

**Neue Leichtbaupotentiale durch Entwicklung  
eines kostengünstigen, neumaterialäquivalenten  
Carbonfaserverbund-Rezyklatwerkstoffs aus  
carbonfaserhaltigen Abfällen  
(Recarbo-CF-Batch)**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt  
**Az: 33319**

von

Tim Rademacker  
CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG

Dipl. Ing. Michael Tesch  
Kunststoff-Institut  
für die mittelständische Wirtschaft NRW GmbH

Wischhafen, März 2019

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>33319</b>	Referat	<b>21</b>	Fördersumme	<b>324.781 €</b>
----	--------------	---------	-----------	-------------	------------------

**Antragstitel** **Neue Leichtbaupotenziale durch Entwicklung eines kostengünstigen, neumaterialäquivalenten Carbonfaserverbund-Rezyklatwerkstoffes aus carbonfaserhaltigen Abfällen**

**Stichworte** Recarbo-CF-Batch

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>24 Monate</b>	<b>06.12.2016</b>	<b>05.12.2018</b>	<b>4</b>

Zwischenberichte	zum 30.06.2017,	zum 31.12.2017,	zum 30.06.2018
------------------	-----------------	-----------------	----------------

<b>Bewilligungsempfänger</b>	CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG	Tel	04770-801213
	Stader Straße 55-63	Fax	04770-8018213
	21737 Wischhafen	Projektleitung	
	Deutschland	Tim Rademacker	
		Bearbeiter	
		Kerstin Hensel-Tobaben	

**Kooperationspartner** Kunststoff-Institut Lüdenscheid  
Karolinenstraße 8  
58507 Lüdenscheid  
Deutschland  
Ansprechpartner: Michael Tesch (Tel.: 02351-1064160)

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Das Ziel dieses Projektes ist die Weiterentwicklung der aus dem ersten Projekt ReCarbo hervorgegangenen Lieferform „Fiberball“. Diese Lieferform besitzt den Vorteil, dass sie ohne komplexe Anlagentechnik sowie sicherheitstechnische Bedenken verarbeitet werden kann. Das Verfahren hat sich zur Herstellung von Fiberballs aus relativ kurzen Carbonfasern bewährt. Längere Carbonfasern (> 2mm Länge), die für hochwertige CF-Kunststoffcompounds benötigt werden, ergaben nach den ersten Ansätzen Fiberballs mit einem zu niedrigen Schüttgewicht. Für den Marktdurchbruch dieser Lieferform werden weitere, verbesserte Entwicklungsstufen benötigt. Der Fokus liegt hierbei auf der Entwicklung neuartiger CF-Compounds, die im Hinblick auf den ressourcenschonenden Werkstoffeinsatz und die damit verbundene Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emission, größtmögliche Marktrelevanz erwarten lassen. Dieses Ziel soll durch Additivstudien sowie weitere Optimierungen der Verfahren zur Fiberballherstellung erreicht werden.

Ein weiterer Ansatz ist die Überführung recycelter Carbonfasern in einen hoch gefüllten CF-Batch. Diese neuartigen Batche könnten eine Alternative zur Fiberballherstellung bieten und sollten Vorteile bei der Verarbeitung längerer Fraktionen aufweisen. Hierzu werden Anforderungen definiert, nach deren Kriterien die Materialentwicklung umgesetzt werden soll. Erste Anwendungen sollen möglichst seriennah realisiert werden, um durch Nutzung dieser Beispiele eine hohe Marktakzeptanz zu erzielen.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Die einzelnen Arbeitsschritte und deren zeitliche Staffelung sind im beiliegenden Arbeitszeitplan dargestellt. Im Verlauf des Projektes werden sich die Arbeitspakete gegenseitig beeinflussen und es wird immer wieder Rückkopplungen zwischen den einzelnen Arbeitspaketen geben. Die Arbeitspakete sind in der beigefügten Tabelle näher beschrieben.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Im Rahmen der zweijährigen Arbeit am Projekt, wurde das Ziel, eine marktrelevante Anwendung für rezyklierte Carbonfasern zu identifizieren und die entsprechenden Anforderungen an die Lieferform umzusetzen, konsequent verfolgt.

Ziel des Projektes war die Weiterentwicklung der aus dem Projekt ReCarbo hervorgegangenen Lieferform „Fiberball“ sowie die Überführung längerer recycelter Carbonfasern in hoch gefüllte CF-Batches. Der Fokus lag auf der Entwicklung neuartiger CF-Compounds, die im Hinblick auf den ressourcenschonenden Werkstoffeinsatz und die damit verbundene Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emission größtmögliche Marktrelevanz erwarten lassen.

Auf Basis des Projektes ist es nunmehr möglich, längere Carbonfaserfraktionen in rieselfähige Formen (fiberball, Pellets) zu überführen und somit die von den Endanwendern vorrangig geforderte mechanische Festigkeit in CF-Composites zu erreichen.

Durch diverse Bemusterungen bei Endanwendern konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, bereits etablierte carbon- und glasfaserverstärkte Kunststoffe zu ersetzen. Verglichen mit Carbonfasercompounds aus Faserneuware lassen sich durch die Verwendung recycelter Carbonfasern die Materialkosten erheblich reduzieren.

Um die Wiederverwendung von recycelten Carbonfasern zu forcieren, muss jedoch die Akzeptanz für das Material durch die Einführung von Normierungs- und Standardisierungsverfahren für Halbzeuge aus rCF erhöht und dadurch die Marktdurchdringung dieses Wertstoffes weiter verbessert werden.

Erst wenn die Anwender in großem Maßstab recycelte Carbonfasern einsetzen, kann der Wertstoffkreislauf vollständig, nachhaltig und wirtschaftlich geschlossen werden.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Das Konsortium hat auf zahlreichen Seminaren, Tagungen und Messen auf das Projektvorhaben hingewiesen und die Ergebnisse entsprechend präsentiert.

Am KIMW wurde eine Dauerpräsentation eingerichtet, durch die das Projekt ausführlich dargestellt wurde. Zudem wurden im Institut in zwei unterschiedlichen Bereichen Vitrinen zur Verfügung gestellt, in denen der Wertschöpfungsprozess abgebildet wird (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Das Projekt konnte so zahlreichen Besuchern und Kunden nähergebracht werden. Die dadurch entstandenen Kontakte werden auch nach Beendigung der Projektarbeit weiterverfolgt.

Potentielle Kunden wurden während der Teilnahme an verschiedenen Messen oder bei Arbeitskreistreffen, an denen die CFK Valley Stade Recycling beteiligt war, identifiziert, angesprochen und zum Teil mit diversen Lieferformen bemustert. Deren Anforderungen und Rückmeldungen flossen in die Überlegungen zum Projekt und die weitere Versuchsplanung ein.

## **Fazit**

Das Ziel dieses Projektes, neuartige CF-Compounds zu entwickeln, die hinsichtlich eines ressourcenschonenden Werkstoffeinsatzes größtmögliche Marktrelevanz erwarten lassen und die das Potential besitzen, bereits in der Produktion von Kunststoffherzeugnissen etablierte Halbzeuge ersetzen zu können, wurde weitgehend erreicht. Die im vorangegangenen Projekt erarbeiteten Zusammenhänge konnten genutzt, weiter vertieft und der Weg zur technischen Umsetzung durch Optimierung der Carbonfaserwechselwirkung mit der PP- oder PA-Matrix klar ausgearbeitet werden. Die für den Markteinstieg relevante Technologie wurde bereits im kleintechnischen Maßstab geprüft und bestätigt.

Dazu war es notwendig, die Lieferform „Fiberball“ und weitere gut dosierbare rCF-Pelletformen hinsichtlich der Verwendung in carbonfaserverstärkten Compounds zu optimieren und weiterzuentwickeln sowie Anforderungen von Endanwendern zu identifizieren und umzusetzen.

Aufgrund von Verzögerungen bei der Optimierung der Pelletformen und den Schwierigkeiten bei der Zudosierung längerer Faserfraktionen reichte die Projektzeit für die anwenderspezifische Umsetzung leider nicht aus. Die zugehörigen Arbeiten sind jedoch so essentiell, dass sie auch nach Projektende

fortgesetzt werden. Entsprechende Bemusterungen bei unserem assoziierten Partner EMB Papst sind bereits veranlasst.

Hinsichtlich der Optimierung der Lieferformen wurden wesentliche Ergebnisse aus dem Projekt generiert. Besonders wichtig ist die Erkenntnis der Zusammenhänge zwischen der Faserlängenverteilung in den Compounds und den erzielten maximalen mechanischen Festigkeitswerten. Um Carbonfaser-Compounds mit exzellenten mechanischen Festigkeitswerten herzustellen, muss es gelingen, die Faserlänge in den Compounds noch weiter zu erhöhen und ein möglichst hohes Schüttgewicht zu erreichen, damit diese rezyklierten Carbonfaserhalbzeuge überall eingesetzt werden können und die Hemmnisse ausgeschaltet werden. Nur dann wird es möglich sein, konkrete Anwendungen zu finden und den Markt von der Relevanz und der Qualität der so hergestellten CF-Rezyklat-Compounds zu überzeugen. Dazu ist es notwendig, noch längere Faserfraktionen in die CF-Compounds einzuarbeiten. Gute Chancen werden hier durch die Zudosierung von kompaktierten, geschnittenen Fasern gesehen. Fortführende Tests in diese Richtung folgen nach Abschluss des Projektes.

Weitere wichtige Anforderungen an marktrelevante rCF-Compounds sind Staubfreiheit und Rieselfähigkeit. Die entsprechenden Tests und Untersuchungen werden ebenfalls in Folgeprojekten fortgeführt und weiterentwickelt.

Trotz noch fehlender Normen und abgeschlossener Studien lohnt sich der Einsatz von Carbonfaser-Rezyklaten bereits jetzt. So ist die Einbringung von insbesondere sortenreinen Rezyklaten mit hohen Faserlängen in Compounds betriebswirtschaftlich sinnvoll. Die enge Kooperation zwischen Recycler und Verarbeiter sollte dazu in beiderseitigem Interesse weiter ausgebaut werden, um die Situation im Bereich der Normierung, der Anforderungen und der Vorhersage von Bauteileigenschaften zu verbessern.

Die Politik sollte diesen Prozess konstruktiv kritisch begleiten, indem sie auf Lösungen für die Wiederverwendung und Verwertung von End-of-Life-Materialien dringt. Für eine weitere Steigerung der Marktakzeptanz sollte sie als Katalysator agieren, indem die hohe Relevanz der recycelten Carbonfasern als Wertstoff von ihr deutlich eingefordert und hervorgehoben wird.



## Inhalt

1	Zusammenfassung .....	2
2	Projektziel .....	2
2.1	Stand der Technik .....	3
2.1.1	CFK-Abfallaufbereitung .....	4
2.2	Eigene Vorarbeiten .....	5
2.3	Aktuelle Problemstellung .....	8
2.4	Gegenstand und Ziele des Projekts .....	9
2.4.1	AP 1. Definition der Anforderungen .....	9
2.4.2	AP 2. Verfahrensoptimierung Fiberballs .....	9
2.4.3	AP 2.1 Erprobung von CF-Batches .....	9
2.4.4	AP 3. Materialentwicklung .....	9
2.4.5	AP 4. Materialvalidierung .....	9
2.4.6	AP 5. Verarbeitung .....	10
2.4.7	AP 6. Projektmanagement und Technologietransfer .....	10
3	Ergebnisse .....	10
3.1	Definition der Anforderungen .....	10
3.2	Verfahrensoptimierung Fiberball .....	13
3.3	Materialentwicklung und Validierung .....	15
3.3.1	Schneckenkonfiguration .....	15
3.3.2	Untersuchung der Faserlänge und des Faserabbaus .....	17
3.3.3	Einfluss des Pyrolyseprozesses auf die mechanischen Kennwerte ...	22
3.3.4	Optimierung der Festigkeit im Verhältnis zur Schlagzähigkeit .....	23
3.3.5	Elektrische Leitfähigkeit .....	27
3.4	Verarbeitung .....	28
3.5	Projektmanagement und Technologietransfer .....	29
4	Fazit .....	30
5	Abkürzungs- und Einheitenverzeichnis .....	32
6	Abbildungsverzeichnis .....	33

## 1 Zusammenfassung

Im Rahmen der zweijährigen Arbeit am Projekt, wurde das Ziel, eine marktrelevante Anwendung für rezyklierte Carbonfasern zu identifizieren und die entsprechenden Anforderungen an die Lieferform umzusetzen, konsequent verfolgt.

Das seitens der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Projekt wurde von der CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG sowie dem Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft NRW GmbH (KIMW) durchgeführt. Unterstützt wurde das Konsortium von den assoziierten Partnern Sitraplas GmbH, Radolid Thiel GmbH und EBM Papst Mulfingen GmbH & Co. KG.

Ziel des Projektes war die Weiterentwicklung der aus dem Projekt ReCarbo hervorgegangenen Lieferform „Fiberball“ sowie die Überführung längerer recycelter Carbonfasern in hoch gefüllte CF-Batches. Der Fokus lag auf der Entwicklung neuartiger CF-Compounds, die im Hinblick auf den ressourcenschonenden Werkstoffeinsatz und die damit verbundene Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emission größtmögliche Marktrelevanz erwarten lassen.

Auf Basis des Projektes ist es nunmehr möglich, längere Carbonfaserfraktionen in rieselfähige Formen (fiberball, Pellets) zu überführen und somit die von den Endanwendern vorrangig geforderte mechanische Festigkeit in CF-Composites zu erreichen.

Durch diverse Bemusterungen bei Endanwendern konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, bereits etablierte carbon- und glasfaserverstärkte Kunststoffe zu ersetzen. Verglichen mit Carbonfasercompounds aus Faserneuware lassen sich durch die Verwendung recycelter Carbonfasern die Materialkosten erheblich reduzieren.

Um die Wiederverwendung von recycelten Carbonfasern zu forcieren, muss jedoch die Akzeptanz für das Material durch die Einführung von Normierungs- und Standardisierungsverfahren für Halbzeuge aus rCF erhöht und dadurch die Marktdurchdringung dieses Wertstoffes weiter verbessert werden.

Erst wenn die Anwender in großem Maßstab recycelte Carbonfasern einsetzen, kann der Wertstoffkreislauf vollständig, nachhaltig und wirtschaftlich geschlossen werden.

## 2 Projektziel

Das Ziel dieses Projektes war die Weiterentwicklung der aus dem ersten Projekt hervorgegangenen Lieferform „Fiberball“. Diese Lieferform besitzt den Vorteil, dass sie ohne komplexe Anlagentechnik sowie sicherheitstechnische Bedenken verarbeitet werden kann. Das Verfahren hat sich zur Herstellung von Fiberballs aus relativ kurzen Carbonfasern bewährt – längere Carbonfasern (> 2 mm Länge), die für hochwertige CF-Kunststoffcompounds benötigt werden, ergaben nach den ersten Ansätzen Fiberballs mit einem zu niedrigen Schüttgewicht. Für den Marktdurchbruch dieser Lieferform werden weitere und verbesserte Entwicklungsstufen benötigt. Der Fokus lag hierbei auf der Entwicklung neuartiger CF-Compounds, die im Hinblick auf den ressourcenschonenden Werkstoffeinsatz (wie z.B. Leichtbau) und die damit verbundene Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emission, größtmögliche Marktrelevanz erwarten lassen. Dieses Ziel sollte durch

Additivstudien sowie weitere Optimierungen der Verfahren zur Fiberballherstellung erreicht werden.

Ein weiterer Ansatz, der im Zuge des Projektes betrachtet werden sollte, war die Überführung recycelter Carbonfasern in einen hoch gefüllten CF-Batch.

Diese neuartigen CF-Batche könnten eine Alternative zur Fiberballherstellung darstellen und sollten Vorteile bei der Verarbeitung längerer Fraktionen bieten.

Neben dem Basismaterial Polyamid stand insbesondere Polypropylen im Fokus der Materialentwicklung. Hierzu wurden mit den Projektbeteiligten Anforderungen definiert, nach deren Kriterien die Materialentwicklung umgesetzt werden sollte (Evaluierung, Validierung, Verifizierung). Mit dieser Vorgehensweise sollten erste Anwendungen möglichst seriennah realisiert werden, um durch Nutzung dieser Beispiele eine hohe Marktakzeptanz zu erzielen.

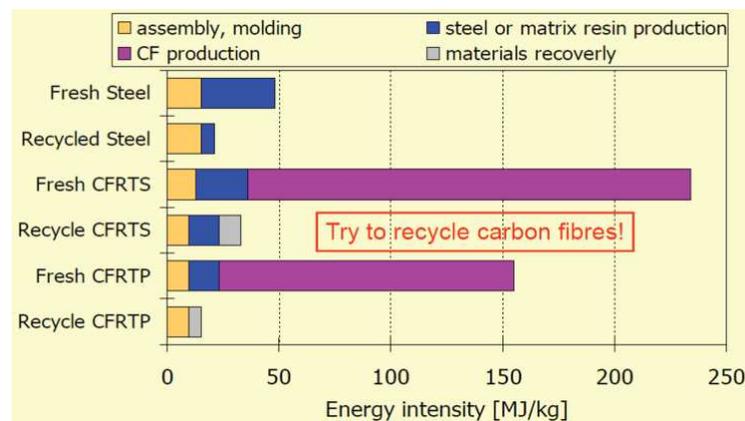


Abbildung 1: Energiebilanz

## 2.1 Stand der Technik

Leichtbau mit Verbundwerkstoffen oder neuen Metalllegierungen sind zukunftsweisende Entwicklungsrichtungen der Werkstofftechnik. Von besonderem Interesse sind in diesem Zusammenhang Verbundwerkstoffe mit hochfesten Fasern als Verstärkungskomponente. Für viele Anwendungen setzen sich – aufgrund ihrer Gewichts- und Festigkeitsvorteile zunehmend **Carbon-Faser-Komposites (CFK)** durch. Im Bereich verstärkter thermoplastischer Kunststoffe werden nach wie vor hauptsächlich Glasfasern eingesetzt. Eine Substitution durch Carbonfasern wird häufig aus Kostengründen nicht in Erwägung gezogen. Durch den Kostenvorteil einer recycelten Carbonfaser werden nun solche Anwendungen interessant, bei denen hohe Glasfaseranteile substituiert werden können. Während Glasfasern eine Dichte von ca. 2,5 g/cm<sup>3</sup> haben, sind Carbonfasern mit 1,8 g/cm<sup>3</sup> deutlich leichter. Ferner benötigt man deutlich weniger Carbonfasern, um die gleichen Festigkeiten wie mit Glasfasern zu erzielen. Insgesamt lassen sich Bauteile durch diese Substitution mit bis zu 25 % Gewichtsersparnis produzieren. Zusätzlich bringen die Carbonfasern andere Eigenschaften ins Material, die sich positiv auf die Produkteigenschaften auswirken können, wie zum Beispiel eine erhöhte elektrische und thermische Leitfähigkeit.

Da bei der Fertigung von CFK-Bauteilen 10 – 30 w% Abfall nicht zu vermeiden sind, ist es sehr sinnvoll, den im Abfall enthaltenen teuren Wertstoff „Carbonfaser“ wieder zu gewinnen und in einem sekundären Wertstoffkreislauf zu nutzen. Voraussetzung einer ökonomisch sinnvollen und ausbaufähigen Wiedergewinnung ist die Nutzung eines Prozesses, der wenig zusätzliche Energie konsumiert. Ein derartiges Verfahren ist der von der Karl Meyer AG in Wischhafen entwickelte Pyrolyseprozess, mit dem die in Verbundwerkstoffabfällen, wie Prepregs oder „end of life“-Produkten enthaltenen Carbonfasern wiedergewonnen und neuen Anwendungen zugeführt werden können. Der Pyrolyseprozess nutzt die Abwärme

der Verbrennungsgase und benötigt dementsprechend wenig Energiezufuhr. Abbildung 1 zeigt den Vergleich des Energieverbrauchs bei der Produktion verschiedener Werkstoffe und deren Recyclingprodukte. Besonders hervorzuheben ist dabei der Unterschied zwischen recycelten Carbonfasern und der Neeware sowohl bei der Betrachtung von Carbon-Fiber-Reinforced-Thermoset (CFRTS) als auch bei Carbon-Fiber-Reinforced-Thermoplastics (CFRTP). Durch den Recyclingprozess lassen sich in thermoplastischen Produkten über 100 MJ/kg und bei Duroplasten sogar 200 MJ/kg einsparen. Vergleicht man diese Einsparung mit den erreichbaren Einsparungen, die durch das Recycling von Stahl erzielt werden, liegt die Einsparung bei den Carbonfasern im ungünstigsten Fall beim dreifachen dessen, was bei Stahl möglich ist.

Der Werkstoff Carbonfaser ist heute vornehmlich mit der Verarbeitung duroplastischer Systeme verknüpft. So werden die Fasern zu Geweben mit unterschiedlichster Struktur verarbeitet und diese dann in eine Form gelegt und mit einem Harz imprägniert und umspritzt. Damit lassen sich hochfeste und leichte Bauteile fertigen, die jedoch häufig in langen Zyklen aushärten müssen. Doch auch für thermoplastische Anwendungen wurde die Carbonfaser in den vergangenen Jahren immer besser zugänglich gemacht. In den bekannten technischen Prozessen wird die Endlosfaser durch eine Dispersion auf Basis von Polyurethan und organisch modifizierten Siloxanen oder Acrylaten mit weiteren Additiven wie Gleitmitteln und Benetzungsadditiven gezogen. Beim anschließenden Trocknen vernetzen diese Schichten mitunter teilweise. Bei der Compoundierung bewirken diese Schichten entweder durch chemische Anbindung und/oder durch eine gute Verträglichkeit mit der Thermoplastmatrix eine deutlich verbesserte Wechselwirkung zum Matrixmaterial als bei einer unbeschichteten Faser. Zu diesen Wechselwirkungen tragen sowohl chemische Bindungen als auch Wasserstoffbrückenbindungen bei. Im speziellen Fall der Verwendung einer Polyurethanschlichte für Anwendungen in Polyamid kommt es zusätzlich zu einer Umkondensation, so dass das Polyurethan in die Hauptkette des Polyamids eingebaut wird, was eine besonders gute Anbindung der Faser in der Matrix bewirkt.

### **2.1.1 CFK-Abfallaufbereitung**

Nach Abschluss der Entwicklung des Pyrolyseprozesses zur Abfallaufbereitung in einer Laboranlage erfolgte der Bau einer Pilotanlage, die im Februar 2011 in Wischhafen eingeweiht wurde.

Der Recyclingprozess der CFK Valley Stade Recycling liefert hochwertige Carbonfasern als „Sekundär“-Rohstoff für neue Anwendungen im Leichtbau oder anderen technischen Segmenten. Diese Entwicklung leistet in zweifacher Hinsicht einen Beitrag zur Senkung aktueller Energieverbräuche, zum einen durch die energiearme Wiedergewinnung der Carbonfaser und mit dieser, zum anderen, einen weiteren Beitrag durch die zu entwickelnden Leichtbaumaterialien.

Neben den von der CFK Valley Stade Recycling GmbH und Co. KG betriebenen Recyclingverfahren streben andere Vorhaben ähnlichen Lösungen entgegen, die im Folgenden kurz dargestellt werden.

### **1. Dissertation Mathias Tötze, Uni Halle-Wittenberg, 2005:**

Untersuchungen zum Recycling von Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) durch Depolymerisation im Metallbad: In dieser sorgfältigen Arbeit wurden Grundlagenuntersuchungen zum Recycling von CFK-Materialien durch Depolymerisation der Kunststoffmatrix bei hohen Temperaturen durchgeführt und die erhaltenen C-Fasern als Composite-Materialien geprüft. Das Verfahren schafft im Labormaßstab den Zugang zu recycelten Carbonfasern, nutzt aber die Energieinhalte der Spaltprodukte für den Prozess nicht aus und ist technisch aus Kostengründen nicht umsetzbar.

### **2. Fraunhofer ICT: „Recycling von CFK“ und „Aufbereitung und Weiterverarbeitung von rezyklierten Kohlenstofffasern (rCF)“:**

In der Region M-A-I (München-Augsburg-Ingolstadt) bildete sich ein neuer Schwerpunkt der Carbonfaserforschung. Der Anfang 2012 als Spitzencluster etablierte Verbund MAI - Carbon gründete die Projektgruppe „MAI Recycling“. Das Fraunhofer-Institut ICT ist kein Mitglied und bearbeitet eigenständig mit Fördermitteln des Landes Bayern die Zielsetzung „Recycling von CFK-Abfällen“. Ein Ziel dieser Projektarbeit ist ein neues Pyrolyseverfahren für die Aufbereitung dieser Abfälle in Kooperation mit der Müllpyrolyseanlage Burgau. Ein in der Anlage durchgeführter Großversuch ergab zwar Carbonfasern als Rückstand der Pyrolyse, die Fasern waren aber noch stark mit Harzrückständen verunreinigt. Die weiteren Projektarbeiten sind derzeit im Planungsstadium und werden unabhängig von bereits etablierten Einrichtungen bearbeitet.

### **3. ELG Carbon Fibre Ltd., Coseley.UK:**

ELG Haniel übernahm im September 2011 die englische Firma Recycled Carbon Fibre Ltd und ist damit im Besitz des Knowhows, durch einen Pyrolyseprozess CFK-Abfälle aufzubereiten. Die Produktpalette umfasst gemahlene und geschnittene Carbonfasern und Pellets.

Leichte und hochfeste Werkstoffe sind die Voraussetzung zur Verminderung des Energieverbrauches zum Beispiel im Segment Transport und Verkehr. Neben neuen metallischen Legierungen auf z.B. Aluminiumbasis werden auch extrem leichte und feste faserverstärkte Kunststoffe benötigt und in stark zunehmendem Maße eingesetzt. Die spezifisch schwereren Glasfasern, die bislang für Verbundwerkstoffe eingesetzt wurden, werden weltweit in neuen Produkten durch leichte und hochfeste Carbonfasern verdrängt. Ein Vorreiter dieser Entwicklung war und ist die Flugzeugindustrie. Beispielhaft sei der Airbus A350 genannt, dessen Strukturbauteile bereits weitgehend aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) bestehen. Der Weltmarkt für CFK wächst rasant, seitdem sich auch die Automobilindustrie um CFK bemüht. Und mit gleicher Geschwindigkeit wächst aus den oben bereits genannten Gründen das CFK-Abfallvolumen.

## **2.2 Eigene Vorarbeiten**

Ziel des ebenfalls durch die DBU geförderten ReCarbo-Projektes war es, die durch Pyrolyse gewonnenen Carbonfasern durch Einbringen in einen Kunststoff in eine marktrelevante Produktanwendung zu führen. Dabei zeigte sich, dass die rezyklierten Carbonfasern eine bessere Reaktivität aufwiesen als die Neuware, was auf die Temperaturbehandlung im Pyrolyseofen zurückzuführen ist, welche die Anzahl an reaktiven Gruppen an der Oberfläche erhöht. Jedoch ist die Form, in der die Faser den Pyrolyseofen verlässt, nicht verarbeitbar. Die Fasern liegen in einer

breiten Längenverteilung vor, neigen zu enormer Staubentwicklung und sind nur bedingt rieselfähig, was die Verarbeitung durch Extrusions- und Spritzgussverfahren erschwert. Um die Fasern besser verarbeiten zu können, wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Pallmann Mahltechniken entwickelt, die das Pyrolysegut in einheitlichere Längen versetzt. Um die Staubentwicklung deutlich zu reduzieren, wurden Versuche unternommen, das so erhaltene Mahlgut zu kompaktieren. Hierzu wurden in speziellen Mischern der Firma Eirich Versuche mit fein gemahlene Carbonfasern durchgeführt. Dabei wurden Fasern in einem nasschemischen Prozess kompaktiert. Die hergestellten Pellets (Fiberballs) waren rieselfähig und ließen sich nach dem Trocken staubfrei verarbeiten.



Abbildung 2: Fiberballs

Die Pelletisierung von grob gemahlene C-Faserfraktionen muss dagegen hinsichtlich Schüttgewicht und unkompliziertem Dosierverhalten weiter verbessert werden. Denn diese Fraktionen sind für die Anwendung als Verstärkungsfaser in Kunststoffen besonders interessant, da mit zunehmender Länge die mechanische Belastbarkeit steigt. Eine weitere Optimierung der Herstellungsprozesse von Fiberballs ist deshalb sinnvoll. Eine Patentanmeldung für die Pelletierverfahren ist erfolgt (EP 2 902 433).

Um eine Aussage über die optimalen Verarbeitungsparameter treffen zu können, wurden Verfahrensstudien in der Extrusions- und Spritzgussverarbeitung durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Schneckenkonfiguration während der Compoundierung einen erheblichen Einfluss auf die späteren Materialkennwerte hat. Bei einer zu scherintensiven Konfiguration baut die mittlere Faserlänge ab, was die mechanischen Kennwerte verringert. Wird zu schonend gearbeitet, brechen die Fiberballs nicht auf und das Material wird inhomogen, was sich ebenfalls nachteilig auf die Kennwerte auswirkt.

Bei den Verarbeitungsversuchen im Kunststoffinstitut Lüdenscheid wurde die folgende Einstellung als optimal erkannt: Zugabe der Fiberballs in die Polymerschmelze im letzten Drittel des Extruders und schonende, aber ausreichende Dispergierung durch Verwendung scherermer Mischelemente.

Um die Kennwerte des Compounds aus recycelten Fasern weiter zu optimieren, wurden Binderstudien für PP und PA durchgeführt. Die reaktiven Gruppen an der Faser Oberfläche sind nicht für jeden Kunststoff zugänglich, jedoch sind sie sehr gute Reaktionspartner für Binder (Schichten) und Haftvermittler, die individuell auf den Kunststoff abgestimmt werden können und die Verbindung zwischen den

beiden Komponenten steigern. Zur Vermeidung von unerwünschten Wechselwirkungen wurden nur Basispolymere ohne Additive eingesetzt. Die Untersuchungen der hergestellten carbonfaserverstärkten Compounds aus PA und PP ergaben, dass die erreichten Kennwerte im Bereich der kommerziell erhältlichen Typen liegen. Damit konnte erfolgreich eine Möglichkeit der Rückführung aufgezeigt werden.

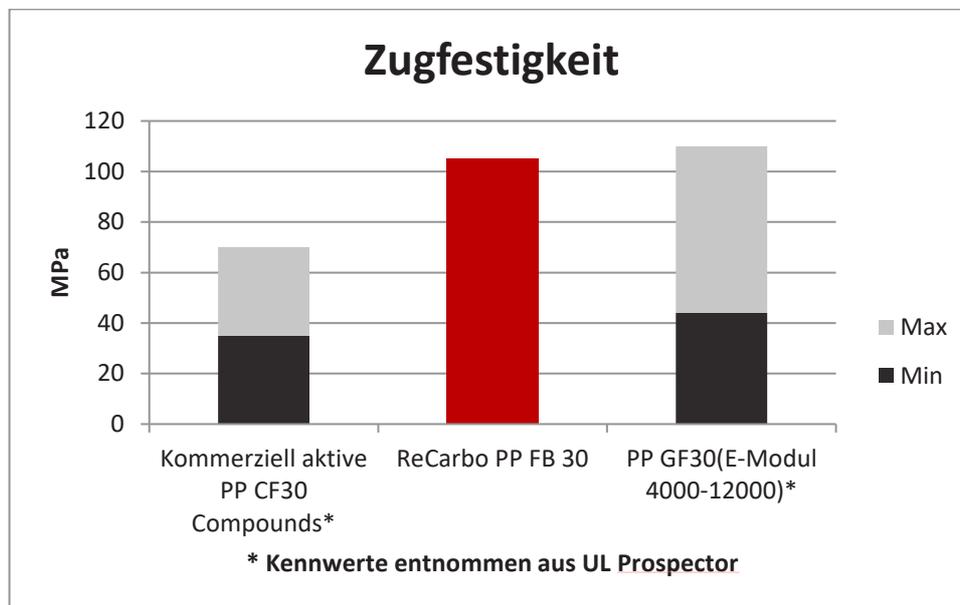


Abbildung 3: Rezyklat PP CF30 Compounds im Vergleich mit kommerziell aktiven PP CF und GF Produkten

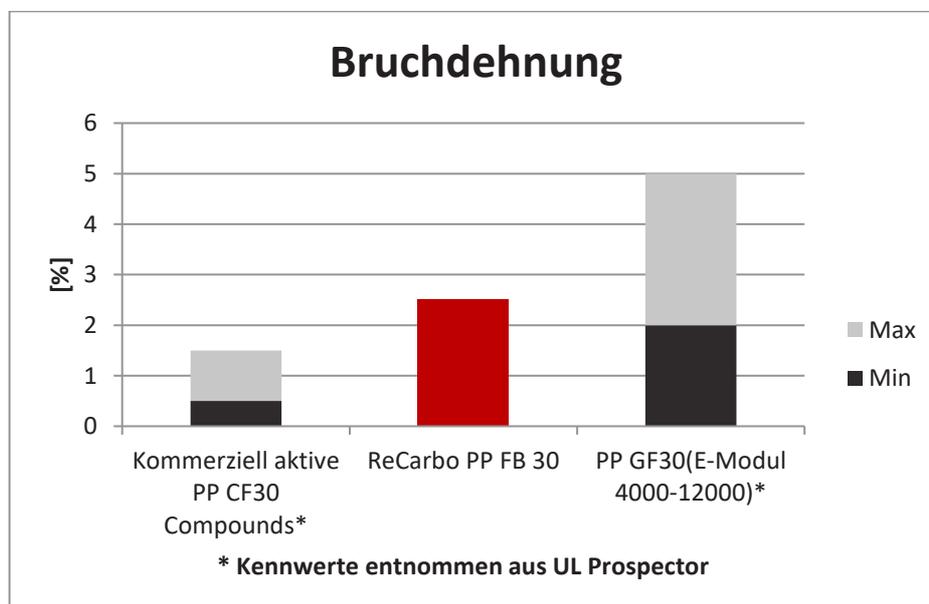


Abbildung 4: Rezyklat PP CF30 Compounds im Vergleich mit kommerziell aktiven PP CF und GF Produkten

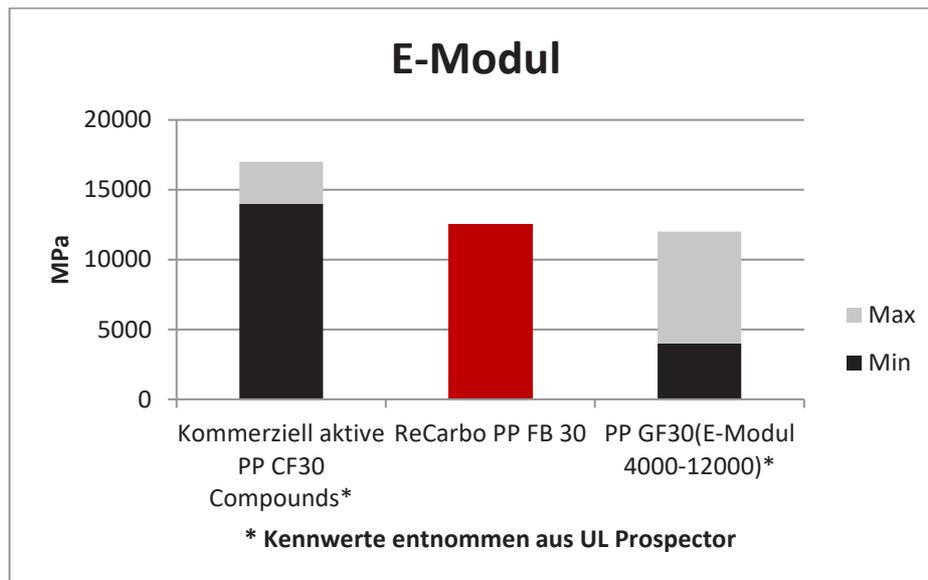


Abbildung 5: Rezyklat PP CF30 Compounds im Vergleich mit kommerziell aktiven PP CF und GF Produkten

Gerade die in Abbildung 3 bis Abbildung 5 dargestellten Ergebnisse der PP Composites sind aufgrund der Marktrelevanz dieses Werkstoffes sehr vielversprechend. Die mechanischen Kennwerte enthüllen ein für CF Composites eher untypisches Verhalten. Die rezyklierte Faser weist sehr hohe Festigkeiten bei relativ hoher Duktilität auf.

Neben den Untersuchungen zur Fiberballherstellung wurde bereits die Möglichkeit der Batchherstellung anhand einer feineren Fraktion erprobt. Hier gelang es, einen Fasergehalt von 55% in ein PP einzuarbeiten. Die nachgeschaltete Verarbeitung zu einem Compound mit 30% Fasergehalt, führte jedoch zu etwas niedrigeren Kennwerten im direkten Vergleich zu einer mit 30% Fiberballs erstellten Variante. Bei dieser Untersuchung handelte es sich jedoch um einen Vorversuch, der ohne eine optimierte Schneckenkonfiguration und eine auf das Compound abgestimmte Beschichtung durchgeführt wurde. Das Konsortium sieht in der Weiterentwicklung o.g. Aspekte ein großes Potential, was die Markteinführung erleichtern würde.

### 2.3 Aktuelle Problemstellung

Die aus ReCarbo hervorgegangenen Fiberballs weisen gegenüber herkömmlichen Lieferformen Verarbeitungsvorteile auf. Diese Vorteile liegen in der einfachen und sicherheitstechnisch unproblematischen Dosierung. Um mit der rezyklierten Faser auf dem Markt mit Neuware konkurrieren zu können, müssen mindestens dieselben Anforderungen erfüllt werden, die für schon erhältlichen Produkte gelten. Zu diesen Anforderungen gehören gleichbleibende Qualitäten der Lieferform, was Verarbeitbarkeit und mögliche mechanische Eigenschaften betrifft. Ein weiteres Problem, das sich aus dem ersten Projekt ergeben hat, ist die Kompaktierung von längeren Fraktionen, die für den höheren Verstärkungseffekt in Composites sorgen können. Gelingt eine Kompaktierung dieser längeren Faserfraktion bei gleichzeitig hohem Schüttgewicht, ist eine bessere Marktakzeptanz zu erwarten. Die Vorversuche zum aktuellen Projektvorhaben ergaben, dass eine Verarbeitung von recycelten Carbonfasern zu einem hoch gefüllten Batch verfahrenstechnisch möglich ist. Damit ergab sich eine Alternative zur Fiberballherstellung, mit der eine Überführung der Fasern in eine verarbeitbare Form möglich sein kann. Hier gilt es zu überprüfen, ob die Herstellung solcher Batche wirtschaftlich ist und zu

marktrelevanten Ergebnissen führt. Des Weiteren sind anwenderspezifische Anforderungen wie etwa elektrische Leitfähigkeit interessant. Ziel ist es, die möglichen Composite-Eigenschaften durch Variation der Rezeptur der Fiberballs steuern zu können. Dabei spielen sowohl die zu kompaktierende Faserfraktion als auch die Wahl und Menge eines geeigneten Bindersystems eine Schlüsselrolle.

Im Rahmen dieses Projektes wurden Carbonfasern aus verschiedenen Quellen eingesetzt, um sie für neue Anwendungen im Markt zu nutzen.

## **2.4 Gegenstand und Ziele des Projekts**

### **2.4.1 AP 1. Definition der Anforderungen**

Der Erfolg der aus den rezyklierten Fasern hergestellten Fasergranulate und den daraus resultierenden Compounds hängt im Wesentlichen von der Erfüllung der Anforderungsprofile ab. Diese Profile wurden im Rahmen dieses Arbeitspaketes in Zusammenarbeit mit Industriepartnern und in Verbindung mit einer ausführlichen Marktrecherche definiert. Auf der Grundlage dieser Profile wurden detaillierte Versuchspläne erarbeitet und Prüfungen zur Validierung festgelegt. Im Fokus stand die Ausnutzung der in Vorversuchen aufgezeigten enormen Festigkeit PP-basierender Matrixmaterialien in Kombination mit einer sehr hohen Duktilität.

### **2.4.2 AP 2. Verfahrensoptimierung Fiberballs**

Die im Vorgänger Projekt entwickelte Lieferform Fiberball kann – bei Verwendung längerer Faserfraktionen – eine Marktrelevanz nur erreichen, wenn eine für den Verarbeiter konstante Qualität der Lieferform des Fasergranulates eingestellt wird. Ziel dieses Arbeitspaketes war die Optimierung der Lieferform bezüglich der Faserlängen, Schüttgewicht, Staubentwicklung und Rieselfähigkeit. Die Lieferform sollte anschließend validiert und über das ganze Projekt in konstanter Qualität zur Verfügung gestellt werden.

### **2.4.3 AP 2.1 Erprobung von CF-Batchen**

Im Zuge dieses Arbeitspaketes sollte die Möglichkeit der Überführung von recycelten Carbonfasern in einen CF-Batch geprüft werden. Die Batche wurden mit dem Ziel erstellt, eine möglichst lange Faserfraktion und alle nötigen Verarbeitungshilfsmittel für das Endprodukt zu erhalten. Ziel war es, mit diesem neuartigen CF-Batch marktrelevante Anforderungen abbilden zu können und eine Alternative zur Fiberballherstellung zu eruieren.

### **2.4.4 AP 3. Materialentwicklung**

In Anbetracht der in AP1 definierten Anforderungsprofile sollte in diesem Arbeitspaket eine anwendungsorientierte Materialentwicklung betrieben werden. Die Rezepturen der Lieferform waren ggf. anzupassen, um die Anforderungen an das Compound zu erreichen. Die Schwerpunkte der Materialentwicklung lagen dabei auf einer guten Anbindung zwischen Faser und der jeweiligen Matrix und den speziellen Anforderungen der Anwendung, wie zum Beispiel Leitfähigkeiten. Um diese Ziele zu erreichen, wurden Additivstudien mit dem Schwerpunkt „Optimierung Festigkeit“ durchgeführt.

### **2.4.5 AP 4. Materialvalidierung**

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die hergestellten Compounds umfangreich charakterisiert. Dazu zählt insbesondere die Bestimmung der mechanischen Kennwerte. Dabei wurde bei der Herstellung von Probekörpern dem

Umstand Rechnung getragen, dass sowohl mechanische Kennwerte, als auch die elektrische und thermische Leitfähigkeit von Bedeutung sind. Eine kontinuierliche Rückkopplung, insbesondere mit den Arbeitspaketen 2, 3 und 4 sollte eine permanente Weiterentwicklung der Materialien bewirken, mit dem Ziel, für verschiedene Anwendungen optimierte Compounds zu entwerfen und umzusetzen. Die relevante Messung der Faserlängenverteilung von Carbonfasern im Compound sollte optisch im Lichtmikroskop, im Rasterelektronenmikroskop oder mit Hilfe einer vorhandenen Analyse der Faserlängenverteilung erfolgen.

#### **2.4.6 AP 5. Verarbeitung**

Innerhalb des Arbeitspaketes „Verarbeitung“ galt es, erste Upscale-Versuche aus dem vorher beschriebenen Maßstab auf die Bedürfnisse der Industrie zu übertragen. Hierzu gehören insbesondere Compoundierversuche mit größeren Durchsätzen und der folgenden Qualitätsbeurteilung der Compounds. Zuvor ausgewählte Bauteile sollten mit diesen Compounds im Spritzgießprozess hergestellt und unter möglichst seriennahen Bedingungen auf ihre Eigenschaften und Reproduzierbarkeit überprüft werden. Hierzu sollten Bauteilprüfungen bei dem Anwender selbst erfolgen.

#### **2.4.7 AP 6. Projektmanagement und Technologietransfer**

Das Arbeitspaket beinhaltet projektbegleitende Managementaufgaben wie enge Koordination und Verzahnung der Arbeiten unter Berücksichtigung des Zeit- und Arbeitsplans sowie die Organisation von Arbeits- und Projekttreffen, Projektplanung und -steuerung sowie Technologietransfer. Das Konsortium wird Veröffentlichungen zu den Projektinhalten verfassen und diese dem Markt zugänglich machen. Zudem werden während der Projektlaufzeit Präsentationen und Vorträge (Messen, Tagungen, etc..) geplant. Eine weitere Verbreitung sollte durch das KIMW z.B. über Technologienachmittage erfolgen, bei denen über 300 Unternehmen aus der Trägergesellschaft des Instituts eingeladen sind. Nicht unerwähnt sei der Hinweis, dass das KIMW auf der DBU-Veranstaltung „Woche der Umwelt“ in Berlin vom 07.06. – 08.06.2016 die Ergebnisse aus dem ersten Projekt ausgestellt hat.

## **3 Ergebnisse**

### **3.1 Definition der Anforderungen**

Wie in Abschnitt 2.4.1 beschrieben, wurden mithilfe der an diesem Projekt teilnehmenden assoziierten Partner, mögliche, an den Rohstoff zu stellende, Anforderungen diskutiert. Die Anforderungen lassen sich dabei grob in zwei Kategorien unterteilen. Zum einen müssen die Anforderungen an die Lieferform der Carbonfaser selbst erfüllt werden und zum anderen die bauteilspezifischen Anforderungen der Endanwender.

Die Anforderungen der Compoundeure an einen solchen Rohstoff sind eher verarbeitungsspezifisch. Die konstruktive Diskussion mit dem assoziierten Partner Sitraplas GmbH ergab, dass für eine marktweite Akzeptanz der Lieferform der rezyklierten Carbonfasern eine gute Dosierbarkeit der Fasern von entscheidender Bedeutung ist. Insbesondere sind hier eine hohe Schüttdichte bei gleichbleibender Korngröße sowie eine gute Rieselfähigkeit zu nennen. Eine weitere wichtige Anforderung ist die Staubfreiheit. Der leitfähige Staub könnte sich auf elektrische Platinen legen und einen Kurzschluss verursachen.

Bei Nicht-Erfüllung dieser Anforderungen ist ggfs. mit höheren Investitionen in die Anlagenperipherie und Sicherheit zu rechnen, die die Akzeptanz auf dem Markt schmälern könnte.

Die erstellten Compounds müssen die Anforderungen der Endanwender erfüllen. Diese sind naturgemäß abhängig vom jeweiligen Einsatzgebiet. Für die innerhalb dieses Projektes mitwirkenden assoziierten Partner sind die folgenden Anforderungen wichtig.

#### Radolid Thiel GmbH:

- Verarbeitung (Belag/ Lunker/ Ausgasungen)
- Galvanisierung
- Steifigkeit/ Festigkeit im Verhältnis zur Schlagzähigkeit
- Oberflächenqualität
- Spannungspotenzial
- Salzsprühnebeltest 1000h (Korrosion)
- Antistatik
- Kriechmodul
- Dauergebrauchstemperaturen -40°C/ 140°C (Bremse)
- Ausdehnungskoeffizient
- Einfärbbarkeit

#### EBM Papst Mulfingen GmbH & Co. KG:

- Bindenahtfestigkeit
- Wanddickenreduzierung/ Konstruktion
- Abbildegenauigkeit/ Maßhaltigkeit/ geringer Verzug
- gute Kriechfestigkeit
- Antistatik (Exschutz -> Sonderprodukte)
- thermische Leitfähigkeit
- geringe Feuchtigkeitsaufnahme
- UL Listung (Flammschutz V-0,5VA)
- Dauergebrauchstemperaturen -40/+60°C
- Spannungsrissbeständigkeit

Aus den für die Anwendung spezifischen Eigenschaften wurden Anforderungsprofile erstellt. Ein Beispiel für ein Anforderungsprofil sieht wie folgt aus.

### **Allgemeine Daten**

Formteilgeometrie:	flächig
Bauteilabmessungen:	Durchmesser: 300 mm
	Wanddicke: min. 1 mm
	max. 3 mm
Verarbeitung:	Thermoplaste: Spritzguss

## Substitution

vorheriger Werkstoffe: wie ABS, ABS-Polycarbonat-Blends

Farbvorgabe: keine

Einsatz: innen

## Ja/ Nein-Anforderungen

Lichtdurchlässigkeit: opak / lichtundurchlässig

Medieneinfluss: Medium: Wasser

Belastungsart: langfristig

Spannungsrissebeständigkeit: metallisches Einlegeteil

geographischer Einsatzort: weltweit

Bewitterung: **Temperatur -40 °C bis + 40 °C**  
**Feuchtigkeit**

Mediendurchlässigkeit: keine Medien

## Lebensmittel- /Medizinprodukte

Lebensmittelkontaktanwendung: nein

## Qualitative/ Quantitative Anforderungen

### Mechanisch:

Belastungsart: **statisch**  
**Schlagbelastung**  
**Schwingend**

Zug-/ Bruch-/ Streckspannung: 90 MPa

Zug-/ Bruch-/ Streckdehnung: 4 %

E-Modul: 8000 MPa

Schlagzähigkeit: 55 kJ/m<sup>2</sup>

Kerbschlagzähigkeit: 12 kJ/m<sup>2</sup>

### Brennbarkeit:

Entflammbarkeit: HB

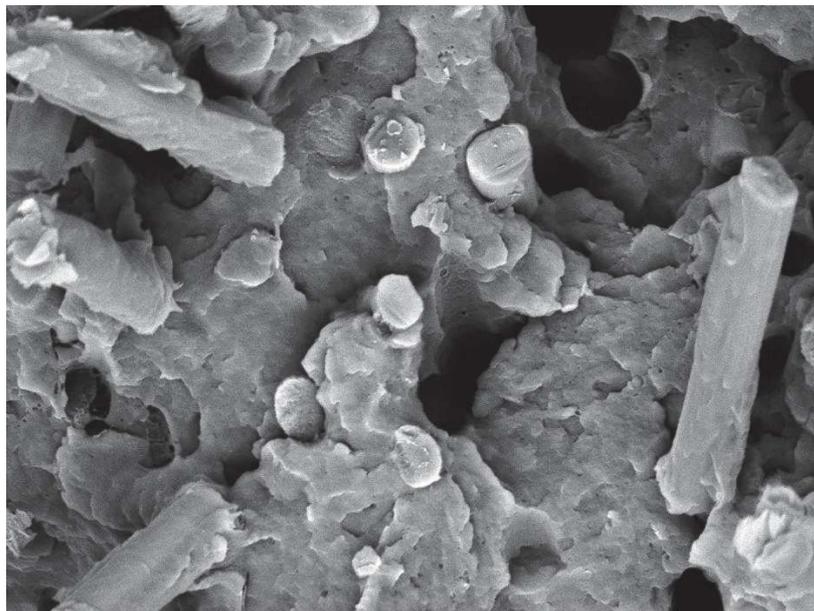
Die maßgeblichen Kriterien sind hervorgehoben.

Wie erwähnt sind die Anforderungen an das Material sehr stark von der jeweiligen Anwendung des Bauteiles abhängig. Generell kann bei den Anforderungen jedoch gesagt werden, dass eine hohe Festigkeit und/oder Schlagzähigkeit erzielt werden soll. Dieses soll meistens mit möglichsten wenig Faseranteil erreicht werden. Daher ist ein wichtiges Ziel, die Faserlänge in den Fiberballs zu erhöhen.

### 3.2 Verfahrensoptimierung Fiberball

Gemeinsam mit der Fa. Pallmann wurde im Verlauf dieses Projektes an der Optimierung der Vermahlung und der so erreichten Faserlängenverteilung gearbeitet. Zunächst wurden Carbonfasern zu feinem Mahlgut  $> 100 \mu\text{m}$  vermahlen. Aus diesem Mahlgut wurden in speziellen Mischern kugelförmige „Fiberballs“ hergestellt. Durch Zugabe von speziellen Additiven wurden diese kugelförmigen und sehr gut rieselfähigen Granulate zur Modifizierung von Polyamid oder anderen Thermoplasten wie z.B. Polypropylen oder Polycarbonat im Kunststoffinstitut Lüdenscheid untersucht. Neben der Prüfung der mechanischen Festigkeitswerte wurde auch die Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Einsatzmenge der Granulate gemessen. Nach Kundenbemusterungen ergab sich eine bemerkenswerte Nachfrage nach diesen Fiberballs.

Es wurde aber auch festgestellt, dass die mechanischen Festigkeitswerte deutlich unter denen marktgängiger Composites z.B. PA/CF lagen.



ReCarbo0006

D4,3 x1,8k 50 um

PA 6 30% milled 100 Resin

Abbildung 6: Bruchfläche eines Polyamid-Compounds mit 30 w% CF

Diese Aufnahme der Bruchfläche eines Polyamidcompounds mit 30 w% gemahlener Carbonfaser „carboNXT milled 100 PURE“ lässt deutlich erkennen, dass die Anbindung der Carbonfaser an die Polyamidmatrix noch nicht perfekt ist, da einige der C-Fasern beim Bruch aus der Matrix herausgezogen wurden.

Die Oberfläche der PA/CF 100-Composites war einwandfrei glatt und homogen. Ferner hatten die Produkte eine deutlich verbesserte Antistatik und bei höheren CF

100-Gehalten auch interessante elektrische Leitfähigkeitswerte. Aufgrund dieser Eigenschaften konnten diese CF-PA-Composites in einem gewissen Umfang im Markt platziert werden.

Da die mechanischen Festigkeitswerte für viele Anwendungen nicht ausreichten, wurde mit Unterstützung der Fa. Pallmann die Mahlung auf gröbere Faserlängenverteilungen umgestellt und es wurden neue Composites mit z.B. Polyamid oder Polypropylen entwickelt. Für diese Entwicklungen war die Kenntnis der Additive, mit denen eine Verbesserung der CF-Anbindung an die Polyamid- oder Polypropylen-Matrix erreicht werden konnte, sehr hilfreich.



Abbildung 7: Fiberballs mit längeren CF-Anteilen

Hinsichtlich der Optimierung der Fiberball-Herstellung zeigten sich insbesondere durch die Verwendung längerer Faserfraktionen weitere Herausforderungen.

Wie Abbildung 7 zeigt, waren die via Mischer erhaltenen Granulate nicht mehr kugelförmig sondern sehr uneinheitlich. Auch bei der großtechnischen Herstellung (Fa. GRANULAN) konnte keine deutliche Verbesserung erreicht werden. Dafür ergab sich aber nach Compoundierung mit z.B. Polyamid eine deutliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaftswerte der Composites.

Bei der Umstellung der CF-Composites auf die höheren Faserlängen wurden deutliche Verbesserungen der mechanischen Festigkeitswerte der Polyamid- oder Polypropylen-Composites erzielt. Diese neuen Produktlinien konnten durch Optimierung der Additivstrategie sogar in einem gewissen Umfang im Markt etabliert werden.

Aufgrund dieser interessanten Ergebnisse wurden Untersuchungen gestartet, die C-Faserohware durch einen Schneidprozess einheitlicher auf z.B. rund 4 - 6 mm Schnittgutlänge einzustellen. Da sich der Schneidprozess deutlich kostengünstiger als der Mahlprozess darstellte, wurde dieser Weg intensiv verfolgt.

Zum Schneiden der Recyclatware kann am einfachsten CF-Rollenware eingesetzt werden. Andererseits kann man auch Recyclatvliese oder -gewebe dem Schneidprozess zuführen. Aufgrund der eingestellten Faserlängen, war dieses Material für den Mischprozess im Eirich-Mischer nicht geeignet.

Konsequenterweise wurde dann versucht, die Schnittware nicht im Mischer zu granulieren, sondern mit der technischen Unterstützung der Firma Salmatec die Schnittware zu Pellets zu verdichten. Bei diesem Verfahren werden die

geschnittenen C-Fasern unter Zusatz von z.B. Polypropylen und Additiven (Wachse, Festigkeitsvermittler) kontinuierlich durch eine sich drehende Matrize gepreßt und zu länglichen Pellets bei Temperaturen  $< 100 - 120^{\circ}\text{C}$  umgeformt. In enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Unternehmen wurde dieses Verfahren weiterentwickelt. Die erhaltenen Pellets konnten leider im Kunststoff-Institut Lüdenscheid nicht verarbeitet werden, da eine entsprechende Dosiermöglichkeit fehlte. Z.Zt. wird im SKZ in Würzburg die Faserlängenverteilung der in den Pellets eingebauten C-Fasern untersucht. Die Tests erfolgen über das Projektende hinaus. Ferner sind Untersuchungen zur Direktdosierung der geschnittenen C-Faserware bei der Firma Germaat angestoßen. Bei diesem Verfahren wird die geschnittene Carbonfaser in einem Extruder in z.B. aufgeschmolzenes Polypropylen und Verarbeitungshilfsmittel zudosiert. Diese Untersuchungen zur Vereinfachung des Prozesses zur Herstellung von CF-PP-Composites stehen erst am Anfang. Im Erfolgsfall wäre dieser Prozess sehr kostengünstig und wird dementsprechend weiter verfolgt.

### **3.3 Materialentwicklung und Validierung**

Die im Arbeitspaket 2 produzierten Fiberball 500 werden in verschiedene PP und PA 6 eingearbeitet und die mechanischen Eigenschaften optimiert. Insbesondere steht hier die Festigkeit im Vordergrund. Wenn nicht anders angegeben, beziehen sich die Werte auf das Matrixpolymer PP und einen Faseranteil von 30 w%, die Versuchsreihen mit PA 6 sind gekennzeichnet.

#### **3.3.1 Schneckenkonfiguration**

Eine gute Festigkeit kann in dem Compound durch eine hohe durchschnittliche Faserlänge erzielt werden. Allerdings müssen die Fasern dennoch homogen in der Schmelze vorliegen. Hierzu müssen die 500er Fiberballs aufgeschlossen und durch Mischelemente dispergiert werden. Ein Ziel dieses Projektes ist, möglichst lange Carbonfasern in dem Compound zu erhalten. Um dieses zu realisieren, sollten möglichst scherarme Extruder verwendet werden. Die Bewertung der geeigneten Schnecken erfolgt anhand der an den erhaltenen Produkten festgestellten Festigkeitswerte.

In Abbildung 8 ist eine untersuchte Schneckenkonfiguration abgebildet. Die Zugabe der Fasern (30 w%) erfolgt in Zylinder 7. Die hier eingesetzten Fördererelemente besitzen eine Schubkante, wodurch sich das zur Verfügung stehende Volumen erhöht. Dieses soll sich auf die Einbringung der Fasern positiv auswirken. Das im Verfahrensweg abwärts eingesetzte Zahnmischelement soll die Homogenität der Fasern in der Schmelze sicherstellen.

Kunde	Schnecke	Maschine	Produkt	G.L (-8)	G.Länge	Name	Datum
	KIMW0063	ZSK26MC		1033	1050	R. Hirsch	Dez 11, 2017
Zeichnungs-Nr	Version	Weitenlänge	Werk-Nr	SAP Teile-Nr	VT-Spez-Nr	Geprüft	
		1035					
Urheberrechtsklausel Dieses Dokument enthält urheberrechtlich geschützte Informationen von K.M.W. Es wird Ihnen anvertraut und ist auf Achtung bei der Weitergabe. Verbreitung, Kopieren oder Weiterverbreiten ist ohne schriftliche Genehmigung von K.M.W. zulässig. Durch Annahme der vorliegenden Zeichnung verpflichtet sich der Anwender zur Einhaltung dieser Klausel.				Beschreibung			

Abbildung 8: Scherarme Schneckenkonfiguration mit einem Zahnmischelement

Eine Schneckenkonfiguration ohne Mischelemente nach der Faserzugabe wurde ebenfalls untersucht (Abbildung 9). Damit die Fasern bei der Zugabe keine zu hohe Scherung untereinander haben oder beim Einbringen zu stark komprimiert werden, wurden wieder Förderelemente mit Schubkante eingesetzt.

Kunde	Schnecke	Maschine	Produkt	G.L (-8)	G.Länge	Name	Datum
	KIMW0064	ZSK26MC		1034	1050	R. Hirsch	Dez 11, 2017
Zeichnungs-Nr	Version	Weitenlänge	Werk-Nr	SAP Teile-Nr	VT-Spez-Nr	Geprüft	
		1035					
Urheberrechtsklausel Dieses Dokument enthält urheberrechtlich geschützte Informationen von K.M.W. Es wird Ihnen anvertraut und ist auf Achtung bei der Weitergabe. Verbreitung, Kopieren oder Weiterverbreiten ist ohne schriftliche Genehmigung von K.M.W. zulässig. Durch Annahme der vorliegenden Zeichnung verpflichtet sich der Anwender zur Einhaltung dieser Klausel.				Beschreibung			

Abbildung 9: Förderschnecke

Die so hergestellten Compounds wurden zu Normprobekörpern unter gleichen Spritzgussbedingungen verarbeitet.

Ein signifikanter Unterschied zwischen den Zugfestigkeiten konnte nicht festgestellt werden (Abbildung 10).

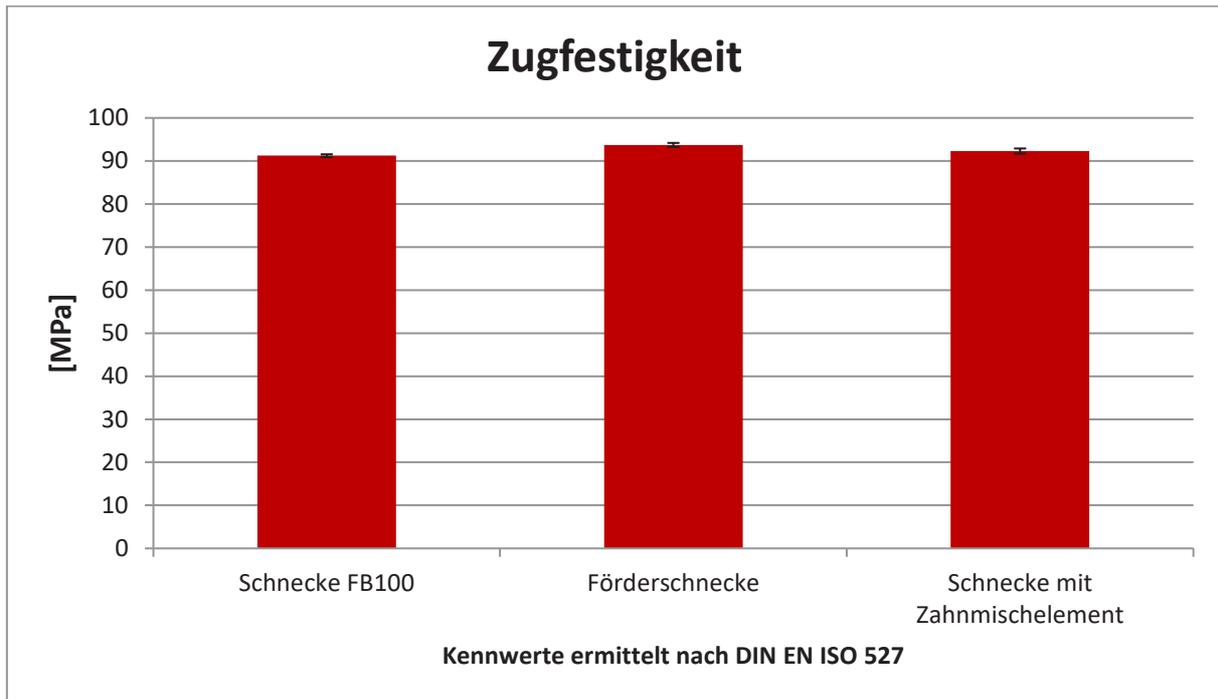


Abbildung 10: Vergleich Schneckenkonfigurationen über die Festigkeit

Die Auswertung der Schlagzähigkeit bestätigt, dass der Einfluss der untersuchten Schnecken bei der Einarbeitung der Fiberball 500 einen geringen Einfluss besitzt (Abbildung 11).

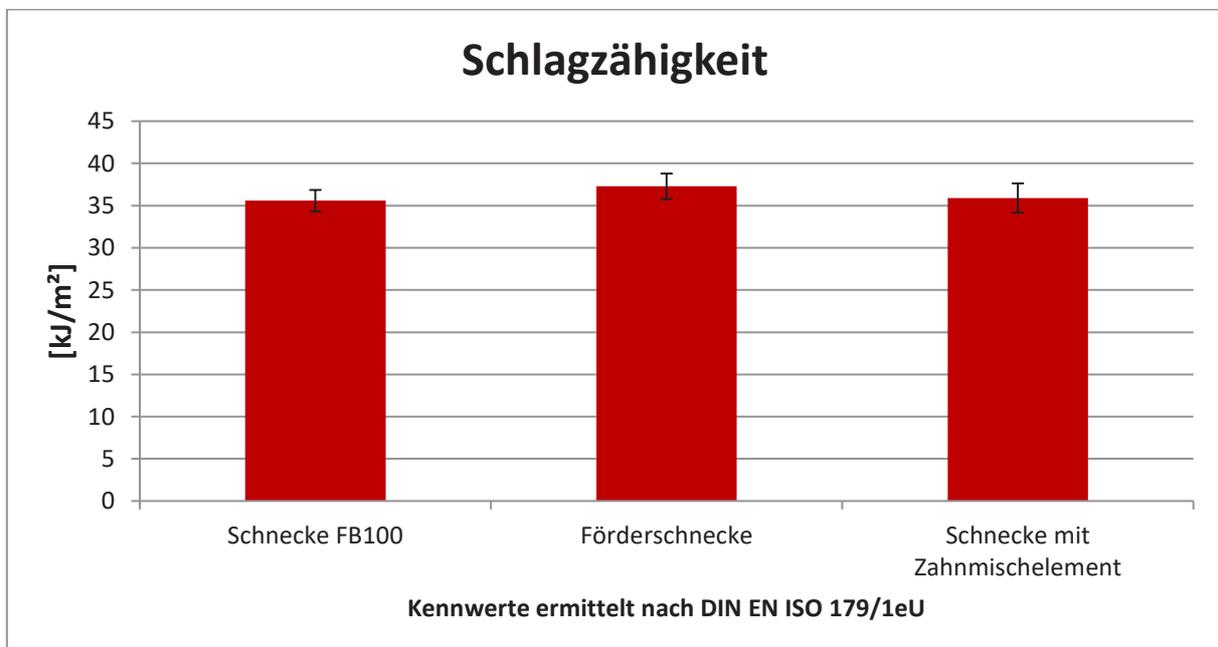


Abbildung 11: Vergleich Schneckenkonfigurationen über die Schlagzähigkeit

### 3.3.2 Untersuchung der Faserlänge und des Faserabbaus

Die Faserlängenbestimmung erfolgt über das Messgerät FibreShape MF, von der Firma IST Innovative Sintering Technologies Ltd. Es handelt sich bei diesem Gerät um einen Mittelformatscanner und eine statistische Auswertesoftware, mit denen

Häufigkeitsverteilungen und Summenkurven zur Charakterisierung von Fasern und Partikeln nach speziellen geometrischen Parametern erstellt werden können. Nach einer Veraschung unter Stickstoff oder dem Herauslösen der Fasern aus der Polymermatrix erfolgt die Aufnahme der Partikelgeometrie auf einer Scanfläche von 6x12cm.

Der Einfluss der Schneckenkonfiguration auf die Faserlänge im Granulat und im Normprobekörper wurde so überprüft. Ein signifikanter Einfluss wurde nicht festgestellt. Daher wurde für die weiteren Versuche die Schnecke mit den Zahnmischelementen eingesetzt. Ein Beispiel der Faserlängenverteilung des Zugstabes ist in Abbildung 12 zu sehen. Der quadratische Mittelwert errechnet sich aus der Quadratsumme der Länge durch die Summe der Länge. Hierdurch werden die für die Mechanik wichtigen längeren Fasern mehr gewichtet.

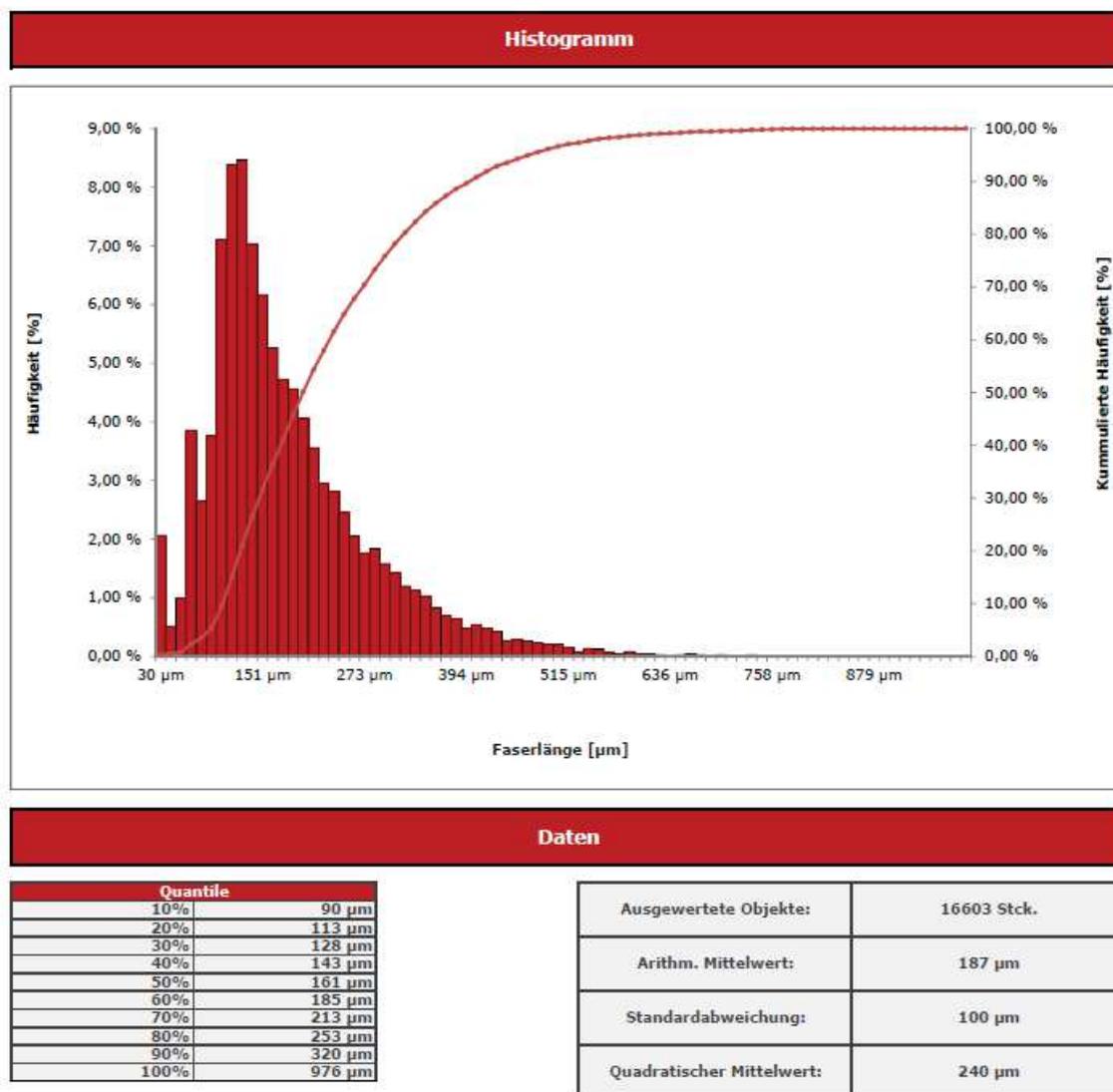


Abbildung 12: Faserlängenverteilung des Zugstabes

Um den Verlauf des Abbaus der Fasern bewerten zu können, wurde der Verarbeitungsprozess in Einzelprozesse unterteilt und jeweils Proben entnommen. Es wurde die Faserlängenverteilung des Ausgangsmaterials, nach Verlassen der Dosierschnecke, nach dem Sidefeeder (ZSB), im Granulat und im spritzgegossenen Zugstab analysiert.

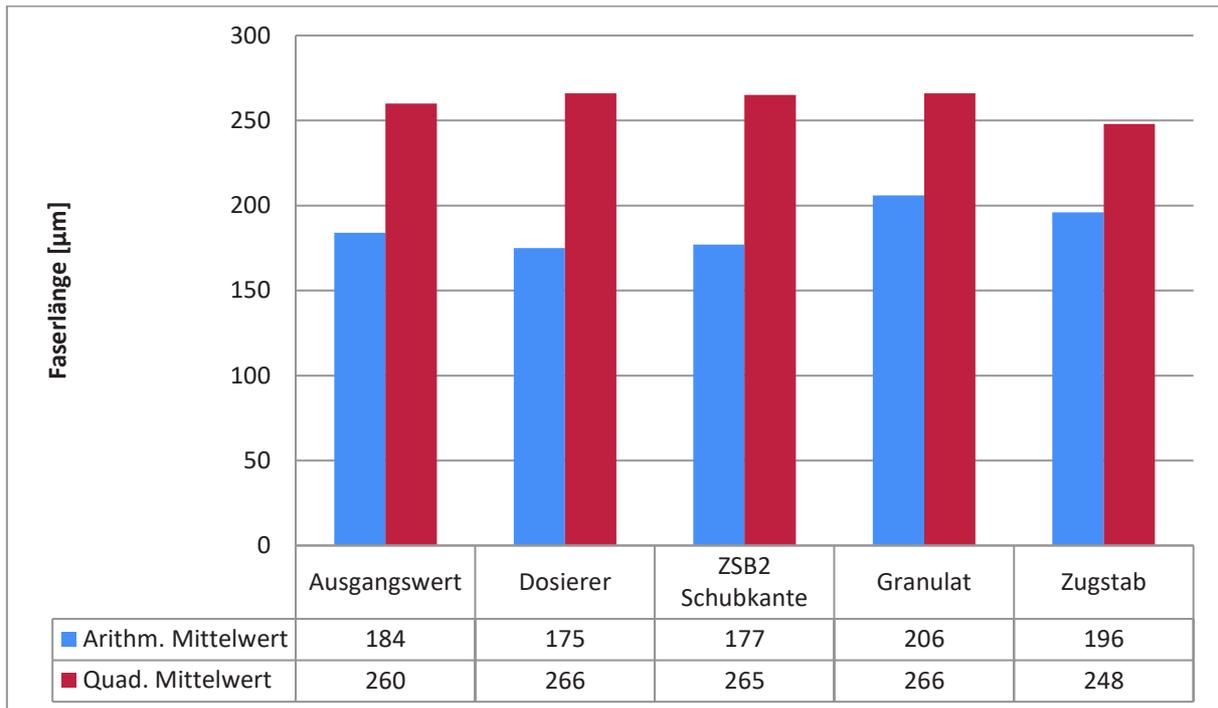


Abbildung 13: Abbau der Carbonfasern im Prozess

Die Mittelwerte der Faserlängen steigen im Laufe des Prozesses wieder an. Da dieses nicht möglich ist, wurde die Homogenität der Proben untersucht. Es stellte sich heraus, dass unterschiedliche Geometrien und Größen der Fiberballs unterschiedlich lange Fasern beinhalten (Abbildung 14 & Abbildung 15).



Abbildung 14: Fiberball 500

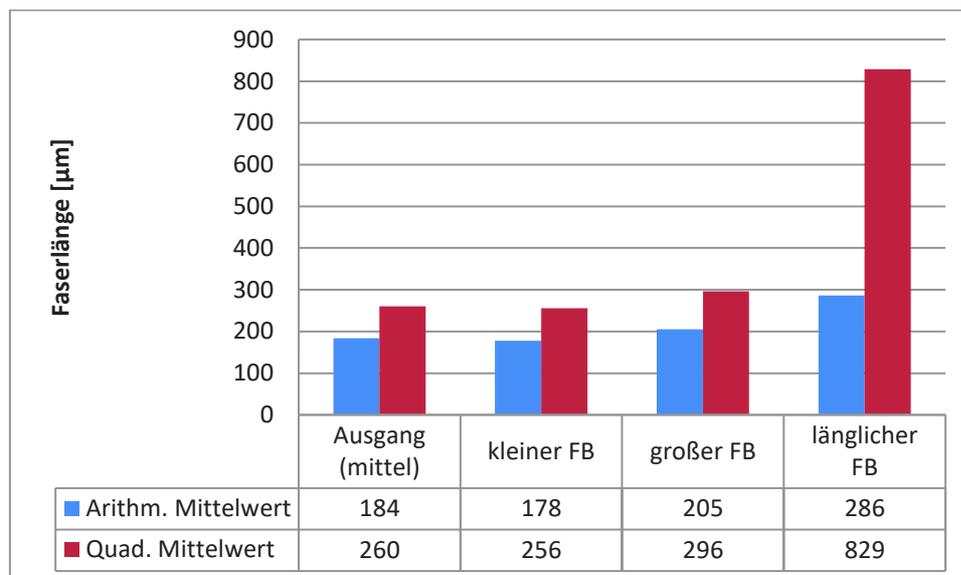


Abbildung 15: Mittelwerte der Faserlänge bei unterschiedlichen Geometrien der Fiberballs (FB)

Um den Prozess besser bewerten zu können, wurde mit den gleichen Parametern eine definierte Glasfaser verarbeitet. Hierdurch wurde eine Homogenität der Probe gewährleistet. Der Verlauf der Faserkürzung an den unterschiedlichen Verfahrensteilschritten ist deutlich erkennbar (Abbildung 16). Bis zum Sidefeeder ist die Kürzung sehr gering. Im Sidefeeder wird die Faser im quad. Mittelwert um über 700  $\mu\text{m}$  gekürzt. Die deutlichste Kürzung der Faser erfolgt im Extruder, hier verliert die Faser fast 2000  $\mu\text{m}$  ihrer Länge.

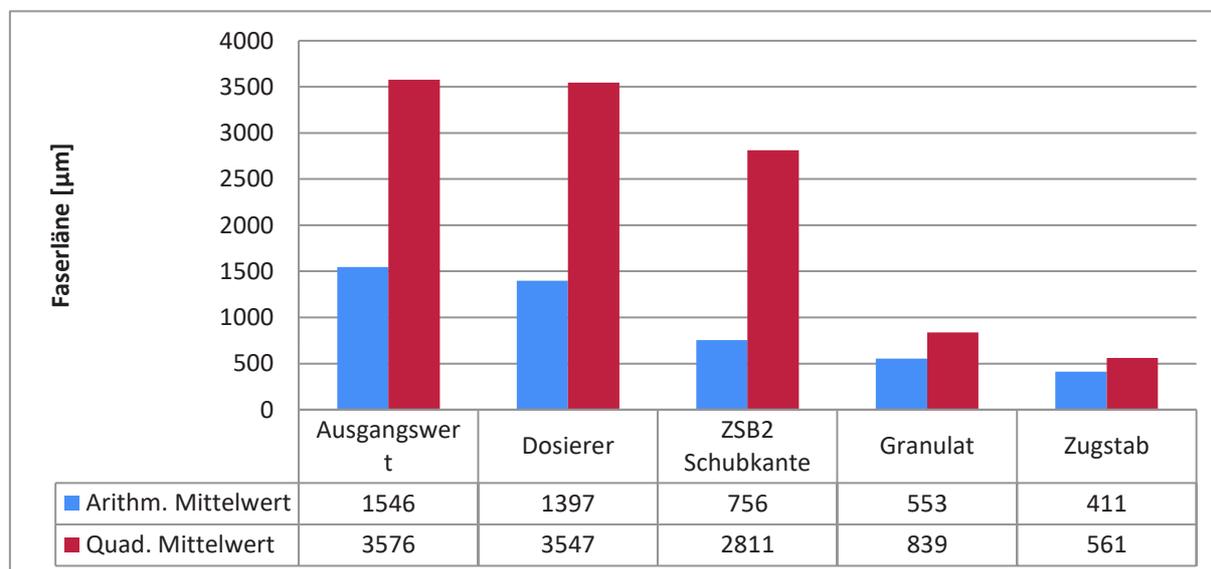


Abbildung 16: Abbau der Glasfasern im Prozess

Die Untersuchung mit den Glasfasern zeigte, dass eine ausreichende Länge der Fasern mit den gewählten Parametern und Schneckenkonfigurationen realisiert werden kann. Die Ausgangslänge der Fasern im Fiberball sollte daher erhöht werden, um bessere Festigkeiten zu erzielen.

Desweiteren wurde der Einfluss des Massenanteils der Carbonfasern auf die Einkürzung untersucht. Die Reibung der Fasern untereinander kann zu einem häufigeren Bruch führen.

Bezeichnung	Quad. Mittelwert FLV - Granulat [ $\mu\text{m}$ ]	Quad. Mittelwert FLV - Zugstab [ $\mu\text{m}$ ]	Einkürzung im Spritzguss [ $\mu\text{m}$ ]
30 w% FB500	261	240	21
15 w% FB500	299	283	16

Abbildung 17: Einfluss des Massenanteils auf den Faserbruch

Die Versuche mit 30 w% bzw. 15 w% Faseranteil zeigten, dass höhere Anteile auch eine höhere Einkürzung mit sich bringen.

Der starke Einfluss der Faserlänge auf die Mechanik wird durch den Vergleich der Fiberball 500 mit einem „Granulan FB“ ersichtlich (Abbildung 18). Der Faseranteil im Granulat beträgt 15 w%. Durch die Erhöhung des quadratischen Mittelwertes der Faserlänge im Granulat von 299  $\mu\text{m}$ , im FB500 auf 352  $\mu\text{m}$  erhöht sich die Zugfestigkeit um fast 12 %. Die Kerbschlagzähigkeit zeigt ebenfalls eine Erhöhung durch den längeren Faseranteil.

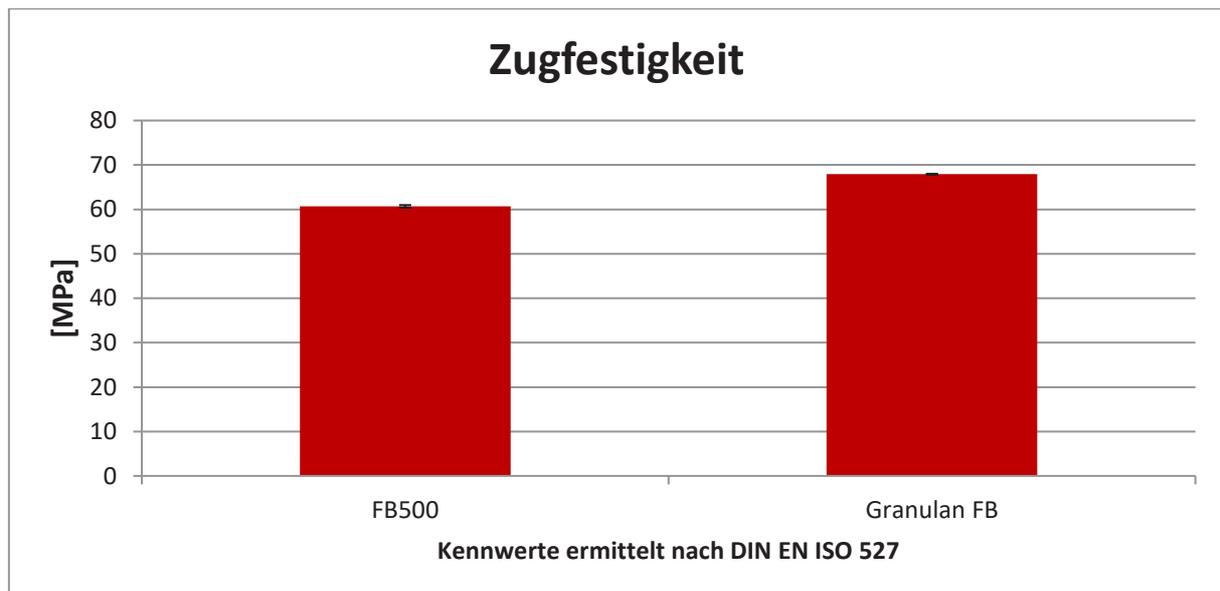


Abbildung 18: Einfluss der Faserlänge auf die Zugfestigkeit

Die Versuchsreihen zur Faserlängenverteilung zeigten auf, dass die Kompaktierung der Carbonfasern mit dem Erhalt längerer Fasern von entscheidender Bedeutung ist. Jedoch müssten sich die Fasern anschließend auch ohne Bruch in die Matrix einarbeiten lassen.

### 3.3.3 Einfluss des Pyrolyseprozesses auf die mechanischen Kennwerte

Anhand der 15 w% Granulan FB in PP kann der Einfluss der Pyrolyse auf die Carbonfasern gut beschrieben werden. Es wurden Fiberball mit pyrolysierten Fasern und mit nicht pyrolysierten (NP) Fasern hergestellt. Bei der Produktion der nicht pyrolysierten Granulan FB wurde in einem Versuch ein Binder eingesetzt, bei einer anderen Charge wurde auf den Binder verzichtet. Die untersuchten Faserlängenverteilungen im Granulat ergaben keine signifikanten Unterschiede. Die Zugfestigkeit der pyrolysierten Fasern war über 10% höher als bei der NP-Qualität. In der Rezeptur wurden 2 w% Haftvermittler zugegeben. Dieser kann mit den funktionellen Gruppen an der Oberfläche der pyrolysierten Faser, die durch das Verfahren entstehen, gut reagieren.

Die nicht pyrolysierten Fasern weisen weniger dieser funktionellen Gruppen auf, sodass keine Oberflächenreaktion stattfinden kann. Dieses zeigte auch der Versuch mit dem Binder, der daher keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit besitzt.

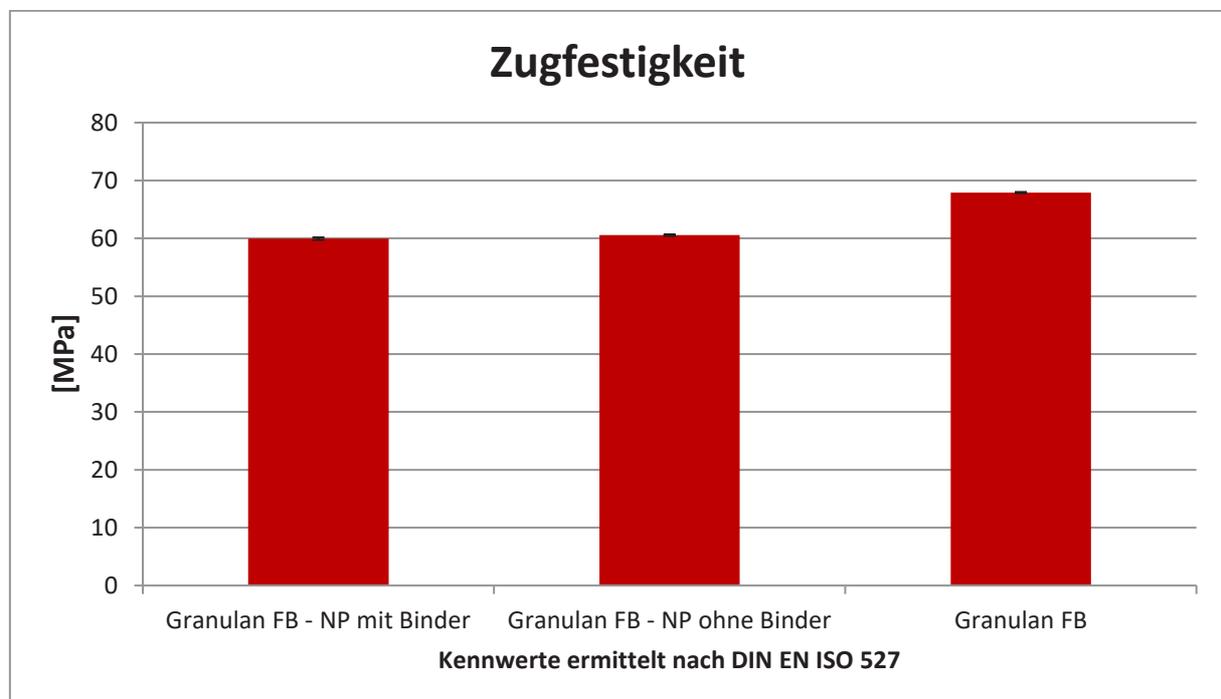


Abbildung 19: Einfluss der Pyrolyse auf die Zugfestigkeit

Der Vergleich mit einem PA 6-Granulan-Compound erzielte ähnliche Ergebnisse. In dieser Versuchsreihe wurde ebenfalls ein Haftvermittler zugegeben. Die Zugfestigkeit war durch die Pyrolyse ca. 10 MPa höher als bei der NP-Ware. Der E-Modul stieg von 15835 MPa auf 17412 MPa.

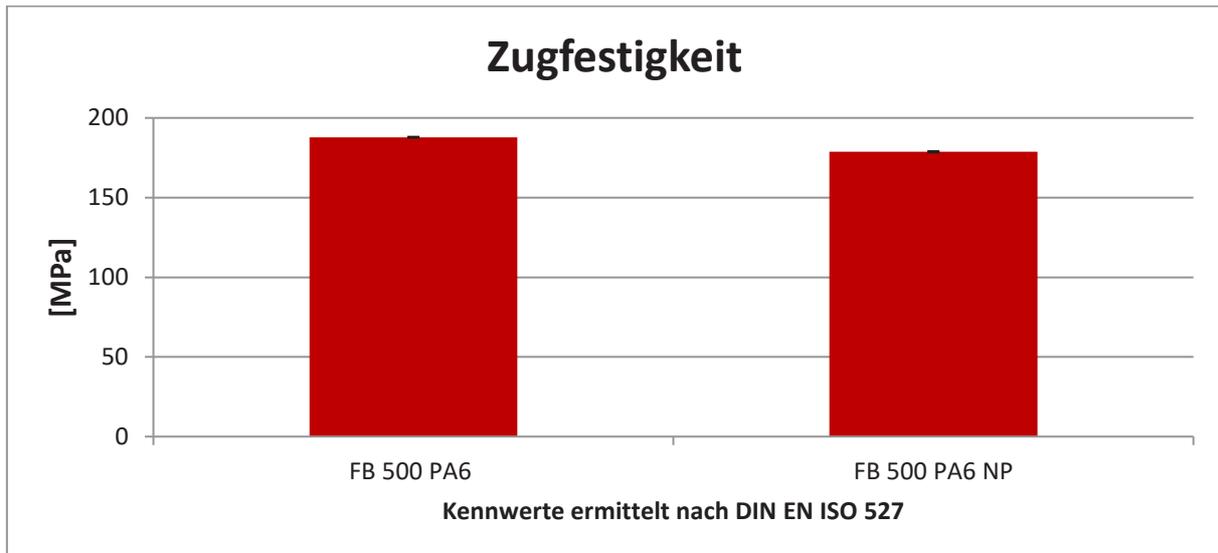


Abbildung 20: Einfluss der Pyrolyse auf die Zugfestigkeit in einer PA 6-Matrix

### 3.3.4 Optimierung der Festigkeit im Verhältnis zur Schlagzähigkeit

Die Anforderungsprofile der assoziierten Partnerfirmen verlangen ein gutes Verhältnis zwischen Festigkeit und Zähigkeit. Die Optimierung erfolgt in der Matrix Sabic 579S mit einem Fiberballanteil von 30 w%. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Konzentrationen vom Haftvermittler Scona TPPP 9212 und dem Modifier Vistamaxx 6202 untersucht (Abbildung 21). Der Haftvermittler besteht aus einem mit Maleinsäureanhydrid modifizierten PP. Durch eine Ringöffnungsreaktion des Anhydrids mit einer Hydroxygruppe der Carbonfaseroberfläche entsteht eine kovalente Bindung. Die Matrixverträglichkeit der Faser wird durch das Polypropylen erzielt. Der Modifier Vistamaxx 6202 besteht hauptsächlich aus einem isotaktischen Polypropylen, in den statistisch zufällig Ethyleneinheiten eingebaut sind. Hierdurch besitzt der Modifier eine sehr gute Zähigkeit.

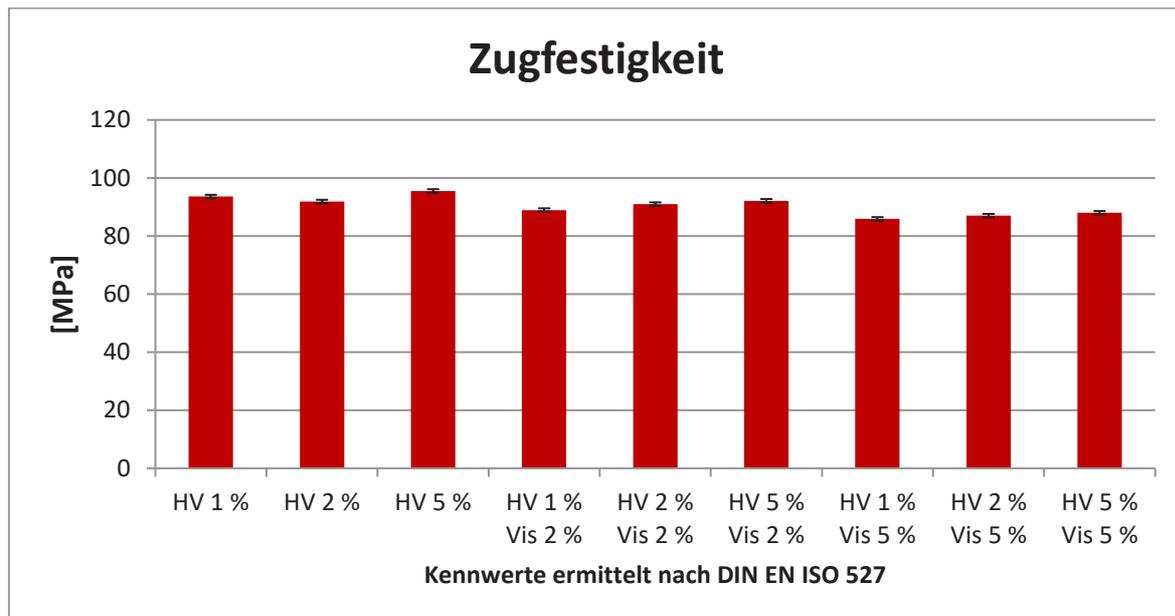


Abbildung 21: Einfluss der Haftvermittler- und Modifier-Konzentration auf die Zugfestigkeit

Wie erwartet, erniedrigt der Modifier die Zugfestigkeit. Durch die Erhöhung des Haftvermittleranteils kann dieses zum Teil ausgeglichen werden.

Eine weitere wichtige Kenngröße ist die Dehnung. Die Messwerte zeigen, dass eine Erhöhung der Haftvermittler- und der Modifier-Konzentration sich positiv auf die Dehnung auswirkt (Abbildung 22). Der Wert bei einer Konzentration von 2% Haftvermittler wird hierbei als Ausreißer gewertet.

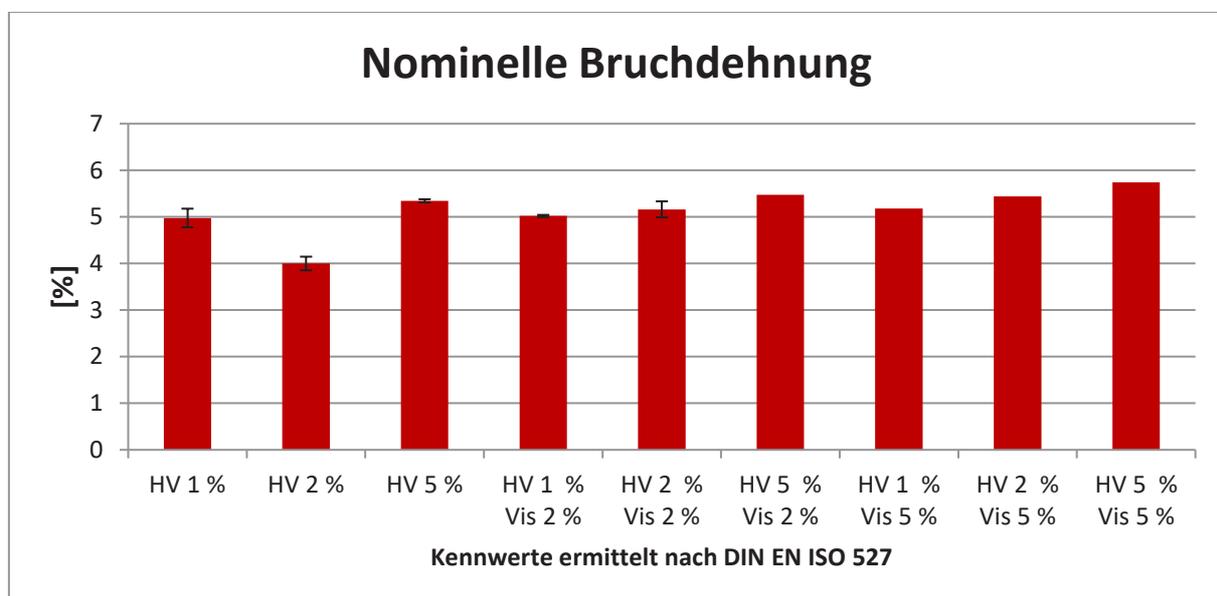


Abbildung 22: Einfluss der Haftvermittler- und Modifier-Konzentration auf die nominelle Bruchdehnung

Der Einfluss auf die Schlagzähigkeit zeigt, wie erwartet, dieselbe Tendenz wie die Dehnung. Bei der Versuchsreihe ist die Streuung der rezyklierten Carbonfaser relativ hoch. Die Tendenz ist dennoch ersichtlich (Abbildung 23).

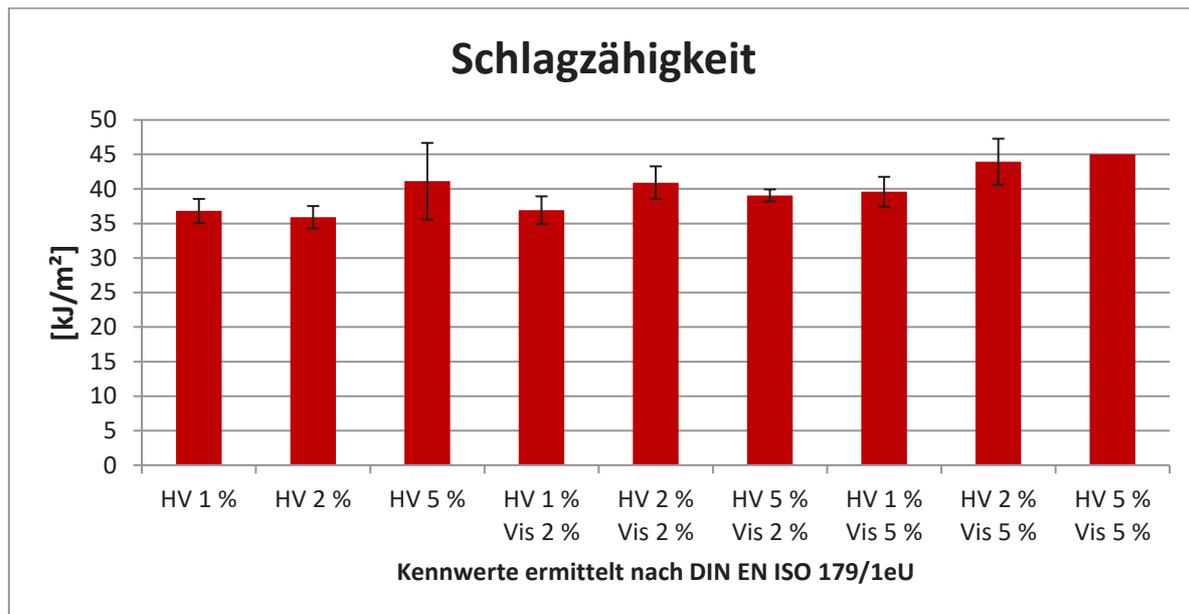


Abbildung 23: Einfluss der Haftvermittler- und Modifizier-Konzentration auf die Schlagzähigkeit

Um die Zugfestigkeit weiter zu erhöhen, ist eine sehr gute Matrixanhaftung notwendig. Hierzu wurden verschiedene Haftvermittler auf Basis von Maleinsäureanhydrid-funktionalisiertem PP eingesetzt. Der Unterschied der verschiedenen Typen liegt in der Viskosität und im Pfropfgrad an Maleinsäureanhydrid. Die Type mit der höchsten Viskosität, also dem niedrigsten MFR (190°C; 2,16kg: 4-8 g/10 min), weist in der Versuchsreihe die höchste Zugfestigkeit auf. Die Typen mit niedriger Viskosität weisen die geringste Festigkeit auf (Abbildung 24).

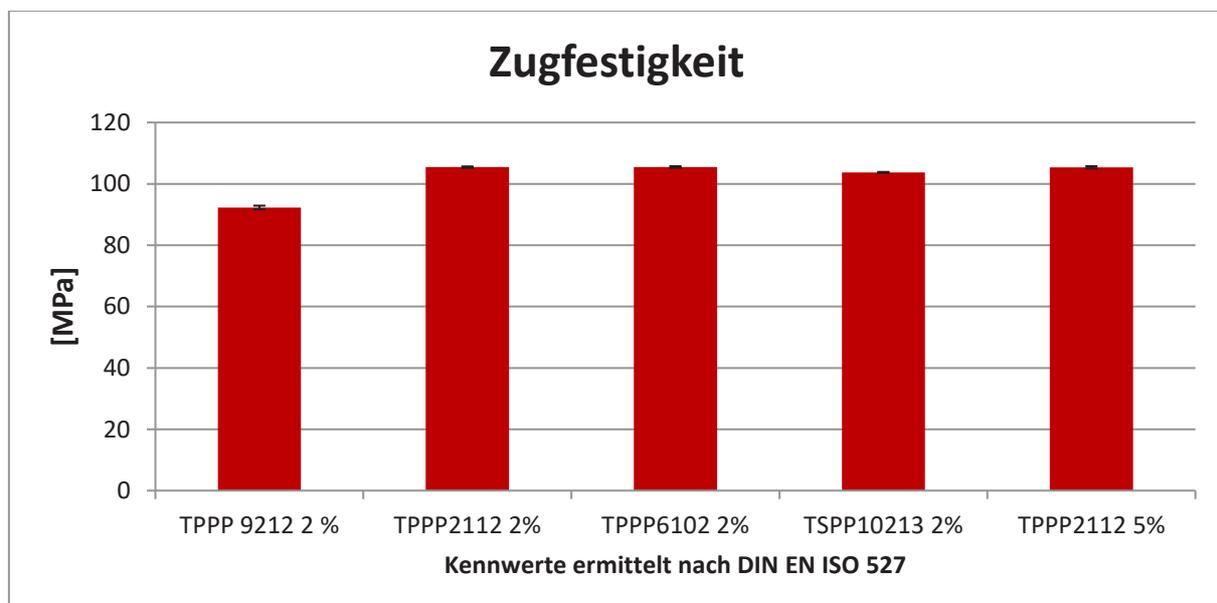


Abbildung 24: Screening unterschiedlicher Haftvermittler in Bezug auf die Zugfestigkeit

Vorteile zeigen die Haftvermittler mit niedriger Viskosität bei der Zähigkeit (Abbildung 25). Eine Erhöhung der Konzentration des hoch viskosen

Haftvermittlers TPPP 2112 zeigt keine signifikante Erhöhung der mechanischen Kennwerte.

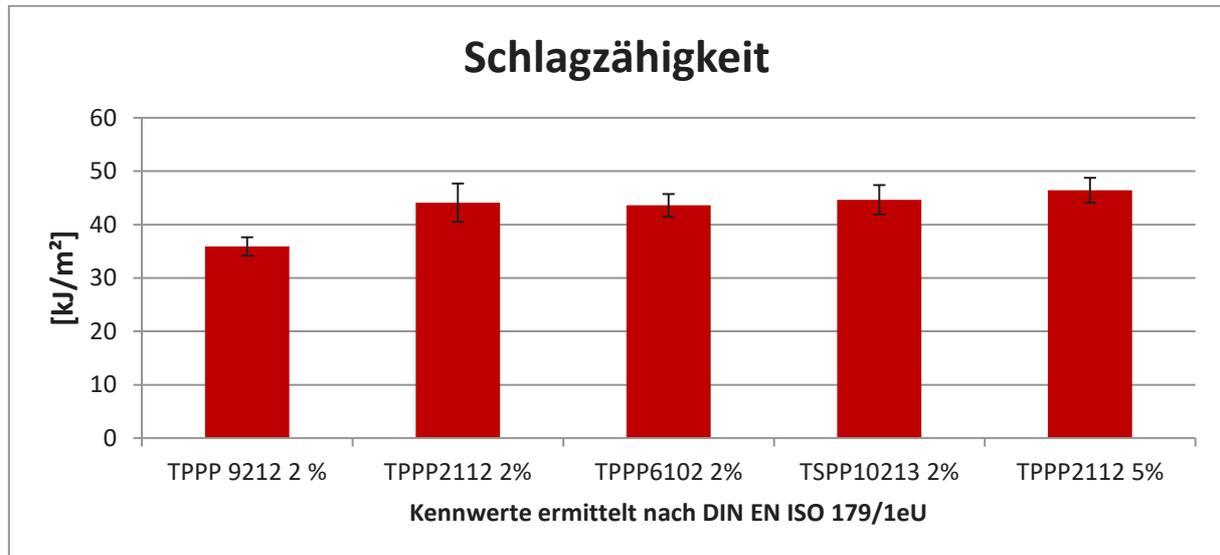


Abbildung 25: Screening unterschiedlicher Haftvermittler in Bezug auf die Zähigkeit

Ein Screening in einer PA 6 Matrix wurde ebenfalls durchgeführt. Hierbei wurde wieder die funktionelle Maleinsäureanhydrid-Gruppe eingesetzt, allerdings sind die funktionellen Gruppen auf die PA-Matrix abgestimmt. Es wurde ein funktionalisiertes Ethylen-Octen-Copolymer (TSPOE 1002) und ein funktionalisiertes Polyolefin-Block-Copolymer eingesetzt. Neben der Matrixverträglichkeitsverbesserung der Carbonfasern wirken diese Copolymere auch als Schlagzähmodifizier in PA. Dieses zeigen auch die Werte der Zugfestigkeit (Abbildung 26). Bei Erhöhung der Konzentration sinkt die Festigkeit der Compounds.

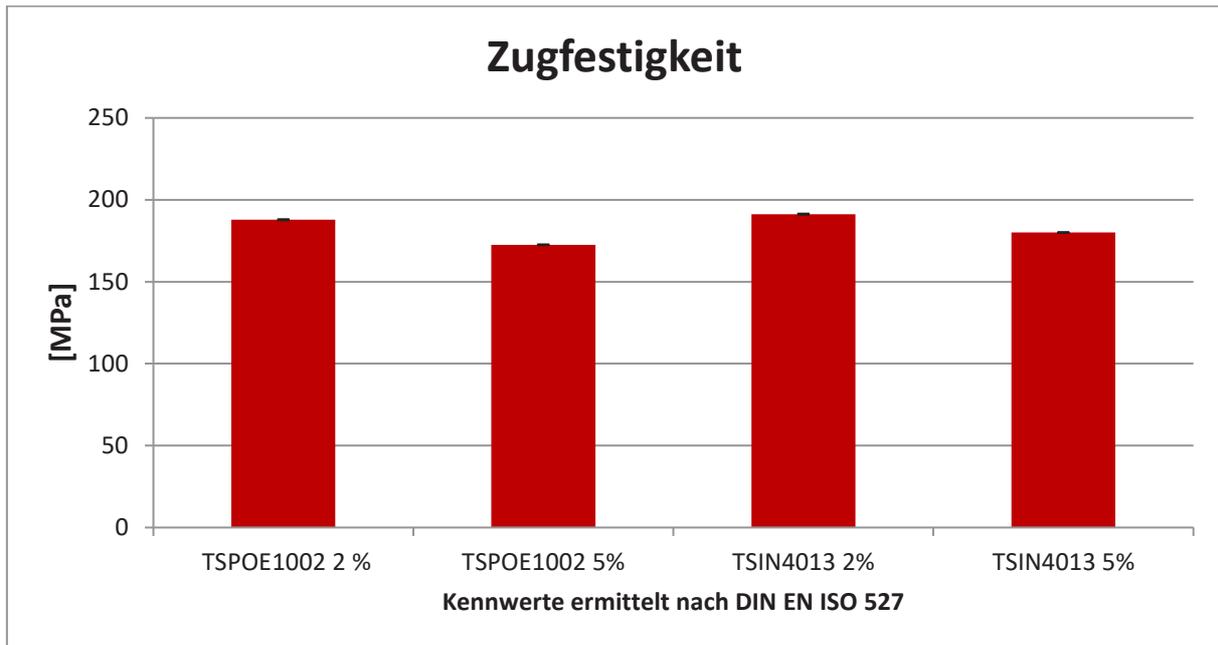


Abbildung 26: Screening der PA-Modifizier in Bezug auf die Zugfestigkeit

Die Erhöhung der Konzentration des funktionalisiertes Ethylen-Octen-Copolymer TSPOE 1002 von 2% auf 5% wirkt sich positiv auf die Zähigkeit aus (Abbildung 27). Der Einfluss der Erhöhung des TSIN 4013 bewegt sich nur innerhalb der Standardabweichung und ist daher nicht signifikant.

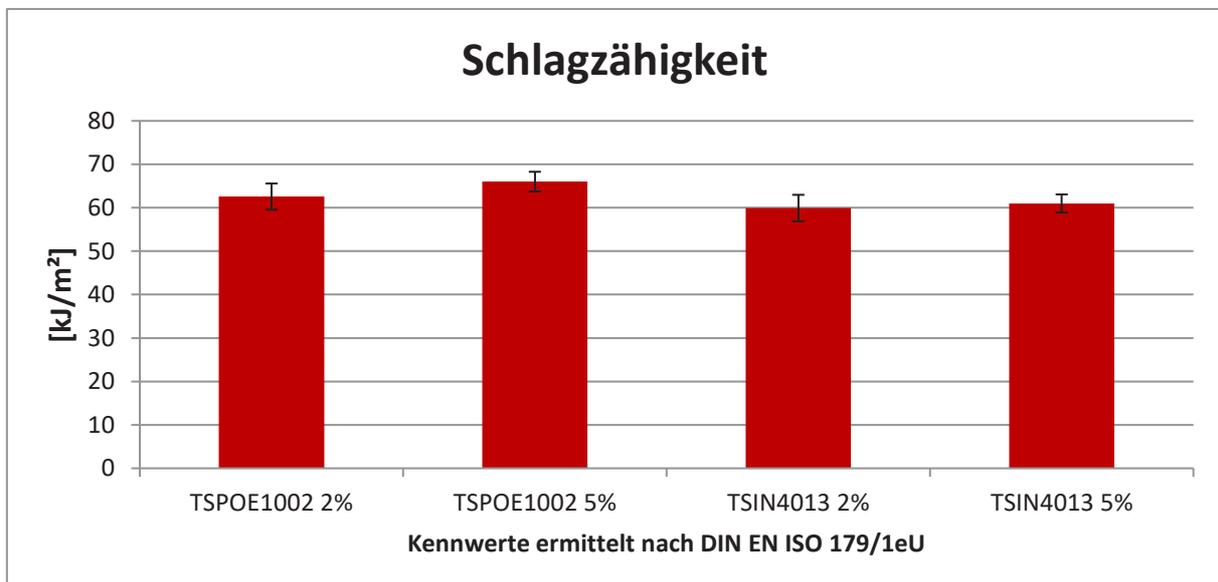


Abbildung 27: Screening der PA-Modifizier in Bezug auf die Schlagzähigkeit

### 3.3.5 Elektrische Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit der Compounds wurde durch eine 10fach-Bestimmung des Durchgangswiderstandes errechnet. Bei einem Carbonfaseranteil von 15 % lagen die Werte so niedrig, dass diese mit der Messapparatur nicht bestimmt werden konnten. Die Werte der Compounds mit 30 w% Fiberballs konnten in Matrix PP und PA bestimmt werden. Der Anteil reicht aus, um ein Perkolationsnetzwerk

auszubilden, in dem der Strom durch die Matrix geleitet werden kann. Die erzielten Werte bieten beispielsweise die Möglichkeit, das Compound in Explosionsschutzbereichen einzusetzen, da sie sich nicht statisch aufladen.

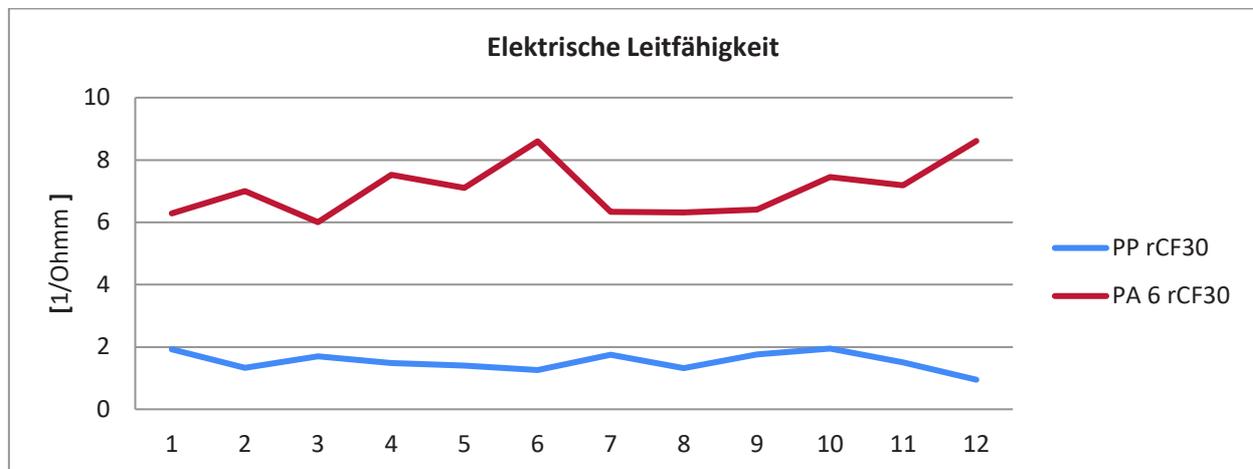


Abbildung 28: Elektrische Leitfähigkeit von Compounds mit 30 w% Fiberballs

### 3.4 Verarbeitung

Aufgrund der längeren, ungeplanten Optimierung der Herstellung von Fiberballs oder anderen, gut dosierbaren Pelletformen konnte eine spezifische Kundenanforderung mit definierten Compouneigenschaften nicht umgesetzt werden. Ursächlich dafür ist die Problematik bei der Produktion der Compounds, da weder Fiberball noch Pellet entsprechend optimal verarbeitet werden konnten.

Darüber hinaus konnte das Konsortium eine entsprechende Rezepturentwicklung gemäß Kundenanforderung der assoziierten Partner nicht im vorgegebenen Zeitplan realisieren.

Der CFK Valley Stade Recycling ist es parallel gelungen, mit Compound-Halbzeugen aus dem vorangegangenen Projekt potentielle Kunden zu bemustern und dadurch Anforderungen, Abweichungen und Anwendungspotentiale zu erkennen.

Weiterhin wurde versucht, auf einer großindustriellen Anlage mit einem Brabender-Aggregat als Zudosierer längere, geschnittene Carbonfasern in ein Compound zu extrudieren. Diese speziellen Aggregate sind bisher kommerziell nicht verfügbar und machen den Compoundpreis nicht wettbewerbsfähig, da der Prozess unnötige zusätzliche Schritte erfordert, im Vergleich zur Einarbeitung einer am Markt verfügbaren Neu-Carbonfaser. Grundsätzlich ist das Material für die Endanwender interessant. Leider sind momentan aufgrund der Schwierigkeiten bei der Zudosierung keine größeren Mengen verfügbar. Sobald hier eine Lösung gefunden wird, können enorme Marktpotentiale erreicht werden.

Es ist essentiell, dass die Versuche mit den assoziierten Partnern auch nach Beendigung des Projektes fortgeführt und finalisiert werden, um Ergebnisse hinsichtlich einer Substitution von etablierten Produkten zu erreichen.

Die Versuche bei den Anwendern erfolgen nach Projektende. Aufgrund der zeitlichen Verschiebung konnten einige der geplanten Projektkosten der CFK Valley Stade Recycling in den Kategorien Sachkosten, Fremdleistungen und Reisekosten nicht abgerufen werden.

### 3.5 Projektmanagement und Technologietransfer

Das Konsortium hat auf zahlreichen Seminaren, Tagungen und Messen auf das Projektvorhaben hingewiesen und die Ergebnisse entsprechend präsentiert.

Am KIMW wurde eine Dauerpräsentation eingerichtet, durch die das Projekt ausführlich dargestellt wurde. Zudem wurden im Institut in zwei unterschiedlichen Bereichen Vitrinen zur Verfügung gestellt, in denen der Wertschöpfungsprozess abgebildet wird (Abbildung 29). Das Projekt konnte so zahlreichen Besuchern und Kunden nähergebracht werden. Die dadurch entstandenen Kontakte werden auch nach Beendigung der Projektarbeit weiterverfolgt.



Abbildung 29: Wertschöpfungsprozess ReCarbo2

Potentielle Kunden wurden während der Teilnahme an verschiedenen Messen oder bei Arbeitskreistreffen, an denen die CFK Valley Stade Recycling beteiligt war, identifiziert, angesprochen und zum Teil mit diversen Lieferformen bemustert. Deren Anforderungen und Rückmeldungen fließen in die Überlegungen zum Projekt und die weitere Versuchsplanung ein.

Nachfolgend sind exemplarisch einige Daten aufgeführt:

Vorträge:

- Rademacker, T.: „Sekundäre C-Fasern für die industrielle Anwendung – Status und Spektrum der Recycling-Möglichkeiten“, Leichtbaukongress 2017, 13.06.2017-14.06.2017, Leipzig
- Rademacker, T.: „Composites in der Fahrrad-Industrie/ CFRP Recycling – Business Opportunity“, Forum des CCeV, 29.06.2017, Winterthur – Schweiz
- Rademacker, T.: „Anwendungen faserverstärkter Kunststoffe“, Netzwerk Lightweight – Licht und Design, 09.04.2018, Solingen

Messen/ Veranstaltungen/ Ausstellungen:

- JEC, Paris 2017
- Composites Europe, Stuttgart 2017
- Fakuma, Friedrichshafen 2017
- JEC, Paris 2018
- Forum Leichtbau des BMWi, Berlin 13.09.2018
- Arbeitskreise „rCF Anwendungen“ und „Multi-Material-Design“, Augsburg 27.09.2018
- GoCarbonFiber Conference, Berlin 09.10.2018-11.10.2018
- Fakuma, Friedrichshafen 2018
- Composite Europe, Stuttgart 2018

## 4 Fazit

Der Fokus dieses Projektes lag in der Entwicklung neuartiger CF-Compounds, die hinsichtlich eines ressourcenschonenden Werkstoffeinsatzes größtmögliche Marktrelevanz erwarten lassen und die das Potential besitzen, bereits in der Produktion von Kunststoffherzeugnissen etablierte Halbzeuge ersetzen zu können.

Dazu war es notwendig, die Lieferform „Fiberball“ und weitere gut dosierbare rCF-Pelletformen hinsichtlich der Verwendung in carbonfaserverstärkten Compounds zu optimieren und weiterzuentwickeln sowie Anforderungen von Endanwendern zu identifizieren und umzusetzen.

Aufgrund von Verzögerungen bei der Optimierung der Pelletformen und den Schwierigkeiten bei der Zudosierung längerer Faserfraktionen reichte die Projektzeit für die anwenderspezifische Umsetzung leider nicht aus. Die zugehörigen Arbeiten sind jedoch so essentiell, dass sie auch nach Projektende fortgesetzt werden. Entsprechende Bemusterungen bei unserem assoziierten Partner EMB Papst sind bereits veranlasst.

Hinsichtlich der Optimierung der Lieferformen wurden wesentliche Ergebnisse aus dem Projekt generiert. Besonders wichtig ist die Erkenntnis der Zusammenhänge zwischen der Faserlängenverteilung in den Compounds und den erzielten maximalen mechanischen Festigkeitswerten. Um Carbonfaser-Compounds mit exzellenten mechanischen Festigkeitswerten herzustellen, muss es gelingen, die Faserlänge in den Compounds noch weiter zu erhöhen und ein möglichst hohes Schüttgewicht zu erreichen, damit diese rezyklierten Carbonfaserhalbzeuge überall eingesetzt werden können und die Hemmnisse ausgeschaltet werden. Nur dann wird es möglich sein, konkrete Anwendungen zu finden und den Markt von der Relevanz und der Qualität der so hergestellten CF-Rezyklat-Compounds zu überzeugen. Dazu ist es notwendig, noch längere Faserfraktionen in die CF-Compounds einzuarbeiten. Gute Chancen werden hier durch die Zudosierung von kompaktierten, geschnittenen Fasern gesehen. Fortführende Tests in diese Richtung folgen nach Abschluss des Projektes.

Weitere wichtige Anforderungen an marktrelevante rCF-Compounds sind Staubfreiheit und Rieselfähigkeit. Die entsprechenden Tests und Untersuchungen werden ebenfalls in Folgeprojekten fortgeführt und weiterentwickelt.

Trotz noch fehlender Normen und abgeschlossener Studien lohnt sich der Einsatz von Carbonfaser-Rezyklaten bereits jetzt. So ist die Einbringung von insbesondere sortenreinen Rezyklaten mit hohen Faserlängen in Compounds betriebswirtschaftlich sinnvoll. Die enge Kooperation zwischen Recycler und

Verarbeiter sollte dazu in beiderseitigem Interesse weiter ausgebaut werden, um die Situation im Bereich der Normierung, der Anforderungen und der Vorhersage von Bauteileigenschaften zu verbessern.

Die Politik sollte diesen Prozess konstruktiv kritisch begleiten, indem sie auf Lösungen für die Wiederverwendung und Verwertung von End-of-Life-Materialien dringt. Für eine weitere Steigerung der Marktakzeptanz sollte sie als Katalysator agieren, indem die hohe Relevanz der recycelten Carbonfasern als Wertstoff von ihr deutlich eingefordert und hervorgehoben wird.

## 5 Abkürzungs- und Einheitenverzeichnis

AP	Arbeitspaket
CF	Carbonfaser
CFK	Carbon-Faser-Komposites
CFRTP	Carbon-Fiber-Reinforced-Thermoplastics
CFRTS	Carbon-Fiber-Reinforced-Thermoset
KIMW	Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft NRW GmbH
PA	Polyamid
PP	Polypropylen
rCF	rezyklierte Kohlenstofffasern
w%	Gewichtsprozent
ZSB	Sidefeeder

MJ	Megajoule
°C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
h	Stunde
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
min	Minute
mm	Millimeter
Mpa	Megapascal

## 6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energiebilanz .....	3
Abbildung 2: Fiberballs .....	6
Abbildung 3: Rezyklat PP CF30 Compounds im Vergleich mit kommerziell aktiven PP CF und GF Produkten.....	7
Abbildung 4: Rezyklat PP CF30 Compounds im Vergleich mit kommerziell aktiven PP CF und GF Produkten.....	7
Abbildung 5: Rezyklat PP CF30 Compounds im Vergleich mit kommerziell aktiven PP CF und GF Produkten.....	8
Abbildung 6: Bruchfläche eines Polyamid-Compounds mit 30 w% CF .....	13
Abbildung 7: Fiberballs mit längeren CF-Anteilen.....	14
Abbildung 8: Scherarme Schneckenkonfiguration mit einem Zahnmischelement	16
Abbildung 9: Förderschnecke .....	16
Abbildung 10: Vergleich Schneckenkonfigurationen über die Festigkeit .....	17
Abbildung 11: Vergleich Schneckenkonfigurationen über die Schlagzähigkeit ...	17
Abbildung 12: Faserlängenverteilung des Zugstabes .....	18
Abbildung 13: Abbau der Carbonfasern im Prozess .....	19
Abbildung 14: Fiberball 500 .....	19
Abbildung 15: Mittelwerte der Faserlänge bei unterschiedlichen Geometrien der Fiberballs (FB) .....	20
Abbildung 16: Abbau der Glasfasern im Prozess .....	20
Abbildung 17: Einfluss des Massenanteils auf den Faserbruch .....	21
Abbildung 18: Einfluss der Faserlänge auf die Zugfestigkeit .....	21
Abbildung 19: Einfluss der Pyrolyse auf die Zugfestigkeit .....	22
Abbildung 20: Einfluss der Pyrolyse auf die Zugfestigkeit in einer PA 6-Matrix..	23
Abbildung 21: Einfluss der Haftvermittler- und Modifier-Konzentration auf die Zugfestigkeit .....	24
Abbildung 22: Einfluss der Haftvermittler- und Modifier-Konzentration auf die nominelle Bruchdehnung .....	24
Abbildung 23: Einfluss der Haftvermittler- und Modifier-Konzentration auf die Schlagzähigkeit.....	25
Abbildung 24: Screening unterschiedlicher Haftvermittler in Bezug auf die Zugfestigkeit .....	25
Abbildung 25: Screening unterschiedlicher Haftvermittler in Bezug auf die Zähigkeit.....	26
Abbildung 26: Screening der PA-Modifier in Bezug auf die Zugfestigkeit .....	27
Abbildung 27: Screening der PA-Modifier in Bezug auf die Schlagzähigkeit .....	27
Abbildung 28: Elektrische Leitfähigkeit von Compounds mit 30 w% Fiberballs..	28
Abbildung 29: Wertschöpfungsprozess ReCarbo2 .....	29