasern angestoßen, in denen ein Vlies hergestellt wurde und um die grundsätzliche Verwendung der Fasern nachzuweisen. Es ist noch keinem Unternehmen gelungen, ein Fasergarn aus recycelten Carbonfasern zu spinnen. Da die Prozesskosten eines Spinnfasergarns höher ausfallen als bei der Vliesherstellung muss darauf geachtet werden, dass der Nutzen des Spinnfasergarns die Mehrkosten rechtfertigt und kompensiert. Dieser Mehrwert ergibt sich zum einen durch eine höhere Bauteilfestigkeit, zum anderen kann ein Garn lastpfadgerecht bei der Bauteilherstellung drapiert werden. Der Grund für die höhere Festigkeit liegt in einer gerichteten Faserstruktur beim Garn gegenüber einer Faserwirrlage beim Vlies. Als übergeordnetes Vorhabensziel galt es deshalb zu beweisen, dass CFK-Bauteile, die aus einem Stapelfasergarn hergestellt werden, eine höhere Festigkeit besitzen, als CFK-Bauteile aus einem Vlies und damit auch eine Materialeinsparung möglich ist. In Projektphase I ist es gelungen aus recycelten Carbonfasern rein und in Mischung mit Polyamid ein Band herzustellen. Dieses diente in der Projektphase II als Basis für ein Hybridgarn, das wie originäre Carbonfilamente zu einem Halbzeug verarbeitet werden kann. Hierzu war es erforderlich einen geeigneten Garnbildungsprozess zu finden, mit dem Hybridgarne entsprechend üblicher Rovingfeinheiten ersponnen werden können. Probekörper, die jeweils aus Vliesstoff und dem Hybridgarn hergestellt sind, dienen zur Ermittlung erster Materialkennwerte und für Vergleiche.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

- 1) Beschaffung und Untersuchung der Ausgangsmaterialien
- 2) Aufbereitung der Fasern
- 3) Vliesherstellung
- 4) Bandherstellung
- 5) Modifikation eines Spinn testers mit unterschiedlichen Streckwerken
- 6) Garnherstellung mit dem Umwindespinnverfahren und Gleichmäßigkeitsprüfungen
- 7) Ermittlung des Werkstoffpotentials über Garn- und Probekörperprüfungen
- 8) Wirtschaftliche Betrachtung

Ergebnisse und Diskussion

Die von der SGL CARBON GmbH geforderten Zugfestigkeiten konnten nicht erreicht werden. Das liegt an der gewählten Garnkonstruktion, die parallele Fasern im Garnkern und eine relativ lockere Umwindung aufweist. Durch eine strammere Umwindung würde sich die Garnfestigkeit erhöhen allerdings verlieren die Carbonfasern im Garnkern an Parallelität. Weiter konnte festgestellt werden, dass eine Knoten- oder Schlaufenbildung nicht zur Bildung einer Schwachstelle im Garn führt. Bei einem Garn, das vergleichbar zu einem 1K Roving ist, kann damit die gestellte Anforderung mit über 400 % übertroffen werden. Die Ergebnisse der Probekörper-Prüfungen zeigen, dass der Mehraufwand durch den Spinnprozess gegenüber der Vliesherstellung gerechtfertigt ist. Im Vergleich zu den Probekörpern aus Vliesen konnte die Biegefestigkeit der Probekörper aus Hybridgarn durchschnittlich um bis zu 30 % gesteigert werden. Zusätzlich konnte die Steifigkeit des Verbundmaterials deutlich erhöht werden. Der Biegemodul des Garnprüfkörpers nahm durchschnittlich um bis zu 120 % zu.

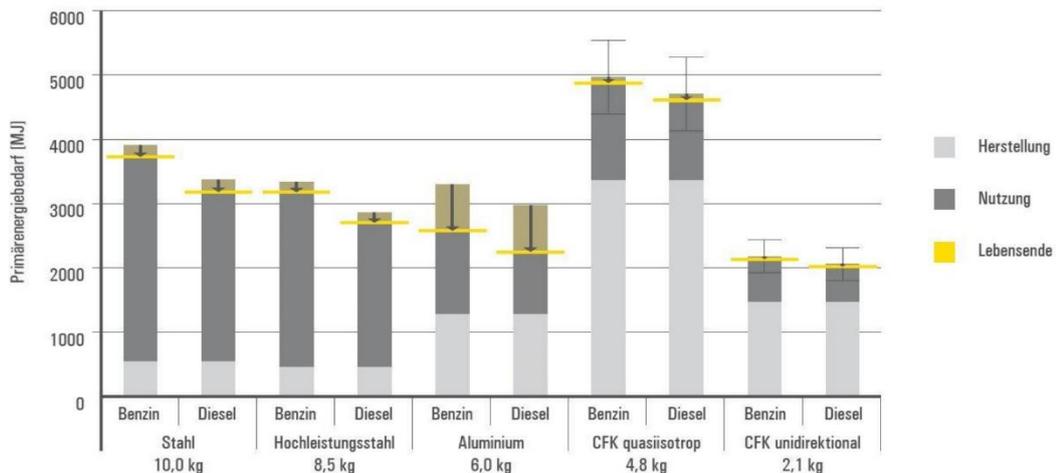


Abbildung 1 Primärenergiebedarf für Bauteile aus Stahl sowie alternativen Werkstoffen mit gleicher Lastaufnahme für ein Automobil mit Verbrennungsmotor nach 250.000km

Bei der Verwendung von Preforms zur Herstellung von CFK-Bauteilen fallen 15 - 40 % Verschnitt an. Mit dem erarbeiteten Verfahren ist es gelungen, aus Abfällen, die weltweit im Jahre 2020 im Bereich von bis zu ca. 20 kto/a anfallen werden ein vergleichsweise hochwertiges Produkt herzustellen. Die unidirektionalen CFK-Strukturen sind in der Lage gegenüber der verbreiteten Anwendung von quasisotropen CFK-Strukturen nunmehr mit reduzierten Einsatz an Carbonfaser Lasten und mechanischen Impulsen ebenso gut zu widerstehen. Die Primärenergie von ca. 3.900 MJ, die notwendig ist, um 10 kg strukturverstärkenden Stahl im Automobil herzustellen, über die Lebensdauer von 250.000 km zu bewegen und letztlich zu entsorgen, kann mit ca. 2 bis 5 kg recyceltem Carbon um mehr als 50% reduziert werden. (siehe Abbildung 1) Das entspricht einer Energie- Einsparung von 1.950 MJ oder 45 Liter Heizöl oder 542 kWh oder 144 Kg CO₂.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Eine Veröffentlichung sollte erst nach endgültiger Untersuchung aller die recycelte Carbonfaservorlage betreffenden Parameter (auch die der Begleitsubstanzen und die Aufschlusstechnologie) sowie der Zumischung anwendungsspezifisch geeigneter Matrixfasern in optimaler Anteilsmenge in Bezug auf die erzielbare Qualität der erspinnbaren Garne vorgesehen werden.

Fazit

Das Ziel des Entwicklungsprojekts der Phase II konnte im abgeschlossenen Projekt erreicht werden. Hybridgarne aus recycelten Carbonfasern sind durch Modifikation bestehender Textiltechniken kontinuierlich herstellbar, jedoch gibt es entlang der kompletten Prozesskette viele Optimierungsmöglichkeiten. Sofern die Entwicklung weiter verfolgt werden kann, würden sich für die Firma OTTO Chancen für den Markteintritt in einem neuen und wachsenden Markt ergeben.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung	2
3	Hauptteil.....	5
3.1	Versuchsdurchführung und Ergebnisse.....	5
3.1.1	AP 1: Materialbeschaffung.....	5
3.1.2	Charakterisierung der Ausgangsmaterialien.....	9
3.1.3	AP 2: Aufbereitung der Fasern.....	10
3.1.4	AP 3: Vliesherstellung	12
3.1.5	AP 4: Bandherstellung.....	14
3.1.6	AP 5: Modifikation eines Spinn testers	17
3.1.7	AP 6: Garnherstellung.....	20
3.1.8	AP 7: Ermittlung des Werkstoffpotentials.....	24
3.1.9	AP 8: Wirtschaftliche Betrachtung.....	29
3.1.10	AP 9: Projektkoordination.....	29
3.2	Bewertung der Vorhabensergebnisse.....	31
3.2.1	Betrachtung der Umweltrelevanz.....	31
3.2.2	Technologische und ökonomische Relevanz	31
3.3	Verbreitung der Vorhabensergebnisse	34
4	Fazit	35
	Literaturverzeichnis	

Verzeichnis von Bildern

Abb. 1: Primärenergiebedarf für Bauteile aus Stahl sowie alternativen Werkstoffen mit gleicher Lastaufnahme für ein Automobil mit Verbrennungsmotor nach 250.000km [1]	2
Abb. 2: Recafil Typ 60, geschnitten und mechanisch aufgerissen	6
Abb. 3: Carbonfasern im Ausgangsmaterial Recafil Typ 60.....	7
Abb. 4: Stapelfasern der Firma Barnet [2]	8
Abb. 5: Öffnungselemente eines LAROCHE Öffners [3]	10
Abb. 6: Voröffnung und Durchmischung von Carbon- und PA-Fasern. Links vor dem Voröffnen, rechts danach.....	10
Abb. 7: Vernähte Gelegereste in den recycelten Carbonfasern.....	11
Abb. 8: Krempelprozess am ITV mit Pelzwickeltrommel	12
Abb. 9: Krempelprozess am ITV mit Bandformation und Kannenablage	14
Abb.10: Carbon/PA-Band mit verbesserter Gleichmäßigkeit und Durchmischung.....	16
Abb.11: Entmischung zwischen Carbon- (schwarz) und PA-Fasern (weiß) im Streckenband.....	16
Abb.12: Umwindespinntester des ITV	17
Abb.13: Entmischtes Faserband nach dem Verzug im Langstapelstreckwerk.....	18
Abb.14: Faserbänder mit unterschiedlichem Verzug und unterschiedlicher Entmischung	19
Abb.15: Umwindearne mit unterschiedlicher Feinheit und entsprechendem Carbonfaser-Anteil	21
Abb.16: Gewichtsbezogene Garnungleichmäßigkeit von je 2000 mm Hybridgarn.....	23
Abb.17: Skizze Knotenzugversuch [5]	24
Abb.18: Skizze Schlingenzugversuch [6].....	25
Abb.19: Gegenüberstellung der erreichten Festigkeit der Hybridgarne im Vergleich zu den Anforderungen der Fa. SGL CARBON GmbH.....	25
Abb.20: In die Pressform gewickeltes Hybridgarn.....	27
Abb.21: Garnprobekörper für die Biegeprüfung	27

Abb.22: Verwendeter Vliesstapel aus Carbon und Polyamid 6 mit Darstellung der Maschinenlaufriichtung sowie daraus hergestellter Probekörper	28
Abb.23: Gebrochener Garnprobekörper	28
Abb.24: Strukturbauteile beim Automobil [7]	29

Verzeichnis von Tabellen

Tabelle 1: PA 6 Ausgangsmaterialien.....	8
Tabelle 2: Versuchsvarianten Garnfeinheit	20

Formelzeichen

α_m	$[(T/Nm)^{1/2}]$ alphanetrischer Drehungsbeiwert
T	[Drehungen/m]

Abkürzungen

C	Carbon
CF	Carbonfaser
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
E-Modul	Elastizitätsmodul
FVW	Faserverbundwerkstoffe
PA	Polyamid
UD	Unidirektional

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Avivage: Hilfsmittel für den Auftrag auf die Fasern, mit einem Gleit- und Antistatikanteil um das Verarbeitungsverhalten der Fasern sowie auch die Haftvermittlung innerhalb des Faserverbundbauteils zu verbessern.

Downcycling: Der Begriff Downcycling bezeichnet - überwiegend im Bereich der Wiederverwertungsindustrie - den häufig auftretenden Effekt, dass aus wiederverwerteten Rohstoffen minderwertigere Produkte hergestellt werden.

Filament: Bezeichnung für eine Faser mit praktisch unbegrenzter Länge. Werden auch Endlosfasern genannt.

Garnitur: Beschläge einer Krempelwalze mit Sägezähnen

Haarigkeit: Durch das Abstehen von Fasern entstehendes Garnbild.

Isotrop: Nach allen Richtungen hin gleiche physikalische und chemische Eigenschaften aufweisend.

K: Einheit für die Filamentanzahl in einem Roving. 1K steht für 1000 Einzelfilamente.

Krempel: Beim Kardierprozess in der Maschine werden die Faserflocken zu einzelnen Fasern aufgelöst, parallelisiert und das entstehende Faserflor zu einem Faserband zusammengefügt.

Faserband/ Band: Ausgabeband an der Krempel.

Matrix/Matrixsystem: Matrix oder Matrixsystem ist eine Bettungsmasse auf Kunststoff-, Metall-, Keramik- oder auch Ligninbasis und stellt eine Komponente für die Herstellung von Faserverbundwerkstoffen dar.

Nisse: Verknotung von Fasern, die durch weitere textile Prozesse nicht mehr aufgelöst werden kann.

Nm: Einheit für die Garnfeinheit in $\frac{m}{g}$. Nm 1 bedeutet, dass 1 Meter Garn 1 Gramm wiegt, Nm 100 bedeutet, dass 100 Meter Garn 1 Gramm wiegen.

Pelzwickeltrommel: Holztrommel hinter dem Abnehmer der Krempel auf den das Flor zur Vliesbildung aufgewickelt wird.

Preform: Preforms sind endkonturnahe, trockene textile Konstruktionen, die im nachfolgenden Prozess zur Faserverbundbauteilen verarbeitet werden.

Pyrolyse: Die Pyrolyse bzw. pyrolytische Zersetzung ist eine thermo-chemische Spaltung organischer Verbindungen, wobei durch hohe Temperaturen (200 – 900°C) ein Bindungsbruch innerhalb großer Moleküle in Kleinere erzwungen wird.

Roving: Als Roving wird ein Bündel, Strang aus parallel angeordneten Filamenten (Endlosfasern) bezeichnet

Quasiisotrop: Quasiisotropie bedeutet, dass der Mittelwert der physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Stoffes in alle Richtungen gleich ist.

Stapelfasern: Fasern, denen im Gegensatz zu endlosen Filamenten eine gewisse Länge zugeordnet werden kann.

Titer: Bezeichnet die Feinheit von textilen Fasern und Garnen und stellt ein Maß für deren Durchmesser dar.

tex: Einheit für die Garnfeinheit in $\frac{g}{1000 m}$. 1 tex bedeutet, dass 1000 m Garn 1 Gramm wiegen.

dtex: Einheit für die Garnfeinheit in $\frac{g}{10.000 m}$. 1 dtex bedeutet, dass 10.000 m Garn 1 Gramm wiegen.

1 Zusammenfassung

Das Vorhaben „Spinnverfahren für recycelte Carbonfasern – Phase 2“ befasst sich mit der Erprobung der gesamten Verarbeitungskette zur Herstellung von Garnen aus recycelten Carbonfasern. Wurde in Phase 1 die grundsätzliche Machbarkeit der Garnherstellung festgestellt, so wurden in Phase 2 die Parameter einer kontinuierlichen Prozesskette erforscht, die eine ökonomische Erfüllung der gestellten Anforderungen ermöglichen.

Ausgehend von auf dem Markt erhältlichen Ausgangsmaterialien (Carbon- und Polyamidfasern) sind Untersuchungen und Maßnahmen durchgeführt worden, die eine Weiterverarbeitung des Ausgangsmaterials gewährleisten. Zur Realisation eines kontinuierlichen Prozesses wurde die Krempel mit einem Füllschacht und einem Bandabzug ausgestattet. Es war notwendig die Parameter der Krempel anzupassen, damit für den nachfolgenden Spinnprozess ein Band mit ausreichender Festigkeit und Gleichmäßigkeit hergestellt werden konnte. Hierbei wurde Augenmerk auf einen schonenden Prozess gelegt, um möglichst lange Carbonfasern und einen geringen Carbonfaser-Verlust zu generieren.

Während der Spinnprozess-Optimierung wurden insgesamt drei unterschiedliche Streckwerke zur Garnherstellung erprobt. Die Streckwerke unterschieden sich in den Längen der Verzugzonen. Die zu lösenden Probleme im Spinnprozess bezogen sich vor allem auf die Inhomogenität der Bandzusammensetzung. Die Faserlängen innerhalb des Bandes müssen in einem bestimmten Bereich liegen, um eine optimale Verarbeitung im Streckfeld zu ermöglichen. Zu lange Fasern, aber auch der Anteil der Kurzfasern darf eine bestimmte Menge nicht überschreiten. Nach umfangreichen Versuchen, die sich im Wesentlichen auf den Verzugsvorgang konzentrierten, konnte ein ausreichend gleichmäßiges Hybridgarn ersponnen werden.

Zu Vergleichszwecken wurden Prüfkörper sowohl aus Vliesstoff als auch dem Hybridgarn hergestellt. Der Vergleich der Biegefestigkeitswerte zeigt, dass Garnprüfkörper einen deutlichen Zuwachs an Festigkeit und Steifigkeit aufweisen. Der durchschnittliche Zuwachs innerhalb der geprüften Materialien kann bezogen auf die Festigkeit bis zu 30 % betragen. Bei der Steifigkeit kann der Zuwachs im Vergleich zu einem Vlies, je nach Ausrichtung in die der Probekörper entnommen wurde, bis zu 120 % betragen. Das bedeutet für Faserverbundbauteile nach aktuellen Erkenntnissen eine Materialeinsparung von bis zu 30 % bei der Verwendung von Halbzeugen aus Hybridgarnen mit recycelten Carbonfasern im Vergleich zu Halbzeugen aus Vlies.

2 Einleitung

In Industriezweigen, welche die Mobilität betreffen, gewinnt die Energie- und Materialeffizienz in Zeiten zunehmender Verknappung und Verteuerung von Ressourcen an Bedeutung. Eine Möglichkeit zur Realisierung materialeffizienter Bauteile bietet der Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Grund hierfür ist die sehr hohe gewichtsbezogene Festigkeit der Carbonfasern im Vergleich z. B. zu Stahl.

Nachteilig ist allerdings die sehr kritisch zu betrachtende CO₂-Ökobilanz von originären Carbonfasern aufgrund der energieintensiven Herstellung (Abb. 1). Die Ökobilanz kann jedoch deutlich verbessert werden, wenn die Carbonfasern recycelt werden und im Anschluss möglichst effizient (ähnlich wie Rovings) wiederverwendet werden.

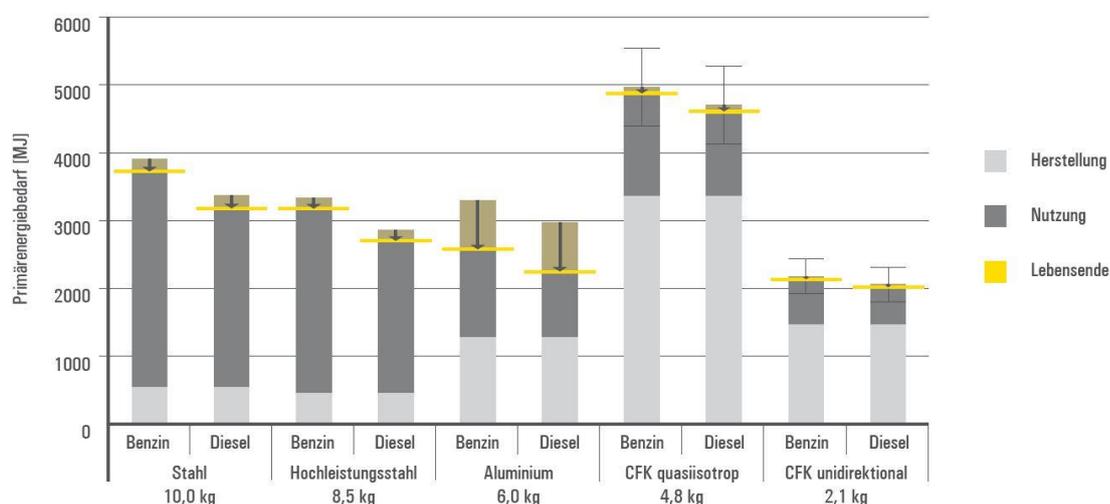


Abb. 1: Primärenergiebedarf für Bauteile aus Stahl sowie alternativen Werkstoffen mit gleicher Lastaufnahme für ein Automobil mit Verbrennungsmotor nach 250.000km [1]

Die Ergebnisse des in diesem Abschlussbericht vorgestellten Vorhabens beziehen sich auf den Aspekt der Wiederverwendung der Fasern hin zu Halbzeugen mit möglichst langen, orientierten recycelten Carbonfasern. Hierzu war es erforderlich eine komplette Prozesskette abzubilden, die eine Wiederverwendung der Recyclingfasern zu einem Halbzeug mit den gestellten Anforderungen ermöglicht.

Die innovative Idee des Vorhabens besteht darin, ein Hybridgarn aus recycelten Carbonfasern in Kombination mit einer thermoplastischen Matrixfaser zu verspinnen und daraus Probekörper herzustellen, die geeignet sind, Materialkennwerte nach normierten Verfahren zu ermitteln. Es ist bekannt, dass Carbonfasern aufgrund ihrer Sprödigkeit und geringen elastischen Dehnung schonend verarbeitet werden müssen, um eine Fasereinkürzung möglichst zu vermeiden. Der Spinnprozess musste

entsprechend angepasst werden. Hier bot sich an, die Stabilität der im Prozess erforderlichen Zwischenprodukte (Faserflor, Faserband, Hybridgarn) durch Beimischung von Polymerfasern zu erhöhen, die gleichzeitig das spätere Matrixmaterial darstellen. Ein daraus folgender Vorteil eines solchen Hybridgarns ist, dass die Fließwege während des Aushärtens in einer Pressform deutlich verkürzt sind und somit kürzere Verarbeitungszyklen ermöglicht werden.

Innerhalb dieses Vorhabens wurde die komplette Prozesskette zur Hybridgarn-Herstellung realisiert. Hierzu waren die vorbereitenden Untersuchungen des ebenfalls von der DBU geförderten Projektes der Phase 1 „Spinnverfahren für recycelte Carbonfasern“ notwendig. Innerhalb des Vorhabens wurden grundlegende Untersuchungen durchgeführt, die die Machbarkeit der Verarbeitung der Fasern bis hin zur Bildung eines Bandes für die Garnherstellung zum Ziel hatten und dieses Ziel auch erreichten. In Ansätzen konnte ein Garn hergestellt werden.

Seitens der Industrie (insbesondere der Fa. SGL CARBON GmbH) ergaben sich Anforderungsprofile an ein zu entwickelndes Hybridgarn, die einerseits die konkreten Eigenschaften bezüglich Garnkonstruktion, Festigkeiten und Aufmachung betreffen, andererseits zeigen sollten, dass aus recycelten Carbonfasern ein Hybridgarn mit definierten Anforderungen hergestellt werden kann.

Als übergeordnetes Ziel des Vorhabens galt es zu beweisen, dass Faserverbundbauteile, die aus einem Stapelfasergarn aus recycelten Carbonfasern hergestellt werden, eine höhere Festigkeit besitzen, als Faserverbundbauteile aus einem Vlies das ebenfalls aus recycelten Carbonfasern hergestellt wurde. Der Grund für die höhere Festigkeit liegt in einer gerichteten Faserstruktur beim Garn gegenüber einer Faserwirrlage beim Vlies.

Hierbei ist zu beachten, dass der Nutzen eines Garnes die Mehrkosten des Spinnprozess gegenüber der Vliesherstellung deutlich übersteigt. Dieser Mehrwert ergibt sich zum einen durch eine höhere Bauteilfestigkeit, zum anderen kann ein Garn lastpfadgerecht bei der Bauteil-Herstellung drapiert werden. Bisher wurden vor allem Projekte mit recycelten Carbonfasern angestoßen, in denen ein Vlies (quasiisotrop) hergestellt wurde und um die grundsätzliche Verwendung der Fasern nachzuweisen. In diesem Vorhaben werden konkret Materialproben aus einem Carbonfaser-Vliesstoff (ebenfalls hybrid) mit Proben aus einem Hybridgarn (unidirektional) miteinander verglichen.

Aus dem in Abb. 1 gezeigten Primärenergiebedarf wird die ökologische Dringlichkeit des Projektes abgeleitet. Der Primärenergiebedarf bei Verwendung von Carbonfasern ist dann am geringsten, wenn unidirektionale CFK-Materialien verwendet werden.

Jedoch ist der Energierückgewinn am Lebensende des Bauteils aufgrund der fehlenden Möglichkeiten zum Recycling von CFK-Bauteilen in ähnlich hochwertigen Anwendungen wie bei den Originalbauteilen bisher sehr gering.

An diesen zwei Aspekten setzte dieses Forschungsvorhaben an und hatte als Ziel ein Verfahren zur Herstellung von unidirektionalen (UD) Halbzeugen aus recycelten Carbonfasern (Hybridgarne) zu entwickeln, die im CFK deutlich verbesserte mechanische Eigenschaften aufweisen als CFK-Bauteile aus quasiisotropen Materialien (Vliesstoffe aus recycelten Carbonfasern). Gleichzeitig sollte die Verarbeitbarkeit der Halbzeuge, durch die Möglichkeit zur gezielten Ablage in die belasteten Bereiche eines Bauteils, verbessert werden.

Konkret lassen sich aus dem in Abb. 1 dargestellten Diagramm die folgenden 2 Forderungen ableiten:

- **Carbonfasern müssen wiederverwendet werden.**
- **Carbonfasern müssen ihrem Potenzial entsprechend optimal eingesetzt werden.**

3 Hauptteil

3.1 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

3.1.1 AP 1: Materialbeschaffung

Zu Beginn des Projektes wurden die Materialien zur Durchführung festgelegt. Bei den recycelten Carbonfasern kann man grob zwischen drei Klassen unterscheiden:

1. Rovingabfälle von Restspulen (trockene Primärfaser-Abfälle),
2. Randabschnitte von Gelegen (trockene Primärfaser-Abfälle meistens noch mit Nähfadenresten)
3. Pyrolysierte Carbonfasern (aus CFK-Bauteilen oder Randabschnitten)

Abhängig von der Art der recycelten Carbonfasern sind unterschiedliche Arbeitsschritte notwendig um die Fasern zu einem Garn verarbeiten zu können.

Von Bedeutung ist vor allem, ob auf den Carbonfasern eine Avivage aufgebracht ist oder nicht. Pyrolysierte Fasern sollten nach aktuellem Stand neu aviviert werden, da andernfalls die Verarbeitung in der Textilmaschine eine hohe Schädigung der Fasern erzeugt.

3.1.1.1 Carbonfasern

Aufgrund der Kooperation mit der Fa. SGL CARBON GmbH innerhalb dieses Projektes wurde als Basis der Untersuchungen eine recycelte Carbonfaser von SGL mit unterschiedlichen Schnittlängen herangezogen: Recafil Typ 40 und Recafil Typ 60.

Es handelt sich dabei um Randabschnitte von Gelegen (somit Primärfaser-Abfälle) die zu einer textilen Flocke aufgerissen wurden (Abb. 2). Dadurch befinden sich neben den Carbonfasern noch Gelege-Nähfäden aus Polyester- oder Glasfasern im Material. Der Fremdfaseranteil liegt bei ca. 6 %.



Abb. 2: Recafil Typ 60, geschnitten und mechanisch aufgerissen

Die Recafil-Carbonfasern vom Typ 40 wurden nach Angabe vom Hersteller in 40 mm bis 50 mm langen Stücken, Typ 60 in 60 mm bis 70 mm langen Stücken geliefert (Abb. 3). Je nach Einlauf und Lage der Rovings im Gelege während der Herstellung der recycelten Carbonfasern im Schneidprozess können auch längere Fasern im Ausgangsmaterial vorhanden sein. Ebenso sind deutlich kürzere Carbonfasern enthalten die durch den Bruch der Fasern beim Recycling selbst entstehen. Der Mittelwert der Einzelfaser-Längenmessung lag je nach Messung für das Recafil Typ 60 Material im Bereich zwischen 20 mm und 30 mm.

Aufgrund der bekannten Problematik der Carbonfaser-Einkürzung über die einzelnen Verarbeitungsschritte wurde für dieses Projekt einheitlich das Recafil Typ 60 Material verwendet, das die längeren Carbonfasern beinhaltet.

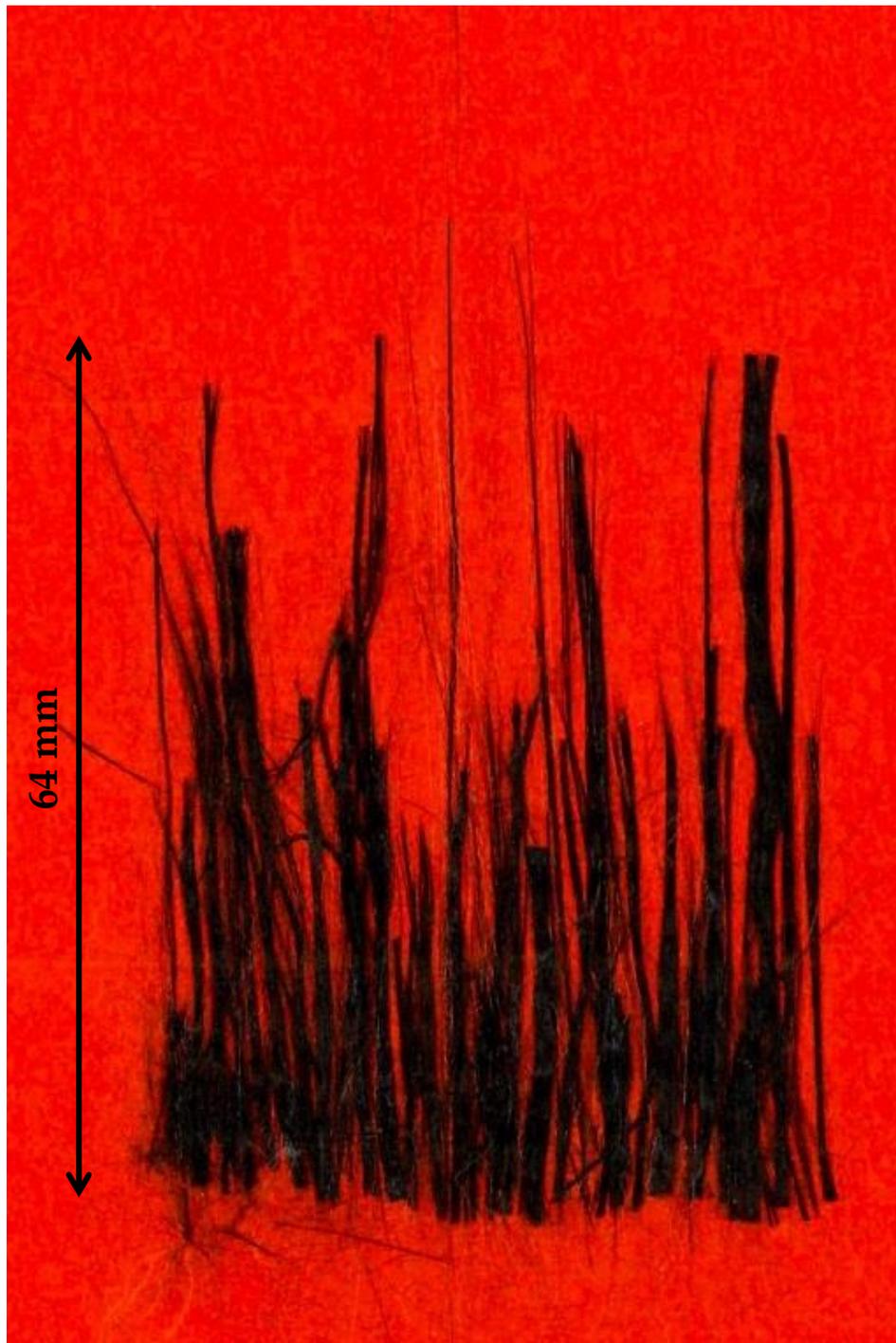


Abb. 3: Carbonfasern im Ausgangsmaterial Recafil Typ 60

Der im Projektantrag aufgeführte Arbeitsplan sah vor, dass Prüfkörper aus den originären Carbonfasern hergestellt werden, um abschätzen zu können, wie groß der Unterschied von Halbzeugen aus originären und Halbzeugen aus recycelten Fasern ist. Es ist jedoch innerhalb der Projektlaufzeit nicht gelungen in Erfahrung zu bringen, aus welchem Ausgangsmaterial sich die recycelten Carbonfasern zusammensetzen. Aus diesem Grund konnte der in AP 1 genannte Einfluss von zusätzlich aufgebrauchten Hilfsstoffen nicht untersucht werden.

3.1.1.2 Matrixfasern

Als Matrixfasern wurden thermoplastische Polyamid 6-Fasern (PA-Fasern) definiert. Hauptgrund für die Auswahl ist, dass diese Thermoplast-Sorte im Automobilbau üblich ist. Zu Beginn des Projektes standen drei unterschiedliche PA-Fasern zur Auswahl:

Tabelle 1: PA 6 Ausgangsmaterialien

Hersteller	EMS-Chemie	EMS-Chemie	Barnet (Abb. 4)
Material	Polyamid 6	Polyamid 6	Polyamid 6
Bezeichnung	Grilon P300	Grilon P300	CHBA045
Titer	3,3 dtex	1,3 dtex	2 - 4 dtex
Faserlänge	60 mm	60 mm	40 mm

Erste Versuche zur Verarbeitung der PA-Fasern zeigten, dass die feineren Fasern (1,3 dtex), bei Verarbeitung mit der aktuellen Garnitur der Krempel, zur Nissenbildung neigen, die in den nachfolgenden Weiterverarbeitungsprozessen nicht mehr aufgelöst werden können. Aus diesem Grund wurden für die Versuche in diesem Vorhaben die größeren Fasern (3,3 dtex) verwendet. Nachteilig an den größeren Fasern ist, dass diese gegenüber den Carbonfasern einen ca. vier Mal größeren Durchmesser haben und dadurch die Fließwege der Matrix etwas länger werden als wenn beide Fasern den gleichen Durchmesser aufweisen.

Bei der Faserlänge fiel die Entscheidung auf die 60 mm lange PA-Faser, da diese Faserlänge besser zur Carbonfaser-Ausgangslänge passt.

Für alle weiteren Versuche wurde die PA-Faser der Firma EMS-Chemie Typ Grilon P300 mit einer Feinheit von 3,3 dtex und 60 mm Faserlänge verwendet.



Abb. 4: Stapelfasern der Firma Barnet [2]

3.1.2 Charakterisierung der Ausgangsmaterialien

3.1.2.1 Einzelfaserlängenbestimmung

Zur Charakterisierung der eingesetzten recycelten Carbonfasern wurde die Einzelfaserlänge der Carbonfasern bestimmt. Aus Sicht des ITV Denkendorf ist es nur mit der Einzelfaser-Längenmessung eine Beurteilung der Länge der Carbonfasern in jedem Stadium (Flocke, Flor, Band, Vlies und Garn) möglich.

Die Einzelfaser-Längenmessung erfolgt nach dem Zwei-Pinzetten-Verfahren. Die Basis für diese Messmethode bilden die Norm DIN 53803 „Probennahme“ und die Norm DIN 53808-1 „Längenbestimmung an Spinnfasern“. Eine Auswertung der Längenmessung erfolgt anhand der Normen DIN 53804-1 und DIN 53805:1980-10. Die Prüfung der Carboneinzelfaser-Länge wird im Normklima durchgeführt, d.h. 20 ± 2 °C und 65 ± 4 % relative Luftfeuchtigkeit.

Als Untergrund wird schwarzer Samt verwendet. Dieser wird mit einer Glasplatte abgedeckt. Die einzelnen Carbonfasern reflektieren Licht sehr gut, sodass sie durch den schwarzen Untergrund und bei bestimmtem Lichteinfall gut sichtbar sind. Die Einzelfasern werden gestreckt abgelegt und mit einem Lineal vermessen. Aufgrund der Steifigkeit der Fasern lassen diese sich problemlos ablegen. Das Herauslösen der Einzelfasern aus dem Faserverband muss sehr vorsichtig mit einer Pinzette oder den Fingern erfolgen. Durch die punktuell aufgebrachte Kraft der Pinzette kann es zu einem Bruch der Fasern kommen, sodass die Messung zusätzlich erschwert wird. Die Anzahl der Messungen beträgt 150, wobei abweichend von der Norm jede Faser und nicht jede 10. Faser vermessen wird, da bei Carbonfasern der Aufwand sehr hoch ist.

3.1.3 AP 2: Aufbereitung der Fasern

In ersten Faseröffnungsversuchen an einem Feinöffner der Firma Laroche (Abb. 5) wurde die Öffnungsfähigkeit der recycelten Carbonfasern untersucht. Es wurde der Einfluss der Mischung der recycelten Carbonfasern mit den PA-Fasern sowie der Konditionierung auf die Öffnungsfähigkeit und den Öffnungsgrad untersucht (Abb. 6). Je nach Versuch war es notwendig die Materialien einem mehrfachen Öffnungsprozess zu unterwerfen.

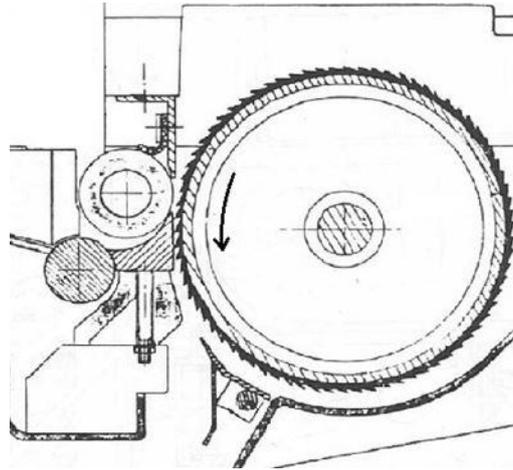


Abb. 5: Öffnungselemente eines LAROCHE Öffners [3]

Bei einem ausreichenden Öffnungs- und Durchmischungsgrad konnte der Krempelprozess ohne Wickelbildung oder Zusetzen der Garnituren durchgeführt werden. Zusätzlich wurde der Großteil an Carbonfaser-Rovingstücken zu kleineren Bündeln oder Einzelfasern aufgelöst. Dieser Zustand im Faserband nach der Krempel war eine Voraussetzung für den Spinnprozess. Alle Fasern oder kleinen Faserbündel mussten frei beweglich sein, andernfalls konnte keine ausreichende Gleichmäßigkeit des Garnes erzielt werden.



Abb. 6: Voröffnung und Durchmischung von Carbon- und PA-Fasern. Links vor dem Voröffnen, rechts danach.

Zusätzlich zum Einfluss der Durchmischung und Öffnung wurde der Einfluss der Fremdfasern in den recycelten Carbonfasern untersucht. Die Fremdfasern stellen ein Problem dar, da die Polyestergerne, die als Nähfaden verwendet werden, eine Auflösung behindern. Die Krempel kann die Auflösung der zum Teil noch vernähten Carbongelege nicht leisten (Abb. 7). Zudem sind die Polyestergerne meist deutlich länger als die Carbonfasern und neigen dadurch zur Wickelbildung. Aus diesem Grund wurden weiterführende Untersuchungen zur Auflösung der Carbonfaserflocken am Feinöffner durchgeführt. Als Ergebnis nach einigen Einstellungsversuchen und Variation der Durchlaufgeschwindigkeit wurde die Einstellung gefunden, die die Auflösung der in den recycelten Carbonfasern noch vorhandenen Gelegeabschnitte, bei geringer Fasereinkürzung und ausreichender Faserauflösung ermöglichte.



Abb. 7: Vernähte Gelegereste in den recycelten Carbonfasern

Ein Einfluss der klimatischen Bedingungen bzw. der Konditionierung der Fasern auf das Öffnungsergebnis konnte nicht ermittelt werden.

3.1.4 AP 3: Vliesherstellung

Vor der deutlich komplexeren Bandbildung wurde im ersten Schritt ein Vlies mit Hilfe der am ITV verfügbaren Memmingen Musterkrepel (Arbeitsbreite 700 mm) erzeugt. Der Anlagenaufbau ist in Abb. 8 skizziert. Das auf der Pelzwickeltrommel erhaltene Vlies wurde zur Gewährleistung der Transportstabilität vernadelt.

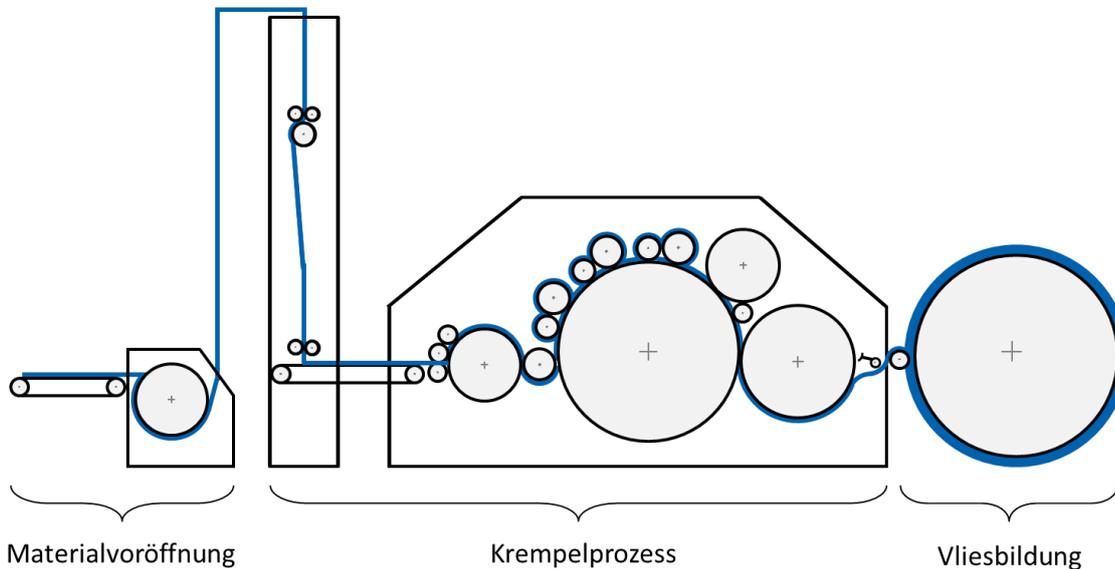


Abb. 8: Krepelprozess am ITV mit Pelzwickeltrommel

Bereits bei der Vliesherstellung wurden die Gleichmäßigkeit, die Faservereinzelung und die Reduktion der Faserschädigung optimiert. Zur erfolgreichen Bandbildung mussten die zur Vliesbildung ermittelten Einstellungen jedoch teilweise geändert werden, vgl. Kapitel 3.1.5.

Durch die Verarbeitung der Carbonfasern mit dem Feinöffner und der Krepel sowohl zur Vlies- als auch zur Bandbildung findet grundsätzlich eine identische Schädigung in Form einer Carbonfaser-Längeneinkürzung statt. Die mittlere Faserlänge der recycelten Carbonfasern lag bereits zwischen 20 mm und 30 mm. Eine starke, zusätzliche Fasereinkürzung wurde nicht festgestellt. Bezogen auf die bestimmte mittlere Faserlänge der recycelten Carbonfasern Recafil Typ 60, betrug die Einkürzung lediglich 5 %.

Die im Krepelprozess stattfindende Carbonfaser-Längeneinkürzung geht einher mit einer Carbonfaser-Staubbildung und damit dem Carbonfaser-Verlust. Messungen während der Vliesproduktion haben gezeigt, dass der Carbonfaser-Verlust in einem Bereich unter 10 % liegt. Die durch den Carbonfaser-Verlust bedingte Veränderung des

eingestellten Mischungsverhältnisses liegt im Bereich unter 5 % und wurde bei der Erstellung der Ausgangsmischung berücksichtigt.

3.1.5 AP 4: Bandherstellung

Die Bandherstellung in einem kontinuierlichen Prozess stellt eine große Herausforderung dar. Bisherige Versuche zur Bandherstellung in Phase 1 liefen in einem diskontinuierlichen Prozess mit zwei Krempeldurchläufen ab. Durch die zwei Krempeldurchläufe konnte zuerst das Flor zu einem Vlies doubliert und anschließend das homogenisierte Vlies erneut gekrempelt, gleichmäßig, geöffnet und dann zu einem Band zusammengefasst werden.

Die Umsetzung der Bandherstellung in einen kontinuierlichen Prozess mit einem Krempeldurchlauf (Phase 2) erforderte eine Anpassung der Voröffnung und der Mischung der Faserkomponenten für eine möglichst homogene Durchmischung, eine gute Öffnung der Fasern und einen möglichst gleichmäßigen Materialfluss.

Für den kontinuierlichen Betrieb der Krempel wurde der Zuführschacht für Carbon modifiziert und eine Bandabnahme am Ausgang der Krempel montiert (Abb. 9). Die Synchronisierung der Geschwindigkeiten von Lieferung der Krempel und Bandeinzug des Kannenstocks wurde durch ein mechanisches Stellgetriebe realisiert. Lieferwerke mussten modifiziert werden, da z. B. Metallwalzenpaarungen zur Einkürzung der Carbonfasern beitrugen. In diesem Falle schufen Walzen mit Gummiüberzug Abhilfe.

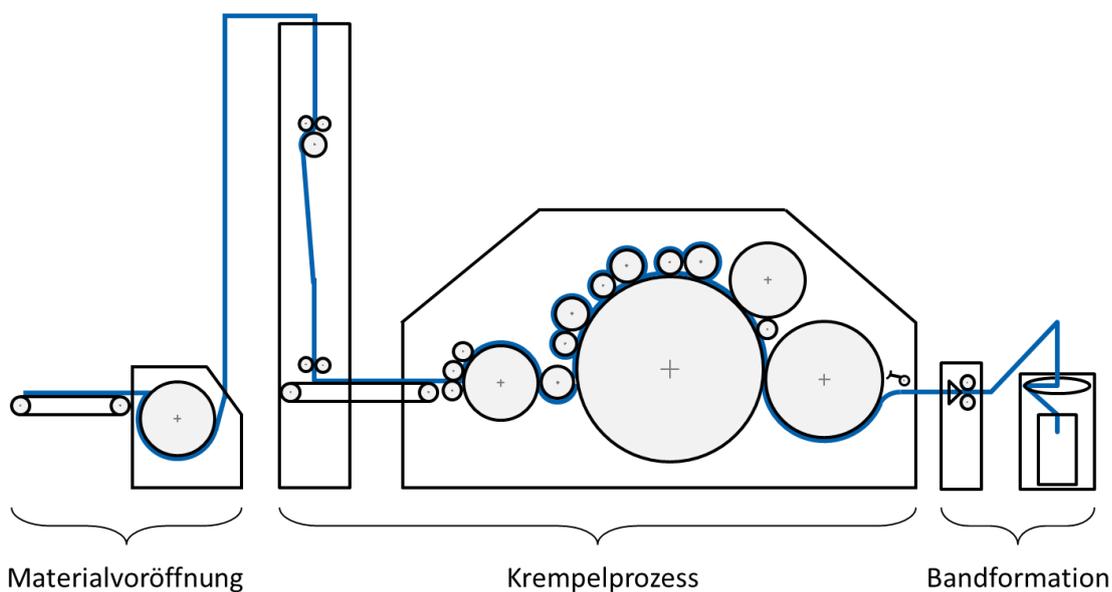


Abb. 9: Krempelprozess am ITV mit Bandformation und Kannenablage

Die mit der prozessablaufoptimierten Anlage hergestellten Bänder wichen hinsichtlich ihrer Struktur deutlich von den Ergebnissen aus Phase 1 ab. Die Bänder aus der Phase 1 waren sehr homogen und konnten direkt für die Garnerzeugung verwendet werden.

Die zu diesem Zeitpunkt (Phase 2) erzeugten Bänder hatten eine sehr ungleichmäßige Struktur.

Als Ursachen für die Ungleichmäßigkeiten bei den Bändern wurden die Garnitur der Krempel sowie das Zwischenspiel zwischen Spitzendichte der Garnitur, Umfangsgeschwindigkeit der Walzen und die Spaltmaße zwischen den Walzen identifiziert.

Um die Krempel weniger anfällig auf Schwankungen oder Materialanhäufungen zu machen, wurde die Tambour-, Arbeiter-, Wender- und Abnehmergarnitur gröber als bei der in Phase 1 verwendeten Krempel gewählt. Dadurch konnte ein Zusetzen der Garnitur vermieden werden, allerdings ergab sich daraus ein geringerer Auflösegrad der Fasern. Insgesamt war das Laufverhalten der Krempel zufriedenstellend. Die Florbildung erfolgte über die Breite des Tambours störungsfrei und der Faserabgang betrug unter 10 %. Das gebildete Band wies jedoch starke Ungleichmäßigkeiten auf, was negative Auswirkungen auf das Verzugverhalten beim Spinnprozess hatte. Die Ungleichmäßigkeiten führten zusätzlich dazu, dass der Zusammenhalt des Bandes ungenügend für den Transport in die Kanne war.

In Phase 1 wurden die Fasern nur mit der Krempel, ohne vorausgehende Voröffnung, verarbeitet. Es zeigte sich, dass bei nur einem Krempeldurchlauf die Fasern nicht ausreichend aufgelöst wurden. Aus den Bändern konnte damals kein Garn gesponnen werden, weshalb ein zweimaliger Durchlauf an der Krempel für die vollständige Faserauflösung notwendig wurde. Dies ist jedoch kein Weg, der für einen kontinuierlichen Prozess, wie er in dieser Phase 2 aufgebaut werden sollte, beschritten werden konnte. Aus diesem Grund wurde für eine Vorauflösung der in Kapitel 3.1.3 beschriebene Feinöffner der Firma Laroche verwendet, mit dem es möglich war eine ausreichende Vorauflösung zu erzeugen, um mit einem Krempeldurchlauf ein verspinnbares Band herzustellen.

Es konnte ein Band mit max. $4 \frac{g}{m}$ erzeugt werden (Abb. 10). Das Mischungsverhältnis zwischen PA- und Carbonfasern änderte sich auf Grund der Carbonfaser-Staubbildung während der Verarbeitung, weshalb der angenommene Abgang von Carbonfasern am Beginn der Prozesskette zusätzlich hinzugefügt werden musste.

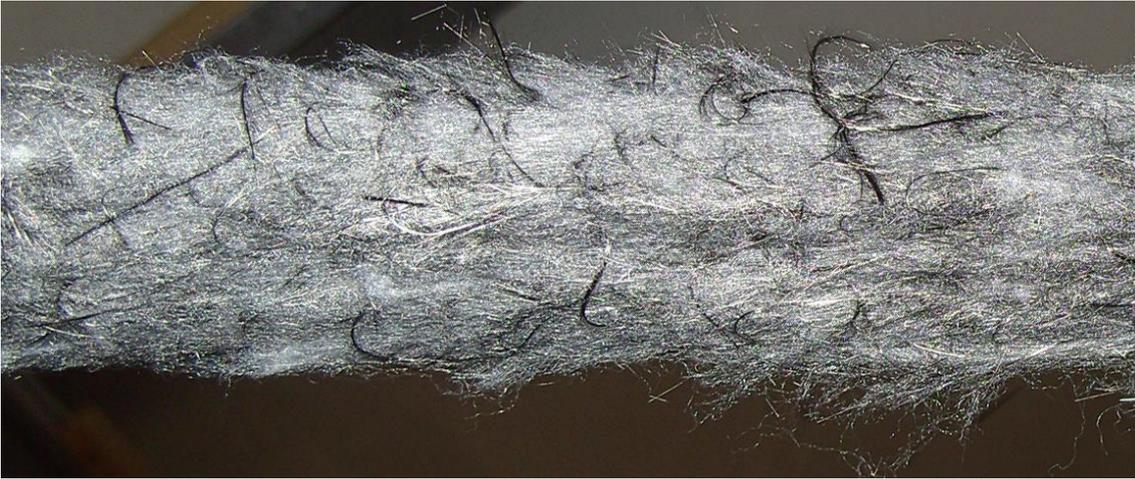


Abb. 10: Carbon/PA-Band mit verbesserter Gleichmäßigkeit und Durchmischung

Untersuchungen der Carbonfaser-Einkürzung an der Krempel zeigten, dass durch das Vorschalten des Feinöffners die Carbonfaser-Einkürzung gegenüber dem zweimaligen Durchlauf auf der Krempel (Phase 1) reduziert werden konnte. Bei der Verarbeitung der 60 mm langen Carbonfasern entstand im Band eine mittlere Carbonfaserlänge zwischen 20 mm und 30 mm.

Nicht aufgelöste Faseransammlungen bei einmaligem Durchlauf der Krempel waren ein Grund für das schlechte Verzugsverhalten. Vor der Anwendung des Feinöffners wurde versucht auf einer Nadelstabstrecke eine Vergleichmäßigung und weitere Faseröffnung der Bänder zu erzielen. Die Vorlage von 8 Bändern an der Strecke ergab keine Verbesserung der Situation sondern führte zu einer Entmischung der Faserkomponenten im Streckfeld (Abb. 11).



Abb. 11: Entmischung zwischen Carbon- (schwarz) und PA-Fasern (weiß) im Streckenband

Hinzu kam, dass die Faseruntersuchung bei den in Phase 2 verwendeten Fasern eine Avivage von 1 % aufwies, während die Fasern in Phase 1 einen Avivageauftrag von 0,1 % besaßen. Es lässt sich feststellen, dass bei recycelten Carbonfasern für die Verarbeitung auf Textilmaschinen eine Avivage vorhanden sein muss, um die Faserschädigung gering zu halten, ein zu hoher Avivageanteil ist jedoch bei der Auflösung der Fasern für den Spinnprozess sowie beim Verziehen der Fasern im Streckfeld hinderlich.

3.1.6 AP 5: Modifikation eines Spinntesters

Die Ermittlung der relevanten Spinnparameter erfolgte in umfangreichen Versuchen auf einem Spinntester am ITV. Die im Rahmen dieses Projektes gewonnenen Erkenntnisse können auf industriell genutzte Maschinen übertragen werden.

Für die Garnherstellung wurde gemeinsam mit der Fa. Gebrüder Otto GmbH & CO. KG ein Spinntester aufgebaut. Als Spinnverfahren wurde aufgrund der Möglichkeit zur Herstellung eines Garnes mit parallelem Garnkern das Umwindespinnverfahren gewählt.

Hierzu wurde an einem Spinntester mit Drei-Zylinder-Streckwerk und einen bereits bestehenden Garnabzug mit Aufwindeinheit eine motorisch angetriebene Hohlspindel montiert (Abb. 12). Mittels mehrerer Umrichter konnten verschiedene Drehzahlen im Streckwerk, an der Spindel und beim Garnabzug realisiert werden. Dadurch konnten die Spinnverzüge sowie Umwindungszahl pro Meter Garn variiert werden.

Für die Umwindung wurde ein PA 6-Filamentgarn verwendet.



Abb. 12: Umwindespinntester des ITV

Das Verstrecken der Krempelbänder erwies sich als sehr komplex. Obwohl der Polyamid-Volumenanteil im Band mit 70 % hoch war, ergab sich das Hauptproblem bei der Anpassung der Streckfeldlängen zu den ermittelten Faserlängen. Üblicherweise werden die Streckfeldlängen nach der längsten im Faserverband vorkommenden Faser eingestellt. Die Faserlängenverteilung ergab jedoch neben einem Hauptanteil um 20 mm bis 40 mm vereinzelte sehr lange Fasern.

Es wurden insgesamt drei unterschiedliche Streckwerke montiert und erprobt.

- Langstapelstreckwerk für Faserlängen bis 150 mm
- Kurzstapelstreckwerk für Faserlängen bis 40 mm
- Kurzstapelstreckwerk mit langem Käfig für Faserlängen bis 60 mm

3.1.6.1 Erkenntnisse Langstapelstreckwerk

Mit dem Langstapelstreckwerk war ein kontrollierter Verzug aufgrund der Vielzahl der schwimmenden Fasern nicht möglich. Es kam zu einer Entmischung von Carbon- und PA-Fasern (Abb. 13), wobei die Carbonfasern zusätzlich eingekürzt wurden, was sich in einem hohen Anteil an Carbonfaserstaub rings um das Streckwerk herum zeigte.



Abb. 13: Entmischtes Faserband nach dem Verzug im Langstapelstreckwerk

3.1.6.2 Erkenntnisse Kurzstapelstreckwerk (40 mm)

Um einen kontrollierteren Verzug zu erhalten, wurde ein Kurzstapelstreckwerk auf dem Umwindespinntester adaptiert. Mit den kürzeren Feldweiten konnten, abhängig von der Bandqualität, Verzüge bis zu vierfach realisiert werden. Bei höheren Verzügen verschlechterte sich das Laufverhalten aufgrund der zunehmenden Entmischung (Abb. 14.)



Abb. 14: Faserbänder mit unterschiedlichem Verzug und unterschiedlicher Entmischung

3.1.6.3 Erkenntnisse Kurzstapelstreckwerk (60 mm)

Um das Laufverhalten weiter zu verbessern, wurde ein langer Käfig mit 60 mm Faserlänge eingesetzt. Das Hauptfeld wurde entsprechend vergrößert. Dadurch konnten die Fehlverzüge reduziert und das Laufverhalten verbessert werden. Jedoch konnte auch mit einem längeren Käfig die zunehmende Entmischung von PA und Carbon bei Hauptverzügen über vierfach nicht verbessert werden.

3.1.7 AP 6: Garnherstellung

Es wurden Hybridgarne (Fasermischung: 30 Vol.-% Carbon / 70 Vol.-% PA 6) unterschiedlicher Feinheit hergestellt. Dabei wurde der Carbonfaser-Anteil im Hybridgarn entsprechend einem 1K, 3K und 6K Roving variiert. Die Versuchsvarianten sind in der Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Versuchsvarianten Garnfeinheit

Variante	Carbonfaser-Anteil in Hybridgarn entspricht Roving von	Anteil der Carbonfasern im Hybridgarn (40,5 Gew.-%)	PA6 Stapelfasern im Hybridgarn (59,5 Gew.-%)	Hybridgarn
		tex	tex	
1K	1K	ca. 66	ca. 164	ca. 230
3K	3K	ca. 200	ca. 295	ca. 495
6K	6K	ca. 400	ca. 588	ca. 988

Ein 12K Carbonfaser-Roving hat etwa 800 tex [4]

3.1.7.1 Garnherstellung mittels Umwindespinnverfahren

Die Hybridgarne wurden auf dem in Kapitel 3.1.6 beschriebenen Umwindespinnstester hergestellt, welcher aus einem Dreizylinderstreckwerk, einer Umwindespindel, einem Abzug und einer Aufwindeeinheit besteht.

Beim Umwindespinnverfahren wird nach dem Verzugsprozess der Faserverband durch die Hohlwelle einer Umwindeeinrichtung geführt und mit einem Filament umwunden. Durch das Zusammenpressen der Fasern durch das Umwindefilament wird die Garnfestigkeit erzeugt.

Die nicht gedrehte Garnstruktur erwies sich als vorteilhaft, da die Drehung des Garnverbands eine hohe Haarigkeit der Garne verursachte und der parallele Garnkern im CFK-Bauteil zusätzlich eine optimale Ausrichtung der Carbonfasern gewährleistet. Neben den Parametern am Streckwerk, die zur Verbesserung der Garnleichmäßigkeit variiert wurden, musste auch der Umwindeprozess an sich näher untersucht werden.

Folgende Parameter wurden untersucht.

- Umwindedrehzahl
- Umwindespannung des Umwindefilaments
- Spinnverzug (Verzug zwischen Ausgangswalze des Streckwerks und Abzugsdruckroller)

Aus den Bändern konnten erfolgreich Garne mit 1, 3 und 6 K Carbonfaser-Anteil ersponnen werden (Abb. 15). Die erzeugten Garne wurden bezüglich der Garnstruktur und den Garneigenschaften, wie Faserlänge und Garngleichmäßigkeit untersucht. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Diagrammen zusammengefasst.

Carbonfaser-Anteil im Hybridgarn entspricht einem Roving von		
1K		
3K		
6K		

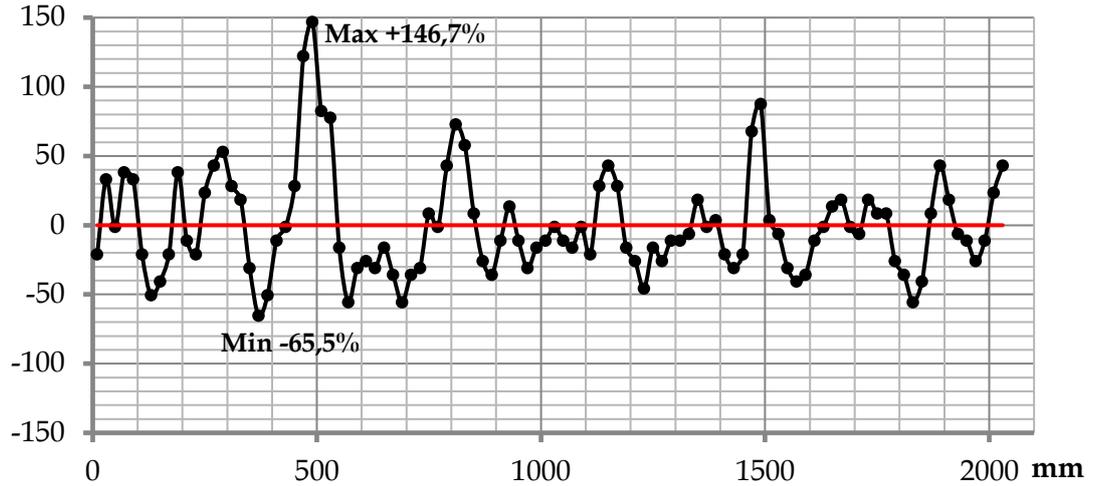
Abb. 15: Umwindegarne mit unterschiedlicher Feinheit und entsprechendem Carbonfaser-Anteil

3.1.7.2 Bestimmung und Analyse der Gleichmäßigkeit der Hybridgarne

Für die Gleichmäßigkeitsmessung der Garne wurde am ITV Denkendorf eine eigene Methode entwickelt, da bei der üblichen Garngleichmäßigkeitsprüfung ein kapazitiver Messsensor verwendet wird, der bei Carbon falsche Werte ergibt. Die Gleichmäßigkeit der Umwindgarne wurde gravimetrisch bestimmt und wie folgt durchgeführt:

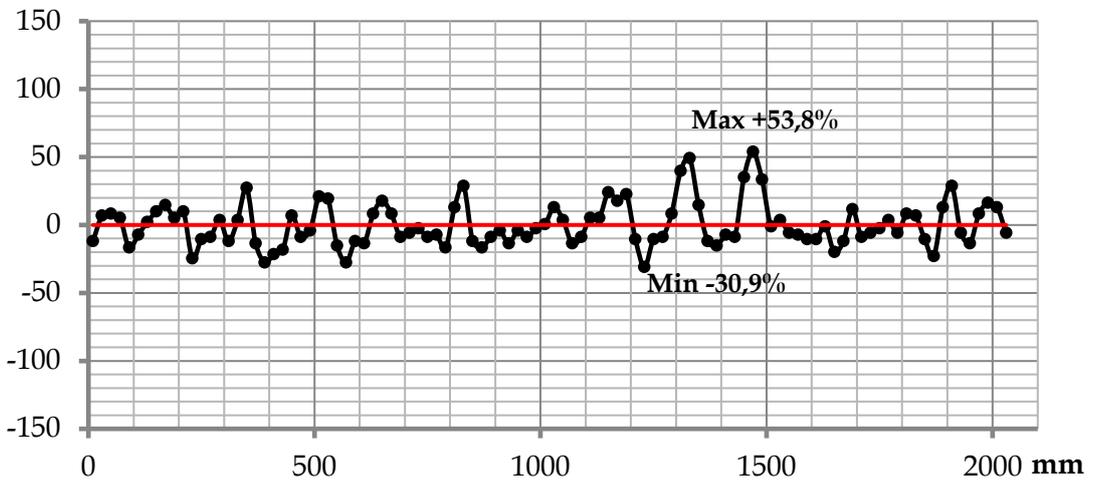
- Das Garn wurde auf einer speziell angefertigten Vorrichtung (Länge 240 mm) befestigt;
- auf eine Länge von je 20 mm geschnitten;
- die Garnabschnitte wurden (auf der Feinwaage Mettler AE 166) gewogen und in **tex** umgerechnet;
- die Messwerte von je 2000 mm Hybridgarn wurden analysiert und in Diagrammen (Abb. 16) zusammengefasst.

Carbonfaser-Anteil im Hybridgarn entspricht 1K Roving



Gewichtsbezogene Garnungleichmäßigkeit [%]

Carbonfaser-Anteil im Hybridgarn entspricht 3K Roving



Carbonfaser-Anteil im Hybridgarn entspricht 6K Roving

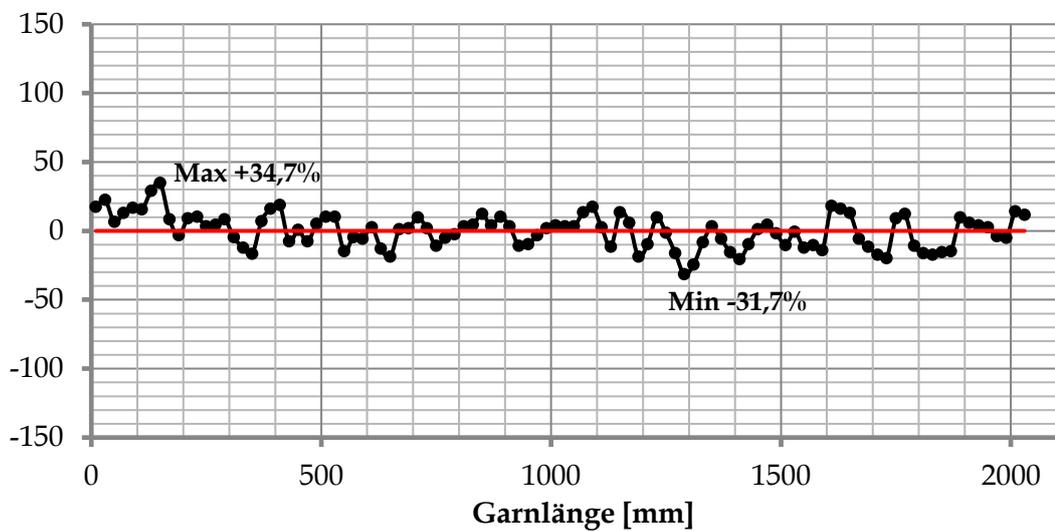


Abb. 16: Gewichtsbezogene Garnungleichmäßigkeit von je 2000 mm Hybridgarn

3.1.8 AP 7: Ermittlung des Werkstoffpotentials

Für den Einsatz der Garne in Faserverbundbauteilen oder anderen Applikationen mussten aus den Garnen Materialkennwerte ermittelt werden. Hierzu wurden die Garne und die Faserverbundproben unterschiedlichen Prüfungen unterzogen.

3.1.8.1 Garnprüfung

Im technischen Labor des ITV wurden an den Garnen folgende Prüfungen durchgeführt.

3.1.8.1.1 Knotenzugversuch

DIN 53842-1: 1976-04 Prüfung von Textilien - Knoten-Zugversuch an einfachen Garnen und Zwirnen

Bei der Knotenfestigkeit werden die Auswirkungen von Scherkräften auf die Messprobe überprüft. Die Messproben werden knotenförmig (Abb. 17) eingespannt und anschließend auf Zugfestigkeit analysiert. Da die Knotenart und Knotenrichtung (S oder Z) das Ergebnis beeinflusst müssen diese Angaben erfolgen. Die Knotenfestigkeit gehört zum Gebiet der Querfestigkeit

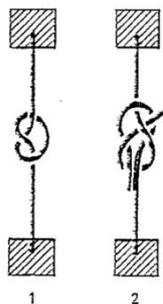


Abb. 17: Skizze Knotenzugversuch [5]

3.1.8.1.2 Schlingenzugversuch

DIN 53843-1: 1992-11 Prüfung von Textilien - Schlingen-Zugversuch – Garne

Bei der Schlingenfestigkeit wird die Messprobe auf Querbeanspruchung analysiert. Hierzu wird die Messprobe Schlingenförmig (Abb. 18) eingespannt und nachfolgend auf Zugfestigkeit analysiert.

Die Schlingenfestigkeit gehört zum Gebiet der Querfestigkeit und gibt Auskunft über Sprödigkeit und Schmiegsamkeit eines Materials.



Abb. 18: Skizze Schlingenzugversuch [6]

3.1.8.1.3 Höchstzugkraft

DIN 53834-1 (mittlerweile ersetzt durch DIN EN ISO 2062)

Diese Norm beschreibt den einfachen Zugversuch an Garnen. Die Prüfung dient der Ermittlung des Zugkraft- Längenänderungsverlaufes, einschließlich der Zugkraft und der Längenänderung unmittelbar beim Bruch der Messprobe.

3.1.8.1.4 Ergebnisse der Garnprüfung

Bei den drei zuvor genannten Prüfungen an den Garnen wurden die nachfolgenden Ergebnisse erzielt (Abb. 19).

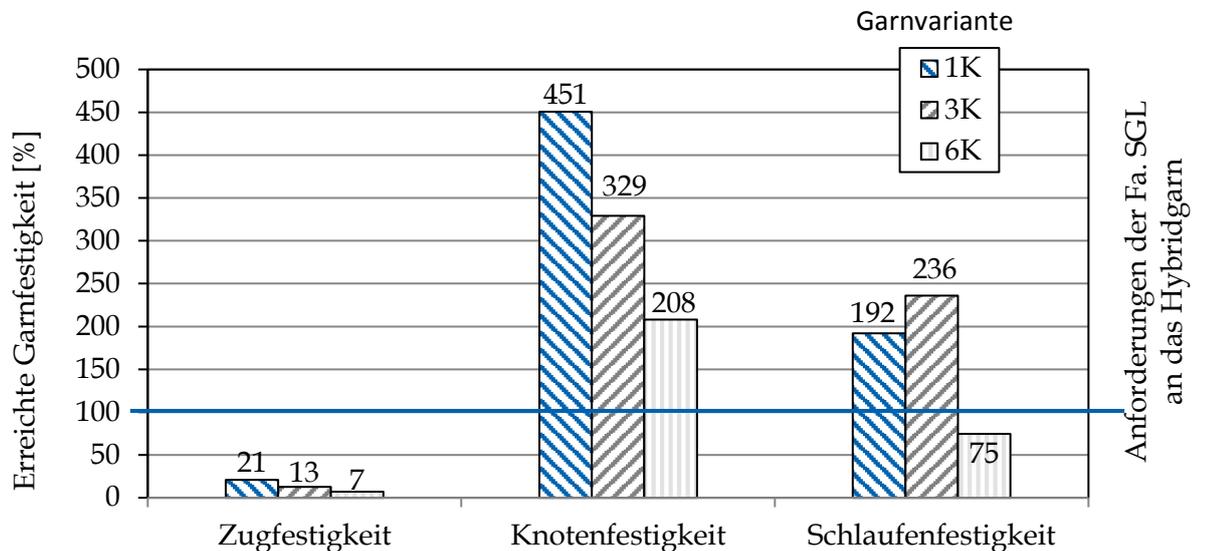


Abb. 19: Gegenüberstellung der erreichten Festigkeit der Hybridgarne im Vergleich zu den Anforderungen der Fa. SGL CARBON GmbH

Das Diagramm (Abb. 19) zeigt, dass die Zugfestigkeiten deutlich unter der von der Fa. SGL CARBON GmbH gestellten Anforderung lagen. Im Falle des 6 K Rovings 93 % unter dem geforderten Wert. Das liegt an der gewählten Garnkonstruktion, die parallele

Fasern im Garnkern und eine relativ lockere Umwindung aufweist. Durch eine strammere Umwindung würde sich die Garnfestigkeit erhöhen allerdings verlieren die Carbonfasern im Garnkern an Parallelität.

Weiter kann man dem Diagramm in Abb. 19 entnehmen, dass eine Knoten- oder Schlaufenbildung nicht zur Bildung einer Schwachstelle im Garn führt. Genau das Gegenteil ist der Fall. Durch den Knoten oder die Schlaufe wird der Garnquerschnitt am Belastungspunkt reduziert, der Faserverband komprimiert und dadurch die Kraftübertragung der Fasern erhöht. Bei einem Garn, das vergleichbar zu einem 1 K Roving ist kann damit die gestellte Anforderung von SGL CARBON GmbH mit über 400 % übertroffen werden.

3.1.8.1.5 Herstellung mechanischer Prüfkörper

Um die Eignung der Hybridgarne für den Einsatz in Verbundwerkstoffen zu überprüfen, wurden die mechanischen Kennwerte der aus den Garnen gefertigten Verbundmaterialien bestimmt. Hierfür wurden aus den gesponnenen Garnen und aus dem erzeugten Vlies jeweils nach DIN EN ISO 14125 plattenförmige Probekörper hergestellt. Um die Eigenschaften der Probekörper vergleichen zu können, erfolgte die Bestimmung der Kennwerte im Dreipunkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 14125.

Aus dem Hybridgarn wurden Probekörper mit einer Länge von 100 mm, einer Breite von 15 mm und einer Höhe von 2 mm hergestellt. Dazu wurde das Hybridgarn händisch in eine spezielle Pressform gewickelt, in einer Heißpresse der Firma Lauffer bei 250 °C und 100 bar 20 min lang gepresst und über Nacht bei einer geringen Abkühlrate und bei konstantem Pressdruck konsolidiert (Abb. 20). Trotz der nicht erreichten definierten Anforderungen an die Garnfestigkeit, war die Verarbeitung der Garne zu Faserverbundplatten problemlos möglich.

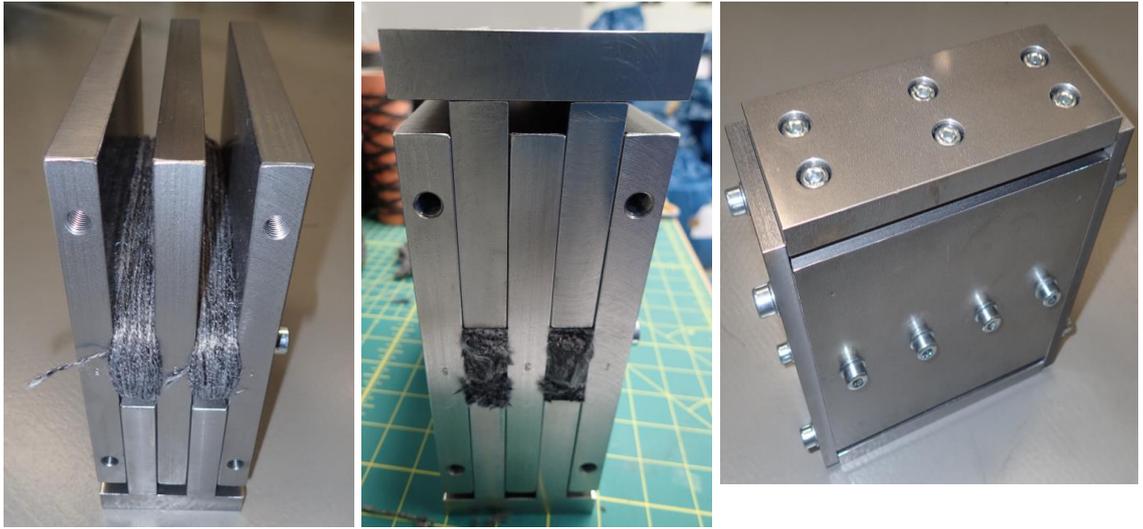


Abb. 20: In die Pressform gewickeltes Hybridgarn

Aus den nach dem Pressen erhaltenen Rohlingen wurden die Probekörper in den genannten Dimensionen herausgesägt (Abb. 21).

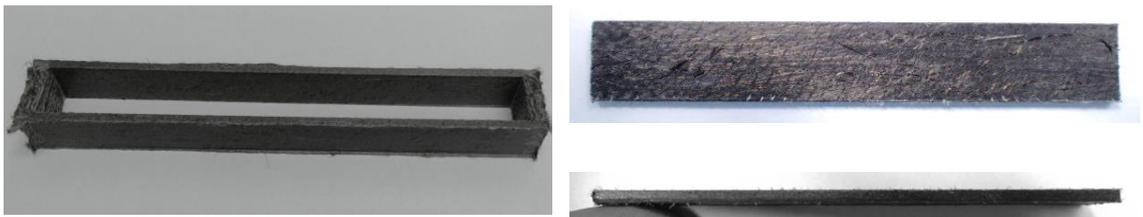


Abb. 21: Garnprobekörper für die Biegeprüfung

Die Vliese wurden direkt zu Faserverbundplatten verarbeitet und aus ihnen Probekörper entnommen. Um die entsprechende Lagendicke zu erreichen wurden für die Platten ca. 20 Lagen Vlies übereinander gelegt und ebenfalls bei 250 °C auf der Laufer-Pressen gepresst. Das Vlies, der Lagenaufbau und ein ausgeschnittener Probekörper sind in Abb. 22 gezeigt.



Abb. 22: Verwendeter Vliesstapel aus Carbon und Polyamid 6 mit Darstellung der Maschinenlaufichtung sowie daraus hergestellter Probekörper

3.1.8.1.6 Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfung

Die Proben werden bis zum Bruch belastet. Abb. 23 zeigt das Bruchbild.



Abb. 23: Gebrochener Garnprobekörper

Im Vergleich zu den Probekörpern aus Vliesen konnte die Biegefestigkeit der Probekörper aus Hybridgarn durchschnittlich um bis zu 30 % gesteigert werden. Zusätzlich konnte die Steifigkeit des Verbundmaterials deutlich erhöht werden. Der Biegemodul des Garnprüfkörpers nahm durchschnittlich um bis zu 120 % zu. Obwohl die hergestellten Garne die zuvor erläuterten Garnkennwerte nicht erreichen, zeigen die ermittelten Materialkenndaten einen deutlichen Trend. Durch die bessere Orientierung der Fasern im Garn - und damit im Halbzeug - ergeben sich deutlich bessere Materialeigenschaften. Dies führt wiederum bei gegebener Beanspruchung zu einem deutlichen Materialeinsparpotenzial gegenüber dem Einsatz von Vliesstoffen.

3.1.9 AP 8: Wirtschaftliche Betrachtung

Die Ergebnisse der Materialprüfungen zeigen, dass der Mehraufwand durch den Spinnprozess gegenüber der Vliesherstellung gerechtfertigt ist. Bei der Herstellung von semistrukturellen Bauteilen im Automobil werden nicht maximale Zugkräfte gefordert, vielmehr werden Bauteile hinsichtlich Biegesteifigkeit optimiert.

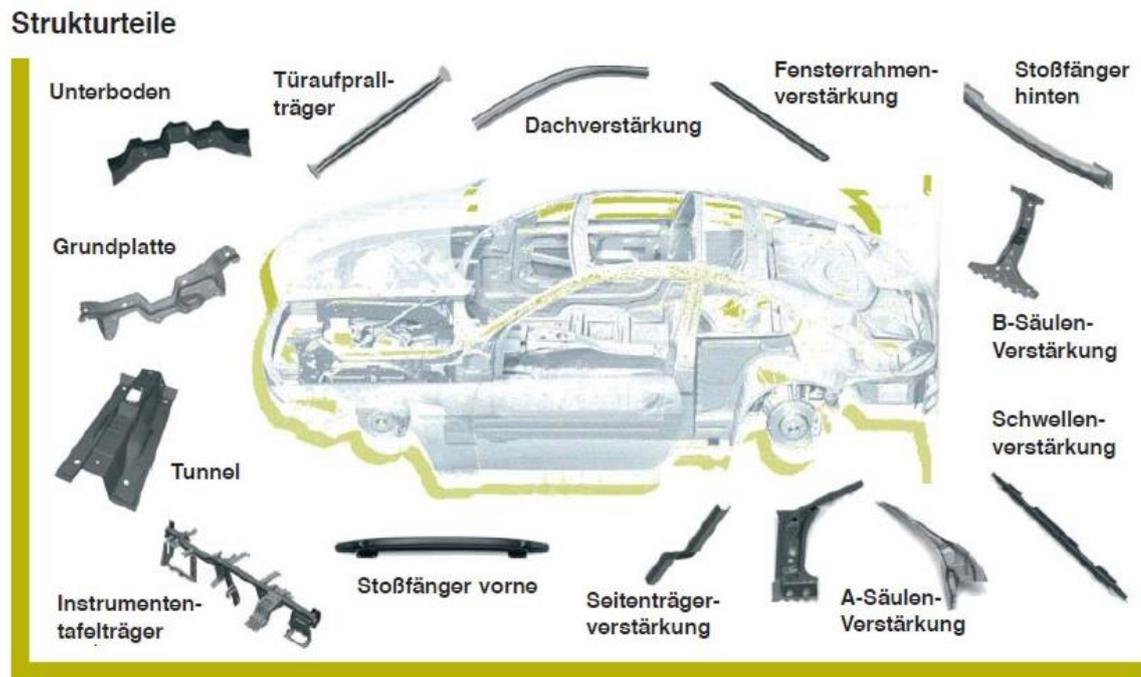


Abb. 24: Strukturbauteile beim Automobil [7]

Sprichwörtlich rund um das Automobil werden heute zum Schutz der Fahrgastzelle Strukturbauteile verbaut, die im Impuls- bzw. Belastungsfall, bei Anprall oder Unfall, gleichzeitig die Struktur bewahren, Energie absorbieren und die Last auf eine größere Fläche verteilen können. Die Biegesteifigkeit solcher Strukturen spielt dabei eine entscheidende Rolle.

Ebenso sind Anwendungen in allen anderen Bereichen der Mobilität prädestiniert für die Anwendung von Bauteilen, die material- und damit gewichtsparend unter Belastung zu einer hohen Dimensionsstabilität der Gesamtstruktur beitragen können.

3.1.10 AP 9: Projektkoordination

Für die effiziente Bearbeitung des Projektes, wurden regelmäßige Treffen zwischen den Projektpartnern, Fa. Gebrüder Otto GmbH & CO. KG, SGL CARBON GmbH und dem ITV Denkendorf zum Informationsaustausch und zur Festlegung des weiteren Vorgehens durchgeführt. Die eingefügten fünf Meilensteine dienten dem Vergleich der

erreichten Ergebnisse mit den Projektzielen und ermöglichten eine bedarfsgerechte Steuerung des Projekts. Dies war notwendig, da die geplanten Ressourcen für die Realisierung nicht ausreichend waren und durch zusätzliches Personal kompensiert werden musste, um das Projektziel sicher zu erreichen. Insbesondere die Verzugsprobleme und der damit zusammenhängende häufige Umbau des Spinntesters waren dafür ausschlaggebend.

3.2 Bewertung der Vorhabensergebnisse

3.2.1 Betrachtung der Umweltrelevanz

Im Leichtbau ist eine hohe Umweltrelevanz in der Anwendung gerade und besonders im Automobilbau gegeben. Angesichts sich verknappender Energieressourcen ist die Automobilindustrie ein zwingend sich ergebendes Anwendungsfeld. Es ist bekannt, dass eine 20 %-ige Gewichtsreduktion im Automobil zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs im Bereich um 8% führt [8]. Der resultierende geringere Rollwiderstand macht eine Gewichtsreduktion bei Autos mit Verbrennungsmotor attraktiv, besonders aber auch im Bereich des E-Automobilbaus. Energieersparnis führt hier bekanntlich zu größeren gefahrenen Reichweiten der heute noch reichweitenbegrenzenden Akkumulatoren.

Abb. 1 verdeutlicht, dass nur unidirektionale CFK-Materialien, mit vergleichsweise wenig Carbonfasern im Stande sind, per Gewichtseinsparung über eine Fahrleistung von 250.000 km zu einer Senkung des Primärenergiebedarfs gegenüber dem Einsatz herkömmlicher Materialien zu führen. Quasi-isotrope CFK-Materialien (z.B. Vliese) schneiden aufgrund der notwendigen Menge an Carbonfasern über dieselbe Fahrleistung gegenüber herkömmlichen Materialien beim Primärenergiebedarf katastrophal ab – und das bei ungeklärter Recyclingfrage.

Ab dem 01.01.2015 müssen nach Altauto-Verordnung in der Fassung vom 31.08.2015 bei der Entsorgung 95% des Leergewichts wiederverwendet und verwertet werden bzw. 85 % des Leergewichts einer Wiederverwendung und stofflicher Verwertung (Recycling) zugeführt werden. [9]

Die negative Primärenergiebilanz einerseits und die Recyclingvorgaben an die Automobilindustrie andererseits führen aus Umweltsicht zwangsläufig dazu, eine praktikable und wirtschaftlich effiziente Methode zur Wiederverwendung von Carbonfasern im Sinne dieses Forschungs-vorhabens zu erarbeiten und umzusetzen.

3.2.2 Technologische und ökonomische Relevanz

Bei der Verwendung von Preforms zur Herstellung von CFK-Bauteilen im Liquid Composite Moulding (LCM)-Verfahren fallen zwischen 15% [10] und bis zu 40 % [11] Verschnitt an. Mit dem erarbeiteten Verfahren ist es gelungen, aus Abfällen, die weltweit im Jahre 2020 im Bereich von jährlich bis zu ca. 20 kto/a anfallen werden ein vergleichsweise hochwertiges Produkt herzustellen. Die Technologie bedeutet kein

Downcycling, sondern die Schaffung von uni-direktionalen CFK-Strukturen, die in der Lage sind, gegenüber der verbreiteten Anwendung von quasiisotropen CFK-Strukturen nunmehr mit reduzierten Materialeinsatzmengen an Carbonfaser Lasten und mechanischen Impulsen ebenso gut zu widerstehen. Wenn auch Bauteile aus recycelten unidirektionalen Garnen dieser neuen Art technisch nicht ganz an die Eigenschaften von Bauteilen aus originären CF-Fasern heranreichen, so wird dennoch eine neue Nische besetzt werden, zwischen den sehr teuren Bauteilen aus originären CF-Fasern und den ökologisch sehr nachteiligen Bauteilen aus quasiisotropen Fasern in CF-Vliesbauteilen. In einem zukünftigen Markt ist es wahrscheinlich, dass diese Nische sich vergrößern wird und nach der Devise „So gut wie nötig und so energieeffizient wie möglich“ einen ökologisch und ökonomisch vernünftigen Stellenwert bekommen wird.

3.2.2.1 Technologisches Ziel

Klares, aus dieser Arbeit sich ergebendes Ziel ist eine Konsolidierung der Methode hinsichtlich der allgemeinen Anwendbarkeit. Es hat sich gezeigt, dass Variationen beim Vorlagematerial hinsichtlich Ursprung, Avivagegehalt, Begleitstoffen infolge der originären Verfestigungstechnologie, Art des Aufschlusses (thermisch oder Lösemittelbasiert) etc. zu sehr verschiedenen Ergebnissen und damit zu verschiedenen Möglichkeiten für einen erneuten Einsatz als unidirektionale Garnkonstruktion führen. Die jeweiligen Ableitungen zur anzuwendenden Technologie und den sich ergebenden Eigenschaften müssen in folgenden Untersuchungen katalogisiert werden, um hoch flexible Anlagen konzipieren zu können, die ein weites Spektrum an Recyclingmaterialien aus Carbonfaser verarbeiten und Recyklate mit jeweils optimalen Eigenschaften ermöglichen können.

Es hat sich auch gezeigt, dass vorab zur Bedingung gesetzte Eigenschaftsprofile zunächst nur Annahmen sein können, da ein erst in der Erforschung entstehendes Produkt ein neues Eigenschaftsportfolio besitzen kann, das fehlende Ausprägungen zuvor geforderter Eigenschaften ausgleichen kann. So konnten z.B. trotz sehr schlechter Festigkeitswerte, im Vergleich zur ursprünglichen Anforderung, sehr feste und biegesteife Prüfkörper erstellt werden, zu deren Funktionieren die ursprüngliche Garnfestigkeit eine untergeordnete Rolle spielt. Ziel ist deshalb auch das Erarbeiten der Anforderungen an unidirektionale CF-Recyklat-Garne unter den sich aus Phase 2 ergebenden neuen Erkenntnissen. Beispielsweise sind auch die Art und möglichen Anteile der Matrixfasern für die Funktion in abgeleiteten neuen Bauteilen aus

unidirektionalen Recyklatgarnen aus Carbon unter den gewonnenen Erkenntnissen neu zu erforschen und zu bewerten.

Am Ende sollte ein reales Bauteil aus einer voll beherrschten Prozesskette zur Herstellung recycelter unidirektionaler CF-Garne stehen, welches mit der geforderten Produktsicherheit seine Aufgaben am Ort des Verbaus erfüllt.

3.2.2.2 Ökonomisches Ziel

In der Vorausschau auf das Jahr 2021 gibt der Carbon Composites e.V. in seinem Marktbericht 2015 in der Schätzung eine weltweite Carbonfaserproduktion von ca. 116.000 Jahrestonnen an. Davon werden im Bereich von mindestens 15% analog ca. 20.000 Jahrestonnen an Verschnittmaterial für das Faserrecycling zur Verfügung stehen [12]. Das ökonomische Ziel dieser Arbeit ist eine Produktion von unidirektionalen CF-Recyklatfasern aus Verschnittmaterialien, die die vom Markt geforderte und gleichzeitig in der erforderlichen Güte zur Verfügung stehende Menge an verarbeitbarer CF-Recyklatfaser wirtschaftlich darstellen kann. Die Zielkosten der Summe aller erforderlichen Prozesse für eine solche Produktion dürfen die Kosten für ein Vergleichsmaterial aus Primärfasern nicht übersteigen bzw. sollten signifikant niedriger liegen. Ein Hybridgarn aus 50% bis 70% Polymeranteil darf bei entsprechend gutem Eigenschaftsprofil laut Aussagen von marktkundigen Anwendern ca. 10,00 €/kg kosten. Marktpotentiale für ein Produkt aus solchen recyklierten Carbonfasern werden im Bereich von 100 to/a bis zu 1000 to/a geschätzt.

In Berechnungsmodellen gelingt eine wirtschaftliche Darstellung für eine Startmenge von bereits 10 t/a. Dazu wurden marktübliche Preise für Recyklat- und Polymerfasern von jeweils 3,50 €/kg, deren Aufbereitung sowie die Kosten für den Krempelprozess und die Garnherstellung herangezogen, unter der Annahme, dass für diese Pilotanlage in dieser Anfangsphase sinnvollerweise mit Maschinenpreisen für entsprechende Gebrauchtanlagen gerechnet wurde. Die carbonspezifischen Anforderungen an die Abschirmung der elektrischen Anlagenteile sowie an die Forderungen an die Arbeitssicherheit wurden berücksichtigt. In einem nächsten Produktions-Up-scale könnten dann Neumaschinen eine größere jährliche Produktionsmenge bearbeiten, in die dann technisch/technologisch das erarbeitete Wissen, gerade auch um die besonders verschleißexponierten Anlagenteile der Pilotanlage, einfließen kann.

Bei kalkulierten Fertigungskosten von ca. 5,50 €/kg und unter Berücksichtigung von zu erwartenden Faserabgängen während der Produktion belaufen sich die Gesamtkosten auf knapp unter 10,00 €/kg. Der zuvor genannte Zielpreis für ein Hybridgarn mit Polymeranteil von 50% bis 70% ist also realisierbar.

Jedoch sind bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung gewisse Nebenaspekte nicht außer Acht zu lassen. Um die Rentabilität zu gewährleisten ist eine enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit mit Lieferanten und Kunden absolute Voraussetzung, da die Abhängigkeit beiderseitig sehr hoch ist. Auch wenn ein schrittweiser Aufbau mit Gebrauchsmaschinen in einer Anfangsversion von 10 Tonnen pro Jahr denkbar wäre so müssen langfristige Abnahmeverträge mit Kunden/Lieferanten möglich sein. Darüber hinaus kommen konkrete Anfragen und Aussagen zu Zielpreisen aktuell von nur zwei potentiellen Kunden, die aber eventuell sogar denselben Endkunden haben.

3.3 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Hybridgarne aus recycelten Carbonfasern mit einem Anteil von polymeren schmelzbaren Faserstoffen, können eine effiziente und wirtschaftliche Grundlage für neue Entwicklungen im rasant wachsenden Markt des Leichtbaus und der E- Mobilität bedeuten. Angesichts erster größerer Erfolge ausländischer Automobilunternehmen in der E-Mobilität sowie beginnender staatlicher Förderung z. B. auch in Deutschland bekennen sich vermehrt auch viele der großen deutschen/ europäischen Automobilunternehmen zum Trend und setzen in die Entwicklung neuer Modelllinien mit Elektro- bzw. hybridem Antrieb in Richtung Massenfertigung. Die Frage nach einem effektiven Recycling-Prozess gewinnt durch diese Entwicklung sehr an Brisanz.

Während dieser Forschungsarbeit der Phase 2, auch im direkten Vergleich mit den ersten Ergebnissen der Phase 1, wurde die enorme Bedeutung der Provenienz, des Ursprungs und die im ersten Lebenszyklus der Carbonfasern erfahrene Vermischung mit verschiedenen Avivagen, Harzen und Begleitpolymeren als Voraussetzung für effiziente Recyclingprozesse wie dem Ausspinnen von Hybridgarne offenbar.

Eine Veröffentlichung sollte erst nach endgültiger Untersuchung aller die recycelte Carbonfaservorlage betreffenden Parameter (neben den bekannten Faserkennwerten auch die Chemie und Physik der Begleitsubstanzen und die Aufschlusstechnologie) sowie der Zumischung anwendungsspezifisch geeigneter Matrixfasern in optimaler Anteilsmenge in Bezug auf die erzielbare Qualität der erspinnbaren Garne vorgesehen werden.

4 Fazit

Das Ziel des Entwicklungsprojekts der Phase 2- eine komplette Prozesskette zu erstellen, die eine Wiederverwendung von recycelten Carbonfasern zu einem Halbzeug, mit möglichst langen, orientierten Carbonfasern ermöglicht - konnte im abgeschlossenen Projekt erreicht werden.

Hierzu wurden alle Parameter einer kontinuierlichen Prozesskette zur Herstellung von Garnen aus recycelten Carbonfasern erforscht und optimiert. Es konnte erfolgreich ein Hybridgarn aus recycelten C-Fasern in Kombination mit PA 6-Fasern gesponnen, daraus UD-Probekörper hergestellt und erste Materialkennwerte ermittelt werden.

Als übergeordnetes Ziel des Vorhabens galt es zu beweisen, dass CFK Bauteile, die aus einem Stapelfasergarn hergestellt werden, eine höhere Festigkeit besitzen, als CFK-Bauteile aus einem Vlies. Der Grund für die höhere Festigkeit liegt in einer gerichteten Faserstruktur beim Garn gegenüber einer Faserwirrlage beim Vlies. Der Vergleich der Biegefestigkeitswerte hat bestätigt, dass der Garnprüfkörper eine bis zu 30 % höhere Festigkeit aufweist. Das bedeutet für Faserverbundbauteile nach aktuellen Erkenntnissen eine Materialeinsparung von bis zu 30 % bei der Verwendung von Halbzeugen aus Hybridgarnen mit recycelten Carbonfasern im Vergleich zu Hybridhalbzeugen aus Vlies.

Mit Abschluss der Phase 2 kann deutlich gesagt werden, dass die Forschung zum Thema Hybridgarnherstellung aus recycelten Carbonfasern noch lange nicht abgeschlossen ist.

Es konnte in Phase 2 gezeigt werden, dass Hybridgarne aus recycelten Carbonfasern durch Modifikation bestehender Textiltechniken kontinuierlich herstellbar sind, jedoch gibt es entlang der kompletten Prozesskette viele Optimierungsmöglichkeiten.

Es ist beispielsweise denkbar durch eine bessere Parallelisierung und Orientierung der recycelten Carbonfasern im Garn oder neue Garnstrukturen die Carbonfasern effizienter einzusetzen wodurch sich die Möglichkeit bietet das Hybridgarn in hoch beanspruchten Bauteilen zum Einsatz zu bringen.

Das spannende und herausfordernde Technologiefeld der CF-Aufbereitung birgt enorme Chancen in ökonomischer und ökologischer Hinsicht. Die im Kern entwickelte, ressourcenschonende und dennoch hohe Anforderungsportfolios bedienende Technologie der Herstellung der CF-Garne mit integrierter Matrix wird seine feste Daseinsberechtigung im Markt erfahren, unter der Voraussetzung, dass dies auch durch die kommenden Produktions-Upscales nachhaltig bewiesen werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] G. D. Fraunhofer IBP, „Leichtbau in Mobilität und Fertigung. Ökologische Aspekte,“ E-Mobil BW GmbH, Stuttgart, 2012.
- [2] Barnet Europe - W. Barnet GmbH & Co.KG, „Barnet Europe Fibers Brochure,“ [Online]. Available: <http://www.barnet-europe.com/de/service/fibers.html>. [Zugriff am 23 08 2016].
- [3] Laroche S.A., Handbuch Supertrim 500 Opener, Cours la ville - Frankreich.
- [4] CHEMIE.DE Information Service GmbH, „Chemie.de,“ [Online]. Available: <http://www.chemie.de/lexikon/Roving.html>. [Zugriff am 23 08 2016].
- [5] DIN 53842-1, „Prüfung von Textilien - Knoten-Zugversuch an einfachen Garnen und Zwirnen“. 1976-04.
- [6] DIN 53843-1, „Prüfung von Textilien - Schlingen-Zugversuch-Garne“. 1992-11.
- [7] „Automobil Produktion,“ [Online]. Available: <http://www.automobilproduktion.de/2009/10/benteler-kauft-struktur-sparte-von-norsk-hydro/> 2015. [Zugriff am 26 03 2015].
- [8] H. Block, „Technologiekonzept Volkswagen XL1. CCEV Automotive Forum,“ Ingolstadt, 2011.
- [9] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, <http://www.juris.de>, „AltfahrzeugV, § 5 Entsorgungspflichten,“ [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/altautov/BJNR166610997.html>. [Zugriff am 02 08 2016].
- [10] T. Rademacker, Wischhafen: CFK Valley Recycling GmbH, 2011.
- [11] R. Emmerich und J. Kuppinger, „Kohlenstofffasern wiedergewinnen,“ *Kunststoffe*, Nr. 06, pp. 92-97, 06 2014.
- [12] T. Kraus und M. Kühnel, „Composites-Marktbericht 2015,“ Carbon Composites e.V., AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., Augsburg, 2015.

