
Schlussbericht MAI Recycling

Datum	31.12.2015
Zuwendungsempfänger	bifa Umweltinstitut GmbH
Förderkennzeichen	03MAI03A
Vorhabenbezeichnung	MAI Recycling – Entwicklung ressourceneffizienter CFK-Recyclingverfahren und Prozessketten für die künftige Bereitstellung qualitativ hochwertiger rC-Halbzeuge
Laufzeit des Vorhabens	01.07.2012 – 30.06.2015
Berichtszeitraum	01.07.2012 – 30.06.2015

Autoren: Siegfried Kreibe; Bernhard Hartleitner; Anita Gottlieb; Ruth Berkmüller; Andreas Förster; Dieter Tronecker; Birgit Reinelt; Karsten Wambach; Wolfgang Rommel

Ergebnisse des Forschungsvorhabens

1.	Aufgabenstellung	1
2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	8
4.1	Carbonfaserverstärkte Kunststoffe	8
4.2	Klassifizierung der Recyclingverfahren	9
4.3	Verfahren zur Freilegung von Carbonfasern aus CFK (Stand bei Projektbeginn)	11
4.4	Kommerziell eingesetzte Recyclingverfahren	15
4.4.1	Recycling –Center Stade, BRD	15
4.4.2	ELG Carbon Fibre Ltd., Großbritannien.....	15
4.5	Patentsituation	16
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	16
6.	Erzielte Ergebnisse	18
6.1	Projektkoordination	18
6.1.1	Arbeitstreffen und Workshops (in chronologischer Reihenfolge)	19
6.1.2	Abstimmung mit dem Clustermanagement.....	25
6.2	Marktanalyse Abfälle und Recyclingfasern	26
6.3	Erfassung	28
6.4	Zerkleinerung	29
6.4.1	Zerkleinerungsversuche bei der Neidhardt GmbH (Pierret-Schneidemaschine) 29	
6.4.2	Zerkleinerungsversuche bei der Lober GmbH & Co. KG (Rotorschere und Schneidmühle).....	30
6.4.3	Zerkleinerung von Produktionsabfällen und CFK-Bauteilen aus dem Bereich Automotive bei Erdwich Zerkleinerungssysteme GmbH.....	32
6.5	Pyrolyse	37
6.5.1	Behandlung von Duromer basierten CFK in der großtechnischen Pyrolyseanlage Burgau.....	37

6.5.2	Optimierung der Oberflächengüte und des Freilegungsgrades von C-Fasern bei der Pyrolyse.....	38
6.5.3	Integriertes CFK-Verwertungszentrum	43
6.6	Sortierung	47
6.6.1	Abtrennung von Glasfasern und weiteren Störstoffen	47
6.6.2	Bewertung der betrachteten Verfahren.....	53
6.7	Großversuch	54
6.7.1	Vorzerkleinerung	55
6.7.2	Freilegung durch Pyrolyse bei ELG in Coseley.....	56
6.7.3	Bewertung der freigelegten Fasern	57
6.7.4	Schneiden von freigelegten Fasern	59
6.7.5	Weiterverarbeitung der freigelegten rC-Fasern zu Halbzeugen	60
6.7.6	Verarbeitungsversuche zur Carbon-Compoundierung für den Spritzguss bei der WIPAG Deutschland GmbH & Co. KG	65
6.7.7	Verarbeitungsversuche zur FIM-Faserblastechnik bei der Fiber Engineering GmbH in Karlsruhe	67
6.8	Prozessbewertung.....	68
6.8.1	Prozessbaukasten.....	68
6.8.2	Bewertung der Einzelprozesse.....	69
6.8.3	Verlustanalyse.....	70
6.8.4	Entwicklungsbedarf	73
6.9	Zuordnung zu den Arbeitspaketen	74
7.	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	75
7.1	Nutzen und Verwertbarkeit für bifa.....	75
7.2	Nutzen und Verwertbarkeit über bifa hinaus	75
8.	Bekannte Fortschritte anderer Stellen auf diesem Gebiet	75
8.1	Patente.....	76
9.	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	77

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Projektplan MAI Recycling.....	4
Abbildung 4-1: Bedeutung des Recycling der Carbonfasern für die Ökobilanz von CFK, dargestellt anhand des energetischen Rucksacks.....	11
Abbildung 6-1: Abschätzung des Aufkommens an CFK-Abfällen in Europa für das Jahr 2013. Datenbasis: CCeV (2014 und 2013), eigene Berechnungen; Annahme zu Molding, Compounding, Drucktanks, Bauwesen, Übrige: Anteil Bedarf Europa an Welt = Durchschnitt der übrigen Einsatzbereiche (45 %).....	27
Abbildung 6-2: Prognose des Aufkommens an CFK-Abfällen in Europa für das Jahr 2020. Datenbasis: CCeV (2014 und 2013), eigene Berechnungen; Annahme zu Molding, Compounding, Drucktanks, Bauwesen, Übrige: Anteil Bedarf Europa an Welt = Durchschnitt der übrigen Einsatzbereiche (45 %); Annahme: Marktanteil Europa am Weltmarkt entspricht dem Anteil im Jahr 2012.....	27
Abbildung 6-3: Vorschlag zu einer einheitlichen Nomenklatur für Carbonfaser- und CFK-Abfälle.....	28
Abbildung 6-4: Pierret Schneidemaschine (Quelle Pierret Industries)	29
Abbildung 6-5: Rotorschere (Fa. MeWa).....	30
Abbildung 6-6: Grobzerkleinertes Material	31
Abbildung 6-7: Schneidmühle sowie Schneidwerk	31
Abbildung 6-8: Feinzerkleinertes Material	32
Abbildung 6-9: Zerkleinerungsversuch bei Erdwich Zerkleinerungssysteme GmbH: Versuchsschema.....	33
Abbildung 6-10: Korngrößenverteilung BMW Produktionsabfälle	34
Abbildung 6-11: Fließbild Zerkleinerungsanlage für CFK-Bauteile	35
Abbildung 6-12: Spezifische Zerkleinerungskosten in Abhängigkeit von Durchsatz und Betriebsstunden pro Jahr	36
Abbildung 6-13: Verfahrensschema MPA Burgau (Quelle MPA Burgau).....	38
Abbildung 6-14: Schematische Darstellung des Versuchsstandes	39
Abbildung 6-15: Inputmaterial geschreddert und nach Zerkleinerung per Mühle	40
Abbildung 6-16: Beispiel für Temperaturprofile	41
Abbildung 6-17: Konzept für die Integration einer Pyrolyse-Anlage in eine Müllverbrennungsanlage; grün: ganz oder teilweise in der MVA mitnutzbar, blau: neu zu errichtende Kernkomponenten.....	44
Abbildung 6-18: Verfahrensfliessbild CFK-Pyrolyseanlage (fiktive Anlage).....	45

Abbildung 6-19:	Funktionsprinzip Corona-Walzenscheider (KWS)	47
Abbildung 6-20:	Versuchsaufbau Flotation.....	50
Abbildung 6-21:	Mengenanteile von Carbon- /Glasfasern je Versuch.....	51
Abbildung 6-22:	Verteilung zwischen Carbon- und Glasfasern nach der Flotation.....	52
Abbildung 6-23:	Prozesskette Großversuch (Quelle für Abbildung zur Pyrolyse: ELG Carbon Fibre Ltd.)	54
Abbildung 6-24:	Korngrößenverteilung nach der Vorzerkleinerung	55
Abbildung 6-25:	Rüttelsieb inkl. Verteilung auf die Fraktionen.....	56
Abbildung 6-26:	Freigelegte rC-Fasern unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM)	57
Abbildung 6-27:	rC-Fasern; TGA unter synthetischer Luft.....	58
Abbildung 6-28:	rC-Fasern; TGA unter 20% synthetischer Luft und 80% Sauerstoff	58
Abbildung 6-29:	Verfahrensschema zum Versuch mit einer Schneidmühle bei der Hosokawa Alpine AG	59
Abbildung 6-30:	Vliesmuster aus rC-Fasern.....	61
Abbildung 6-31:	Oberfläche von Carbonfaservlies (Quelle Helfer Papier/RESO GmbH) ...	63
Abbildung 6-32:	Papierprozess bei Neenah Gessner	63
Abbildung 6-33:	Im Rahmen des Großversuchs bei Neenah-Gesner aus Pyrolysefasern hergestelltes carbonfaserhaltiges Papier (Foto: Neenah-Gessner).....	64
Abbildung 6-34:	Links rC-Fasern, rechts Neufasern (Quelle Neenah Gessner).....	65
Abbildung 6-35:	Prozesskette Carbon Compounding bei WIPAG	66
Abbildung 6-36:	Prozessbaukasten zur stofflichen Verwertung von CFK-Material.....	69
Abbildung 6-37:	Bewertungsraster für Prozessschritte des Prozessbaukastens.	70
Abbildung 6-38:	Vereinfachte Prozesskette.....	71
Abbildung 6-39:	Mittlere Verluste an C-Fasern, Beispiel	72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6-1:	Verluste am 3-Wellen-Zerkleinerer:	33
Tabelle 6-2:	Verluste am 1-Wellen-Zerkleinerer	34
Tabelle 6-3:	Kostenvergleich eines integrierten CFK-Verwertungszentrum mit einem kompletten Neubau	46
Tabelle 6-4:	Beispielhafte Ergebnisse von Dispergierversuchen mittels Propellerrührer	49
Tabelle 6-5:	Übersicht erprobter Sortierverfahren für freigelegte Carbonfasern	53

Tabelle 6-6:	Mechanische Kennwerte von Verbundplatten aus Vlieshalbzeugen mit einem Faservolumenanteil von ca. 31,5%	61
Tabelle 6-7:	Carbon Compounding bei WIPAG - Eigenschaftsprofile von Prüfkörpern mit Carbonfaser-Neuware und rCF	67
Tabelle 6-8:	Orientierende Abschätzung der Faserausbeuten in der gesamten Recyclingkette	72
Tabelle 6-9:	Arbeitspakete und Verweise auf die Kapitel, in denen die AP behandelt werden	74

1. Aufgabenstellung

Übergeordnetes Ziel des Leitprojekts MAI Recycling war der Aufbau einer Prozesskette für die Rückgewinnung von Carbonfasern aus CFK EoL (End of Life) Bauteilen und Produktionsausschuss und deren Aufbereitung und Wiedereinsatz in neuen Werkstoffen und Produkten.

CFK und CFK-Vorläufer, meist mit Duromeren als Matrixmaterial, fallen in Form von EoL Teilen und Produktionsausschuss an. Die Menge dieses zu entsorgenden bzw. recycelnden Materials wird in den nächsten Jahren stark zunehmen. Das Recycling solcher Abfälle ist gesetzlich gefordert (s. Abfallhierarchie der EU). Life-Cycle-Analysen (LCA) zeigen zudem dass eine hochwertiges Recycling die Umweltbilanz sehr wesentlich verbessern kann.

Der Bedarf an Recyclingtechnologien für Carbonfasermaterialien und an den erzeugten Recyclingprodukten hängt von der Einsatzmenge carbonfaserverstärkter Kunststoffe ab. Die Prognosen für die kommenden Jahre zeigen hier ein deutliches Wachstum. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Nachfrage nach Recyclingware.

Grundsätzliches Ziel der bifa Umweltinstitut GmbH im Projekt MAI Recycling war die Anwendung und Weiterentwicklung der Kompetenzen im Bereich des Recyclings von komplexen Produkten und Materialien. Hierbei stand zum einen die Entwicklung eines effizienten Prozesses zur Freilegung von C-Faser aus CFK Materialien für große Mengenströme im Vordergrund. Zum anderen sollte durch die Entwicklung einer geeigneten Recycling-Prozess-Kette eine Rückführung der aus CFK-Abfällen gewonnenen C-Faser z. B. in Form von geschnittenen bzw. gemahlenden Fasern in den Produktkreislauf ermöglicht werden.

Das Hauptaugenmerk der CFK-Aufbereitung zur Wiedergewinnung der Fasern galt dabei der Pyrolyse. Wie der einschlägigen Literatur zu entnehmen ist, kann durch Pyrolyse der CFK-Teile bei geeigneten Temperaturen und kontrollierter Atmosphäre das Matrix-Material entfernt und die Faser frei gelegt werden. Hier galt es, optimale Prozessbedingungen (Temperatur, Atmosphäre, Verweilzeit, Schüttdichte, Vorzerkleinerung, Bauteilgröße, Skalierungseffekte) für das jeweilige Material bzw. Materialgemisch zu bestimmen und die Prozessketten vor und nach der Pyrolyse auf die Notwendigkeiten der Verwertung abzustimmen.

Die wiedergewonnenen Fasern sollten hinsichtlich ihrer Materialeigenschaften untersucht, klassifiziert und gegebenenfalls entsprechend aufbereitet werden.

Darüber hinaus hatte bifa im Rahmen des Projektes MAI Recycling die Gesamtkoordination inne.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) stellen ein Verbundmaterial aus Carbonfasern und einer Kunststoffmatrix dar. Carbonfasern werden überwiegend aus Polyacrylnitril (PAN) in einem mehrstufigen Prozess hergestellt. Je nach Temperaturführung unterscheiden sich die mechanischen Eigenschaften der Fasern. Bei ca. 1300°C erreicht die Festigkeit ihr Maximum. Hochfestigkeitsfasern (HT) und Intermediate-Modulus (IM) Fasern werden bei dieser Temperatur hergestellt. Die Steifigkeit der Fasern in Faserrichtung steigt kontinuierlich mit der Behandlungstemperatur. Aus diesem Grund werden Hochmodulfasern (HM) in einem weiteren Prozessschritt (Graphitieren) Temperaturen von 2000 – 3000°C ausgesetzt.

Bei einer vergleichsweise geringen Dichte von nur ca. 1,8 g/cm³ weisen Carbonfasern mit einem Elastizitätsmodul von ca. 120 bis 250 GPa sowie einer Zugfestigkeit von ca. 2.700 bis 6.300 MPa hervorragende mechanische Eigenschaften auf. Sie eignen sich ideal als Verstärkungsfasern für unterschiedliche Kunststoffe. Als Kunststoffmatrix werden sowohl Duromere wie z. B. Epoxid- oder Phenolharze aber mehr und mehr auch Thermoplaste, wie Polypropylen oder auch PEEK eingesetzt. Die dadurch entstehenden CFK-Materialien weisen ideale Eigenschaften für den Leichtbau auf.

In vielen Industriezweigen werden in Zukunft immer größere Mengen an carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) anfallen. Diese liegen zum Teil als sortenreines Produkt, aber vor allem auch als Mischmaterial zusammen mit Glasfaser und/oder Metall vor. Es ist abzu-sehen, dass die hergestellten Produkte mit sehr unterschiedlichem Zeitverzug als Abfall anfallen werden. Vor dem abfallrechtlichen Hintergrund, zum Beispiel den Vorgaben des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes, kommt der Produktverantwortung der Hersteller und dem Recycling ausgedienter Produkte besondere Bedeutung zu. Zudem gebieten es die umwelpolitischen Forderungen nach Energie- und Ressourceneinsparungen gerade im Sinne des Klimaschutzes, dass Abfälle und Produktionsrückstände einer Wiederverwendung oder möglichst hochwertigen Verwertung zugeführt werden.

Die Pyrolyse von CFK wird in Europa bereits in zwei Anlagen im Produktionsmaßstab betrieben, nämlich bei der CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG in Stade sowie in Großbritannien bei ELG Carbon Fibre Ltd. Beide Prozesse sind jedoch noch nicht stabil am Markt etabliert. Weltweit gibt es zudem bislang keine wirtschaftlich tragfähige, großtechnische, automatisierte Recyclingtechnologie für CFK-Materialien. Dies ist bedauerlich, weil die Mengenströme CFK-haltiger Abfälle aufgrund des verstärkten Einsatzes im Leichtbau der Luftfahrtindustrie, der Automobilindustrie, in der Windenergiebranche und vielen anderen Bereichen zunehmend größer werden. Am Beispiel des Flugzeugbaus kann die beschriebene Mengensteigerung verdeutlicht werden. Während in den 70er Jahren der Anteil von CFK Strukturen in einem Airbus lediglich bei 5 % lagen, bestehen beim Airbus A380 (Erstflug im

Jahr 2005) schon ca. 22 % der Struktur aus CFK. Für die neuesten Flugzeuggenerationen, wie beispielsweise der Boeing 787 (Dreamliner) als auch der A350 XWB, kommen bereits ca. 50 % Composite-Werkstoffe zum Einsatz, welche vor allem für Primärstrukturen (Flugzeugzelle, Flügel, etc.) eingesetzt werden.

Vorprojekte des bifa Umweltinstituts zeigten, dass für CFK-Materialien vor allem solche Recyclingverfahren in Frage kommen, die es erlauben, die Carbonfasern bei hinreichender Länge möglichst unbeschädigt zurück zu gewinnen. So sind die besten Voraussetzungen geschaffen, um den Materialwert zu erhalten und die für die Neuproduktion benötigte Energie einzusparen. Gelingt das stoffliche Recycling, so lassen sich ungefähr 50 % der Herstellungsenergie einsparen.¹

Die Region München-Augsburg-Ingolstadt entwickelte sich in den vergangenen Jahren zur Kompetenzregion für den industriellen Einsatz von CFK-Werkstoffen. Neben der weltweit agierenden SGL Group, Meitingen, die zu den bedeutendsten Produzenten von Carbon- bzw. Graphitprodukten zählt und der Materialforschung an der Universität Augsburg siedelten sich spezialisierte Institute des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) sowie der Fraunhofer Gesellschaft in Augsburg an. Zudem haben sich im Carbon Composite e. V. (CCeV) mittlerweile mehr als 250 große wie mittelständische Unternehmen, Forschungseinrichtungen und öffentliche Institutionen zusammen gefunden, um die CFK-Technologie gemeinsam zu fördern und zu optimieren².

Der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten liegt auf produkt- und produktionsspezifischen Fragestellungen, mit dem Ziel CFK-Herstellungsprozesse zu optimieren sowie technisch und wirtschaftlich verbesserte Verarbeitungsverfahren zu entwickeln.

Das Thema „End-of-Life“ hat bei diesen produktspezifischen Entwicklungsarbeiten zunächst nur untergeordnete Bedeutung. Schon aufgrund der gesetzlichen Produktverantwortung ist es jedoch geboten, geeignete Verfahren zur Verwertung der „verbrauchten“ Werkstoffe zu entwickeln. Bei einer Lebensdauer der CFK Produkte in der Luftfahrtindustrie von ca. 20 bis 30 Jahren und in der Automobilindustrie von ca. 10 bis 15 Jahren ist abzusehen, dass sich das Aufkommen an CFK-haltigen Reststoffen in absehbarer Zeit stark erhöhen wird. Für den dauerhaften Markterfolg von CFK ist es daher wichtig, die Entwicklung praxis- und marktauglicher Recyclingverfahren zügig voranzutreiben.

In der Kompetenzregion MAI gibt es mehrere Unternehmen, die sich mit unterschiedlichen Strategien mit dem Recycling von GFK und CFK-Materialien beschäftigt haben. Das bifa Umweltinstitut befasst sich seit 1991 mit der Entwicklung und großtechnischen Umsetzung von Recyclingverfahren für Abfälle und Produktionsrückstände aus unterschiedlichen Bran-

¹ Sujit Das; *Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites*; *Int. J. Life Cycle Assess* (2011), 16; S. 268-282

² S. auch <http://www.carbon-composites.eu>

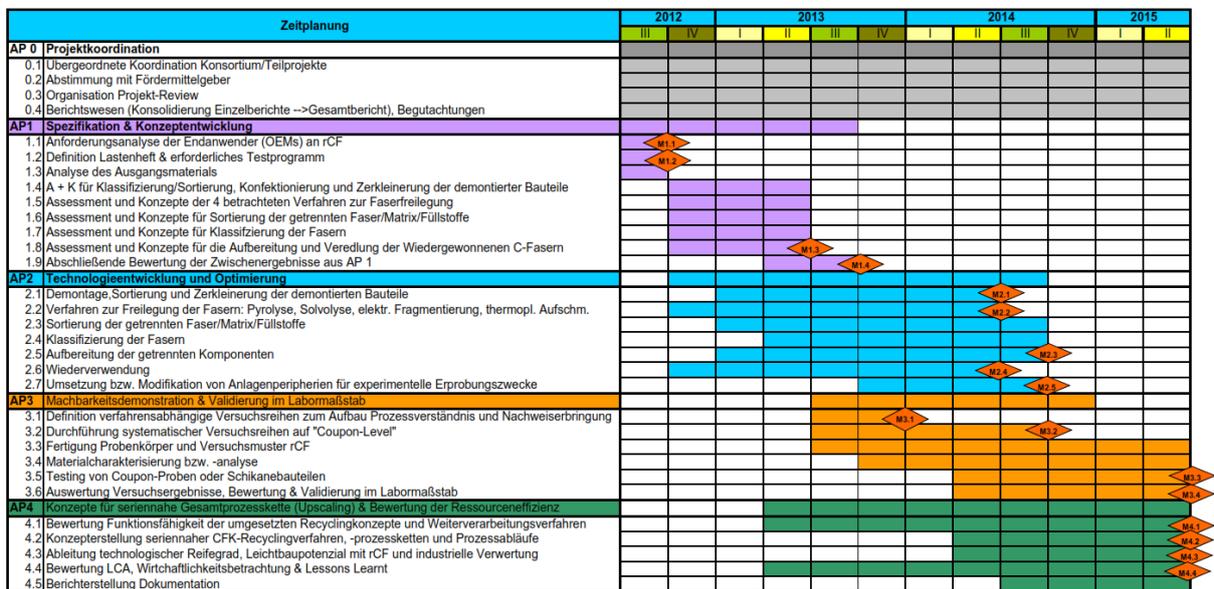
chen. Im Rahmen von öffentlich geförderten - und Industrieprojekten wurden dabei auch unterschiedliche Ansätze der Wiederaufarbeitung von CFK-Materialien verfolgt.

Aufgrund erster Vorversuche und aktueller Erkenntnisse zur pyrolytischen Behandlung von CFK-Materialien erschien dieser Ansatz als Teilprozess zum Recycling durchaus interessant. Vorteilhaft war, dass in räumlicher Nähe zum bifa am Standort Burgau die einzige großtechnische Pyrolyseanlage zur Abfallbehandlung in Deutschland in Betrieb war. Die Versuche an der Anlage sollten im Rahmen einer Studie innerhalb des Verbundprojektes weiter intensiviert werden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Leitprojekt „MAI Recycling“ startete am 1. Juli 2012. Das Projektkonsortium setzte sich aus zwei Forschungspartnern, der bifa Umweltinstitut GmbH (bifa) und dem Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), sowie folgenden sechs Industriepartnern zusammen: AUDI AG, BMW AG, Neenah Gessner GmbH, SGL Carbon GmbH, Siemens AG und Voith Composite GmbH & Co. KG.

Der Projektplan beinhaltetete – neben dem Arbeitspaket (AP) Projektkoordination (AP 0), welches von bifa übernommen wurde – vier Arbeitspakete mit insgesamt 27 Teil-AP, die in der Bearbeitung auf die Partner verteilt waren (vgl. Abbildung 3-1).



aktualisiert am 27.11.2014

Abbildung 3-1: Projektplan MAI Recycling

bifa bearbeitete folgende Arbeitspakete inhaltlich:

AP 1: Spezifikation & Konzeptentwicklung effizienter Recycling-Prozessketten

AP 1.5: Assessment und Konzepte der 4 betrachteten Trennverfahren

AP 1.5.1: Duomer basiertes CFK: Pyrolyse

AP 1.6: Assessment und Konzepte für Sortierung der getrennten Faser/Matrix/Füllstoffe

AP 1.9: Abschließende Bewertung der Zwischenergebnisse aus AP 1

AP 2: Technologieentwicklung und Optimierung

AP 2.2: Technologieentwicklung und Optimierung der 4 betrachteten Trennverfahren

AP 2.2.1: Pyrolyse (Fokus auf Optimierung Oberflächengüte und Großserientauglichkeit)

AP 2.3: Technologieentwicklung und Optimierung für Aufbereitung und Sortierung der Fasern

AP 2.7: Umsetzung bzw. Modifikation von Anlagenperipherien für experimentelle Erprobungszwecke (Vorbereitung Pilot)

AP 3: Machbarkeitsdemonstration & Validierung im Technikumsmaßstab

AP 3.1: Definition verfahrensabhängiger Versuchsreihen

AP 3.2: Durchführung systematischer Versuchsreihen auf "Coupon-Level"

AP 3.2.1: Recyclingversuche (je nach Trennverfahren) und Prozessanalyse

AP 3.2.2: Nachbereitungsversuche (Separation und Klassifizierung des Rezyklats)

AP 4: Konzepte für seriennahe Gesamtprozesskette (Upscaling) und Bewertung der Ressourceneffizienz

AP 4.1: Bewertung Funktionsfähigkeit der umgesetzten Recyclingkonzepte und Verfahren

AP 4.5: Berichterstellung, Dokumentation

Nach einem ersten Treffen im Juni startete das Verbundprojekt MAI Recycling am 25. Juli 2012 offiziell mit einer Kickoff-Veranstaltung, die am bifa unter Beteiligung aller Projektpartner sowie von Vertretern des Projektträger Jülich (PTJ) und des Clustermanagements stattfand.

Während der Projektlaufzeit wurden im Dreimonatsrhythmus Arbeitstreffen durchgeführt, im Rahmen derer die Projektpartner ihren aktuellen Bearbeitungs- und Ergebnisstand vorstellten und diskutierten. Innerhalb von Workshop-Elementen wurden zudem gemeinsame Themen bearbeitet und das weitere Vorgehen geplant.

Im Rahmen von AP 1 „Spezifikation & Konzeptentwicklung effizienter Recycling-Prozessketten“ – bearbeitet bis Mitte 2013 – wurde von bifa eine Abschätzung der potenziell anfallenden CFK-Sammelmengen, die für eine Verwertung an einer großtechnischen Pyrolyseanlage relevant sein könnten, vorgenommen. Des Weiteren wurden Vorversuche (bspw. zur Zerkleinerung des Inputmaterials) durchgeführt. Im Zuge der Planung des Großversuchs

an der MPA Burgau erfolgte eine Analyse der Betriebsbedingungen für den Einsatz von verschiedenen CFK-Abfallfraktionen. Zudem wurden mit Hilfe einer „Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse“ (FMEA) mögliche Problemstellen und Fehlerquellen identifiziert.

Für die Implementierung einer dauerhaften CFK-Pyrolyseanlage in Burgau wurde ein Konzept für die Optimierung der bestehenden Anlage hinsichtlich Temperatur und Verweildauer, des Gaspfades und der Abluftreinigung sowie des Ein- und Austrags zum Drehrohrföfen erstellt.

Ebenfalls Teil von AP 1 war die Erstellung eines Konzepts zur Trennung, Sortierung und Aufbereitung des freigelegten rCF (recycling Carbon Fasern), um eine möglichst hohe Qualität der recycelten Fasern gewährleisten zu können.

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden zudem eine Nomenklatur für die Sammlung von CFK-Reststoffen entwickelt und Kategorien für die Längenanforderung an rC-Fasern in Abhängigkeit von den Folgeprozessen und den herzustellenden Recyclingprodukten festgelegt. Des Weiteren wurde ein Verfahrensraster erstellt, mit dem die Freilegungs- und Verarbeitungstechniken dargestellt und anhand von festgelegten „Systematisierungskriterien“ beurteilt wurden. Zur Bewertung der in der Assessment- und Konzeptionsphase ausgearbeiteten Konzepte und Spezifikationen wurde eine Bewertungsmethodik entwickelt, anhand derer eine orientierende Abschätzung der in MAI Recycling untersuchten Freilegungsverfahren vorgenommen werden konnte.

Die Bearbeitung von Arbeitspaket 2 „Technologieentwicklung und Optimierung“ begann bereits Ende 2012 und wurde mit dem 3. Quartal 2014 abgeschlossen. Im Produktions- und Technikumsmaßstab führte bifa mehrere Versuche zur Zerkleinerung des CFK-Materials durch. Dabei erfolgte auch die Bestimmung der Korngrößenverteilung, des Staubanteils sowie der Verluste bei der Zerkleinerung von EoL-Bauteilen und Produktionsabfällen. Zudem wurden die Bedingungen (Temperatur, Verweildauer etc.) für den Großversuch in der MPA Burgau in Tastversuchen eingehend getestet und optimiert. Neben der Analyse des Einzugsverhaltens in der Pyrolyseanlage und den Auswirkungen von Fremdstoffen wurde eine thermoanalytische Untersuchung von CFK-Produktionsabfällen zur Bestimmung der Pyrolysegas-Zusammensetzung durchgeführt.

Auch zur Aufbereitung der freigelegten Fasern (Fasersortierung und Störstoffabscheidung wie Glasfasern oder Metalle) wurden Versuchsreihen mit verschiedenen Technologien gefahren, wie bspw. Flotation, Hydrozyklon, Sedimentation oder Corona-Walzenscheider.

Zum Ablauf der Hälfte der Projektlaufzeit (Ende 2013) konnte der übergeordnete Meilenstein erfüllt werden. Inhalt des Meilensteins war ein Lastenheft zur Technologieentwicklung und Optimierung für das Upscaling der einzelnen Verfahren zur Freilegung von C-Fasern aus EoL-Bauteilen im Projekt MAI Recycling. Dazu wurde ein Meilensteinbericht erstellt, der zudem zur Prüfung des Projektstands und der Qualität der Projektplanung und -durchführung diente.

In Abstimmung mit der MPA Burgau erfolgte die Planung des großtechnischen Versuchs an der Müllpyrolyseanlage. Ins Auge gefasst wurde die Durchführung für März 2014, im

Rahmen der halbjährlichen Anlagenrevision. Wegen überraschend auftretender und unerwartet hoher Versicherungskosten, aber auch wegen der damals schon unsicheren Zukunftsaussichten der Pyrolyseanlage musste dieser Versuch jedoch abgesagt werden. Nach einigen Monaten gelang es die ELG Carbon Fibre Ltd. für die Durchführung der Pyrolyse einer größeren Materialmenge zu gewinnen. Aufgrund dieser Entwicklungen wurde beschlossen, im Rahmen von AP 2 statt der Ertüchtigung der Müllpyrolyseanlage Burgau ein Konzept für ein „Integriertes CFK-Verwertungszentrum“ in Anbindung an eine Müllverbrennungsanlage zu entwickeln. Dieses Konzept wurde beispielhaft für das Abfallheizkraftwerk der GfA Geiselbullach ausgelegt. In diesem Verwertungszentrum sollte jegliche Art von CFK-Abfällen verwertet werden können.

Innerhalb von Arbeitspaket 3 „Machbarkeitsdemonstration und Validierung im Technikumsmaßstab“, welches von Mitte 2013 bis Projektende bearbeitet wurde, erfolgte im August 2014 die Durchführung des Großversuchs. Ziel war, das Handling von großen Mengen an CFK-Reststoffen (hier überwiegend in Form von Produktionsabfällen des Projektpartners BMW) über die gesamte CFK-Verwertungskette zu erproben und zu bewerten. Der Großversuch umfasste die Prozesskette von der Anlieferung des Materials und den vorgelagerten Prozessschritten (Zerkleinerung, Siebung) bis hin zur Freilegung, Mengenbilanzierung, Bewertung der rC-Fasern und der Weiterverarbeitung der Fasern zu Halbzeugen.

Ebenfalls im Rahmen des AP 3 wurden zur Materialprüfung und -charakterisierung einheitliche Probekörpern mit rC-Fasern (definierte Fasern und Matrixsystem) hergestellt. Hierfür wurden im Vorfeld gemeinsam Vorgehensweisen zur repräsentativen Erstellung der Prüfkörper festgelegt.

Arbeitspaket 4 hatte für bifa die „Bewertung der Funktionsfähigkeit der umgesetzten Recyclingkonzepte und Verfahren bezüglich der Faserverluste“ sowie einen Beitrag zur „Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der einzelnen Freilegungsverfahren“ zum Inhalt. Es wurde eine orientierende Abschätzung der im Laufe des gesamten Recyclingprozesses zu erwartenden Faserverluste durchgeführt. Außerdem wurde ein Raster mit entsprechenden Bewertungskriterien für die vereinfachte Prozesskette erstellt, um die Gesamtrecyclingkette beurteilen zu können. Des Weiteren wurde in einem Workshop zum möglichen Wiedereinsatz von rC-Fasern überlegt, welche Halbzeuge und Produkte aus rC-Fasern denkbar und umsetzbar wären. Im Rahmen von AP 4.4 wurden die Kosten-Nutzen-Aspekte der einzelnen Freilegungsverfahren abgeschätzt.

Am 29. Juli 2015 fand im Nachgang zur Förderphase des Leitprojekts MAI Recycling am bifa eine Abschlussveranstaltung mit allen Partnern, dem PTJ sowie dem Clustermanagement statt.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Carbonfaserverstärkte Kunststoffe

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) stellen ein Verbundmaterial aus Carbonfasern, einer Kunststoffmatrix sowie gegebenenfalls zusätzlichen Faser- und Füllkomponenten, wie z. B. Glasfasern, dar.

Die strukturelle Zusammensetzung dieser Bestandteile kann sehr unterschiedlich sein und wird durch die spätere Verwendung des Bauteils bestimmt. Ein einheitliches Recycling ist dadurch allerdings problematisch. Im Folgenden wird der Aufbau der einzelnen Komponenten näher beleuchtet, um die Schwierigkeiten und Ziele der Recyclingtechnik darstellen zu können. Carbonfaserverbunde unterscheiden sich in Bezug auf Fasertyp, Faserlänge, Faseranordnung und -orientierung.

Die Carbonfasern werden aus Kunststoff, in der Regel aus Polyacrylnitril in einem Pyrolyseprozess hergestellt. In Abhängigkeit von Prozessdauer und -temperatur (1.200°C bis 3.000°C) erhält man unterschiedliche Fasertypen mit entsprechend unterschiedlichen Eigenschaften:

- HT – Faser (high tenacity = hochfest)
- IM – Faser (intermediate modulus = mittelsteif)
- HM – Faser (high modulus = hochsteif)
- UHM – Faser (ultra high modulus = sehr hohe Steifigkeit)³

Die Faserlänge beeinflusst nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern auch den Herstellungsprozess des CFK. Es wird unterschieden:

- Kurzfaser (0,1 bis 1 mm): Anwendung in der Spritzgusstechnik
- Langfaser (1 bis 50 mm): noch einsetzbar im Faserspritzen
- Endlosfaser (L > 50 mm): Anwendung bei Bauteilen mit hohen Steifigkeitsanforderungen sowie Sichtbauteilen

Die Anordnung der Carbonfasern im Verbundsystem ist sehr vielfältig. Sie können als ungeordnete Vliese, als Gewebe oder als Faserbündel (Rovings) verarbeitet werden, die aus einigen tausend Monofilamenten ($\varnothing = 6 - 8 \mu\text{m}$) aufgebaut sind. Diese Fasern besitzen eine hohe Zugfestigkeit, eine gute chemische Beständigkeit und eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Aufgrund des hohen Sublimationspunktes von Kohlenstoff sind sie zudem sehr hitzebe-

³ Rosenbaum Ulrich; Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, Verlag Moderne Industrie AG Landsberg/Lech, 1994

ständig. Somit werden in einem einzigen Werkstoff die Materialeigenschaften von Graphit mit Textileigenschaften wie Flexibilität, Elastizität und geringer Dichte vereint.⁴

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe sind anisotrop in ihren mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit) und Zugbeanspruchbarkeit). Nur wenn die Last in Faserrichtung wirkt, können die Festigkeits-Eigenschaften der Fasern in vollem Umfang ausgenutzt werden. Folglich ist die Faserorientierung im Werkstoff selbst entscheidend.⁵

Die zweite Hauptkomponente des CFK ist die Kunststoffmatrix. Sie besteht aus Polymeren, die zusätzlich durch verschiedene Zusatzstoffe wie Stabilisatoren oder Füllstoffe modifiziert werden.⁶

In der Praxis werden drei Kunststoffgruppen unterschieden, Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere. Für CFK-Produkte sind jedoch lediglich Thermoplaste und Duroplaste von Bedeutung. Thermoplaste, wie beispielsweise Polypropylen (PP), Polyetheretherketon (PEEK) oder Polyphenylsulfid (PPS), sind aufgrund des strukturellen Aufbaus schmelzbar. Aus diesen Gründen können Thermoplaste bei Temperaturen zwischen 130 und 260°C nachträglich sowohl umgeformt wie auch geschweißt werden. Ferner besitzen sie die Eigenschaft, in organischen Lösemitteln quellfähig oder auch löslich zu sein. Diese Kunststoffe verfügen über eine mittlere Zugfestigkeit und Steifigkeit. Duroplaste hingegen, wie z. B. Epoxidharze (EPH), ungesättigte Polyesterharze (UP) oder Phenol-Formaldehydharze (PF), sind engmaschige Raumnetzwerkstrukturen. Sie sind nicht schmelzfähig, unlöslich und auch nicht quellfähig. Folglich besteht keine Möglichkeit, diese Kunststoffe nach dem Aushärten bzw. Vernetzen umzuformen. In Bezug auf carbonfaserverstärkte Verbundwerkstoffe werden in der Industrie meist Epoxidharze als duroplastisches Matrixmaterial verwendet. Die Herausforderung beim Recycling von Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen besteht somit im Abtrennen von Duromeren (wie z. B. Epoxidharze) von den Carbonfasern und in der möglichst weitgehenden Erhaltung der Fasereigenschaften und -länge. Je länger die Fasern sind, desto größer sind die Einsatzmöglichkeiten und die erzielbaren Festigkeiten.

Allerdings darf nicht außer Acht gelassen werden, dass auch Einsatzgebiete für Kurzfasern bzw. Fasermehl vorhanden sind, die zum jetzigen Zeitpunkt aus Neufasern hergestellt werden. Auch dieser Anwendungsbereich ist daher von großer Bedeutung.

4.2 Klassifizierung der Recyclingverfahren

Die Verwertungsverfahren für CFK können in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- Freilegung und Recycling der Carbonfasern: Die Kunststoffmatrix wird chemisch oder thermisch zerstört und entfernt. Sie kann so energetisch oder möglicherweise auch

⁴ Friedrich Klaus, *Vortragstexte der Tagung Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*, DGM Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt 1997

⁵ Martens Hans, *Recyclingtechnik*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2011

⁶ Friedrich Klaus, *Vortragstexte der Tagung Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*, DGM Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt 1997

stofflich genutzt werden. Die zurückbleibenden Carbonfasern werden dem Recycling zugeführt. Diese Verfahren haben das Potenzial, die Fasereigenschaften auf hohem Niveau zu erhalten und zu nutzen. Diese Verfahren sind für das Recycling von CFK mit thermoplastischen (schmelzbaren) und duroplastischen (nicht schmelzbaren) Matrixkunststoffen geeignet.

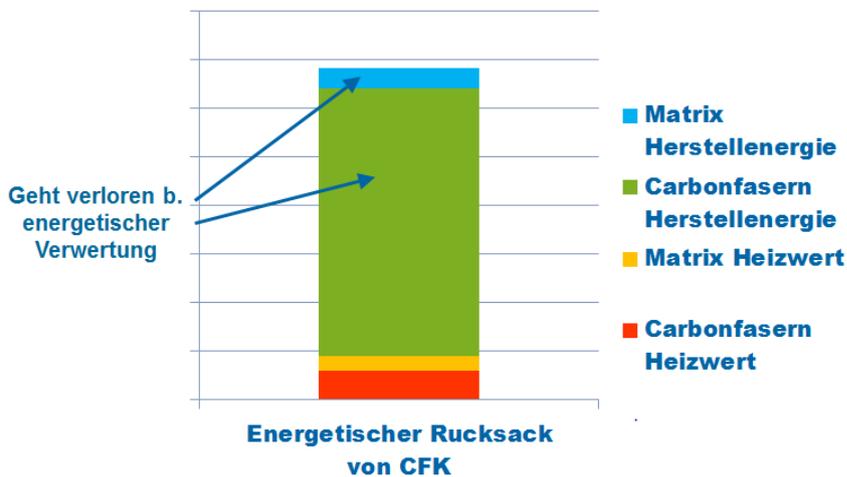
- Umschmelzen von CFK ohne Faserabtrennung: Diese Verfahren sind nur im Falle thermoplastischer (schmelzbarer) Matrixkunststoffe geeignet. Die CFK werden ohne oder mit vorheriger Zerkleinerung erhitzt. Dadurch schmilzt der Matrixkunststoff und eine neue Formgebung ist möglich. Auch diese Verfahren haben das Potenzial, die Fasereigenschaften auf hohem Niveau zu erhalten und zu nutzen. Schon aufgrund des Marktanteils thermoplastischer Matrixkunststoffe in CFK sind sie mengenmäßig noch unbedeutend.
- Feinmahlen von CFK und direkter Wiedereinsatz: Durch die Vermahlung entsteht ein feinkörniges Gemisch von Carbonfasern und Matrixkunststoffen, das als Füllstoff für Kunststoffprodukte eingesetzt werden kann. Die Fasereigenschaften bleiben nur eingeschränkt nutzbar (v.a. Leitfähigkeit und Dichte, aber auch Festigkeitsparameter). Das Mahlen von CFK-Materialien ist eine gängige, bereits praktizierte Recyclingtechnik. Das durch diese Technik hergestellte Pulver wird als Füllstoff in BMC (bulk molding compound)- und SMC (sheet molding compound)- Formmassen verwendet.⁷
⁸ Zum jetzigen Zeitpunkt ist dieses Verfahren der einfachste Weg ausgediente CFK – Werkstoffe wieder zu verwenden.
- Energetische Verwertung von CFK: Die CFK werden verbrannt und so zur Erzeugung thermischer oder elektrischer Energie genutzt. Auf diese Weise ist der Heizwert der CFK nutzbar. Der viel größere Prozessenergieaufwand zur Herstellung des Matrixkunststoffs, vor allem der Carbonfasern geht jedoch vollständig verloren. Während die Matrixkunststoffe in üblichen Müllverbrennungsanlagen problemlos zerstört werden, sind zur Verbrennung der Carbonfasern wesentlich höhere Temperaturen bzw. Verweilzeiten erforderlich. Durch ihr geringes spezifisches Gewicht gehen die Fasern zudem leicht in den Flugstaub der Verbrennungsanlagen über und sie sind auch in der Schlacke zu finden. Geraten sie in den Rauchgasstrom, dann können sie insbesondere aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit erhebliche Probleme in Filteranlagen mit Elektrofiltern verursachen. Sie können zwar mittels Gewebefilter aus den Rauchgasen entfernt werden; hier besteht allerdings die Gefahr, dass die Filter verstopfen.⁹

⁷ Schinner, G., J. Brandt, and H. Richter. "Recycling Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites." *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 9.3 (1996): 239-45.

⁸ Pannkoke, Kord, Marcus Oethe, and Jurgen Busse. "Efficient Prepreg Recycling at Low Temperatures." *Cryogenics* 38.1 (1998): 155-9.

⁹ Friedrich Klaus, *Vortragstexte der Tagung Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, DGM Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt 1997*

Die folgende Abbildung zeigt näherungsweise die Anteile von Heizwert einerseits und Prozess- bzw. Herstellerenergie andererseits an der Energiebilanz der Erzeugung von Matrixkunststoffen und Carbonfasern.



=> **Größtes ökologisches Potenzial: Recycling der Carbonfasern**

Abbildung 4-1: Bedeutung des Recycling der Carbonfasern für die Ökobilanz von CFK, dargestellt anhand des energetischen Rucksacks.

Die Darstellung zeigt, wie groß die Bedeutung des Recyclings der Carbonfasern für die Ökobilanz von CFK schon dann ist, wenn ausschließlich energiebedingte Umweltwirkungen betrachtet werden. Die Verwertung von CFK mittels Freilegung und Weiterverarbeitung der Carbonfasern waren nicht zuletzt deshalb Gegenstand des Projektes MAI Recycling.

4.3 Verfahren zur Freilegung von Carbonfasern aus CFK (Stand bei Projektbeginn)

Zu Beginn der Projektarbeiten waren zu dieser Art der Verwertung verschiedene Ansätze in der Literatur beschrieben:

Pyrolyseverfahren

Die Verfahrensgrundlage der Pyrolyse ist die Zersetzung langkettiger Polymere in einer inerten Atmosphäre. In der Literatur werden solche Verfahren auch als Entgasung, Schwelung oder trockene Destillation bezeichnet. Ist die Pyrolysetemperatur ausreichend hoch gewählt, zerfallen langkettige Polymere in kurz-kettige, meist gasförmige Bruchstücke. Die Zusammensetzung der Endprodukte ist abhängig von den Ausgangsstoffen, der Reaktionstemperatur und -dauer.¹⁰ In Abhängigkeit von der gewählten Pyrolysetemperatur bleiben anorganische Bestandteile wie zum Beispiel Metalle, Glas, Mineralien und Kohlenstoff weitgehend

¹⁰ Tötze Mathias, *Dissertation: Untersuchungen zum Recycling von Carbonfaserverstärkte Kunststoffen durch Depolymerisation im Metallbad*, Weißensee Verlag, Berlin 2005

unverändert. Die Pyrolyse ist daher sehr gut geeignet, um wertvolle nicht organische Stoffe aus Verbunden mit organischen Materialien abzutrennen. Da die Pyrolyse von CFK aufgrund der Nutzung der Kunststoffmatrix als Energielieferant grundsätzlich energieautark durchgeführt werden kann und gleichzeitig die verbleibende Faser einen hohen Materialwert besitzt, bietet dieses Verfahren gute Aussichten für ein wirtschaftliches Carbonfaserrecycling.

Die Universität Dortmund hat Carbonfilamente in einer Schutzgasatmosphäre auf 270°C bis 750°C erhitzt und nachgewiesen, dass ihre Festigkeiten mit zunehmender Behandlungstemperatur und -dauer abnehmen. Dieser Effekt verstärkte sich wenn das Erhitzen unter Einfluss von Luft durchgeführt wird. Aus diesem Grund müssen eine unkontrollierte Sauerstoffzufuhr sowie zu hohe Temperaturen vermieden werden.¹¹

An der University of Missouri wurden Versuche in einer Argon-Atmosphäre bei Temperaturen zwischen 500°C - 650°C durchgeführt. Bei einem 50 %-igen Recyclingfaseranteil im Verbund wurde eine Verringerung der Verstärkungswirkung der eingebetteten Fasern um 30 % im Vergleich zur Neufaser beobachtet. Die Projektverantwortlichen führen dies in erster Linie auf die Verkürzung der Faserlängen, nicht aber auf eine Beeinträchtigung der Fasereigenschaften zurück.

An der University of Chicago wurde wahlweise Argon oder Stickstoff als Pyrolysemedium verwendet. Die Reaktionstemperaturen lagen zwischen 670°C und 815°C. Die Autoren favorisieren eine Temperatur von 670°C bei einer Verweilzeit von 10 Minuten. Unter diesen Voraussetzungen wurde die Zugfestigkeit auf ein Drittel des ursprünglichen Wertes reduziert. Das E-Modul hingegen blieb erhalten.

An der Universität Erlangen wurden Versuche mit einem breiten Temperaturspektrum (350°C – 700°C) mit Stickstoff als Pyrolysemedium durchgeführt. Den Autoren zufolge sollte eine Mindesttemperatur von 350°C eingehalten werden, um eine vertretbare Zersetzungsgeschwindigkeit zu gewährleisten. Im Vergleich zur Neufaser verringerte sich dabei die Zugfestigkeit der eingebetteten Fasern auf etwa 60 %.

Bei Untersuchungen im großtechnischen Maßstab an der TU Hamburg Harburg wurde eine Atmosphäre verwendet, die aus den Rauchgasen des Pyrolysevorgangs bestand. In Laborversuchen wurde jedoch auf das Gas Argon zurückgegriffen. Die Temperaturen bewegten sich zwischen 450°C und 600°C bei einer Verweilzeit von 60 Minuten. Einzelfasermessungen zeigten, dass die Festigkeit bis 500°C Behandlungstemperatur erhalten bleibt, darüber hinaus jedoch wesentlich abfällt. In Bezug auf großtechnische Prozessbedingungen wurden keine Empfehlungen ausgesprochen, da die Fasern Harzrückstände aufwiesen und die Verweildauer noch nicht optimiert war.¹² In einer weiteren Arbeit wurden Versuche mittels TGA

¹¹ Friedrich Klaus, *Vortragstexte der Tagung Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*, DGM Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt 1997

¹² Tötze Mathias, *Dissertation: Untersuchungen zum Recycling von Carbonfaserverstärkte Kunststoffen durch Depolymerisation im Metallbad*, Weißensee Verlag, Berlin 2005

in Luft und N₂-Atmosphäre durchgeführt.¹³ Es zeigte sich, dass in der inerten Atmosphäre unabhängig von der Prozesstemperatur stets Pyrolyserückstände erhalten bleiben und keine vollständige Freilegung der Fasern erfolgt. In Luft wird bei bis zu 600°C und angemessener Verweilzeit (z. B. 120 Minuten bei 500°C) die Matrix vollständig entfernt. Allerdings kann dabei eine Schädigung der Faseroberfläche auftreten.

An der Universität Nottingham wurden umfangreiche Versuche mit der Pyrolyse im Wirbelschichtreaktor durchgeführt. Die Zugfestigkeit der Carbonfasern wurde bei 50°C um 25 % reduziert. Ein Vorteil des Verfahrens ist nach Angaben der Bearbeiter, dass es auch zur Aufbereitung von CFK mit höheren Anteilen an Fremdstoffen wie z.B. Metallen geeignet sei.¹⁴

Mikrowellenbehandlung

Im Falle der Mikrowellenbehandlung wird das CFK-Material z.B. für ca. 8 Sekunden einer Leistung von 3 kW ausgesetzt, um die Fasern aus dem Verbund zu lösen.¹⁵ In diesem Prozess werden die Werkstoffe von innen nach außen erwärmt.

Solvolyse

Das Grundprinzip der Solvolyse beruht darauf, dass die Matrixkunststoffe mit Hilfe eines Reaktionsmittels in der Flüssigphase in kurzkettinge Fragmente zerlegt werden. Die Umsetzung mit Wasser als Medium wird als Hydrolyse und der Einsatz von Methanol als Methanolyse bezeichnet. Als Medium werden meist Wasser, aber auch Alkohole oder andere organische Verbindungen eingesetzt, vielfach in Kombination mit anderen Zusätzen, etwa auch Säuren oder Basen.¹⁶ Die Abbauprozesse werden durch Einsatz von Katalysatoren beschleunigt. Die Fasern werden im Anschluss typischerweise mit Wasser gespült. Zum Abbau der Matrixkunststoffe sind zusätzlich erhöhte Temperaturen und Drucke erforderlich. Im Falle thermoplastischer Matrixkunststoffe ist eine Zersetzung der Moleküle nicht erforderlich; diese können in der Solvolyse vielmehr mit geeigneten Lösungsmitteln in Lösung gebracht und so von den Carbonfasern abgetrennt und nachher wieder ausgefällt und erneut verwendet werden. Der Projektpartner Siemens AG untersuchte Solvolyseprozesse im Rahmen des Projektes MAI-Recycling detailliert.

Überkritische Fluide

¹³ L. O. Meyer, K. Schulte, E. Grove-Nielsen; *CFRP-Recycling Following a Pyrolysis Route: Process Optimization and Potentials*, *Journal of Composite Materials* 43 (2009) 1121-1132;

¹⁴ Pickering, S.J., *Recycling Technologies for thermoset composite materials – current status*. *Composites Part A* (2006) 1206-1215

¹⁵ Lester, Edward, et al. "Microwave Heating as a Means for Carbon Fibre Recovery from Polymer Composites: A Technical Feasibility Study." *Materials Research Bulletin* 39.10 (2004): 1549-56.

¹⁶ Jody, B. J., et al. "A Process to Recover Carbon Fibers from Polymer-Matrix Composites in End-of-Life Vehicles." *The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), JOM* 56.8 (2004): 43.

Die Universität von Nottingham erforschte die Verwendung von überkritischem Propanol zur Zersetzung des Epoxidharzes bei Temperaturen über 450°C und Drücken über 50 bar.¹⁷ Mit Hilfe dieses Prozesses ist es möglich, im Wesentlichen sehr saubere Fasern ohne Harzrückstände zu erhalten.

Katalytische Umwandlung

Die Adherent Technologies Inc. (Albuquerque, New Mexico), ein Mitglied von AFRA (Aircraft Fleet Recycling Association), gewinnt Carbonfasern aus Verbundsystemen mit Hilfe eines Depolymerisations-Katalysators. Der Matrixkunststoff wird bei niedrigen Temperaturen (ca. 150°C) und niedrigen Drücken (ca. 10 bar) in niedermolekulare Kohlenwasserstoffe zerlegt. Die Forscher schlagen vor, die dabei erhaltenen Kohlenwasserstoffe als Treibstoffe, Monomere für Aufbaureaktionen oder Chemikalien wieder zu verwenden.¹⁸ Die Oberflächenfunktionalität der Fasern war mit der der Ursprungsfaser vergleichbar. Im Vergleich zur Ursprungsfaser weist die recycelte Faser aber lediglich 61 % der Zugfestigkeit auf.¹⁹

Elektrodynamische Fragmentierung

Für das Recycling von Altbeton wird das Verfahren der elektrodynamischen Fragmentierung eingesetzt. Dabei wird durch Aufbringen von Hochstromimpulsen das Material entlang seiner Phasengrenzen in seine Bestandteile zerlegt. Erste Vorversuche des am Projekt MAI Recycling beteiligten Fraunhofer Instituts IBP hatten vielversprechende Ergebnisse auch bei der Freilegung von Carbonfasern aus CFK gezeigt.

Salzbäder

Auch mit Hilfe geschmolzenen Salzes ist es möglich, Carbonfasern aus der Polymermatrix heraus zu lösen. Die Salzbäder haben Temperaturen von 400 bis 600°C²⁰. Dieser Forschungsbereich stellte einen Teil des Recycomp Projektes (Frankreich) dar, welches vor allem glasfaserbasierte Verbundabfälle mit duroplastischen Polymermatrizen untersuchte.

Thermoschock-Behandlung

Zur Thermoschock-Behandlung werden die CFK-Platten in flüssigen Stickstoff getaucht und anschließend in kochendes Wasser gelegt²¹. Auf diese Weise sollen die unterschiedlichen

¹⁷ Hyde, Jason R., et al. "Supercritical Propanol, a Possible Route to Composite Carbon Fibre Recovery: A Viability Study." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37.11 (2006): 2171-5.

¹⁸ Allred, Ronald E., Andrew B. Coons and Robert J. Simonson. "Properties of Carbon Fibers Reclaimed from Composite Manufacturing Scrap by Tertiary Recycling." *Proceedings of the 1996 28th International SAMPE; Technical Conference*. Nov 4-7 1996.

¹⁹ Connor, M., B. Allen and J. Heil. "Recycled Carbon Fiber Analysis: Mechanical Properties." *SAMPE Fall Technical Conference Proceedings: Global Advances in Materials and Process Engineering*. Dallas, TX, November 6-9, 2006.

²⁰ Recycomp. "Recycling technology for composites based on molten salts." *Omnexus*. 2006, www.omnexus.com/resources/innovation/news.aspx?id=12052.

²¹ Jody, B. J., et al. "A Process to Recover Carbon Fibers from Polymer-Matrix Composites in End-of-Life Vehicles." *The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), JOM* 56.8 (2004): 43.

thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Matrixkunststoffs und der Carbonfasern ausgenutzt werden. Allerdings konnte mit dieser Technik kein ausreichender Trenneffekt erzielt werden.

4.4 Kommerziell eingesetzte Recyclingverfahren

4.4.1 Recycling –Center Stade, BRD

Die CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG wurde im Februar 2007 gegründet. Sie ist eine 100%ige Tochterfirma der Karl Meyer AG aus Wischhafen/Elbe. Als Forschungs- und Entwicklungsprojekt entstand bis 2010 am Standort Stade bei Hamburg ein CFK Recycling Center mit einer Anlage, in der großtechnisch anfallende kohlestofffaserhaltige Abfälle stofflich recycelt werden sollen. Ziel war, das Problem der Entsorgung von CFK-Material zu lösen und einen C-Faser-Sekundärrohstoff herzustellen, der neue Wertschöpfungspotenziale bietet. Dazu werden kohlefaserhaltige Produktionsabfälle, Fehlchargen sowie End-of-Life-Bauteile angenommen. Diese werden in einem händischen Sortier- und Aufbereitungsprozess für den Recyclingablauf vorbehandelt. Im Anschluss werden die C-Fasern mittels eines Pyrolyseverfahrens im Chargenofen zurückgewonnen. Dann werden die freigelegten Carbonfasern gereinigt und zerkleinert. Als Kurz- oder Stapelfasern können diese Fasern wieder am Markt angeboten werden. Auf der Messe K 2010 in Düsseldorf präsentierte die CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG die neu gegründete Schwestergesellschaft carboNXT GmbH, die seither die Vertriebsaufgaben für die recycelten Kohlestofffasern übernimmt. Das vertriebene Produkt trägt wie das Unternehmen den Namen carboNXT und wird in den Varianten „milled“ (gemahlen) und „chopped“ (geschnitten) angeboten.

4.4.2 ELG Carbon Fibre Ltd., Großbritannien

Die Recycled Carbon Fibre Ltd. hat beginnend in 2003 ein kontinuierliches Recyclingverfahren für CFK-Werkstoffe entwickelt. Nach der Übernahme durch die Duisburger ELG Haniel GmbH firmiert sie heute unter dem Namen ELG Carbon Fibre Ltd.

Das Unternehmen betreibt heute eine Pyrolyseanlage mit einer Kapazität von ca. 2.000 Tonnen Carbonfaserabfällen pro Jahr.

Das Unternehmen bietet eine Reihe von hochwertigen Recycling–Carbonfaser–Produkten als Green Carbon Fibre Markenprodukte an.²² Wichtige Produkte sind chopped fibres in Standard-Faserlängen von 6-12 mm und milled fibres in mittleren Faserlängen von 80 und 100 µm. Weitere Produkte befinden sich in der Entwicklung.

²² www.recycledcarbonfibre.com/

4.5 Patentsituation

Im Rahmen einer Literaturrecherche zu Beginn des Projektes MAI Recycling wurde durch SGL Carbon eine Analyse der Patentlandschaft zum CFK Recycling durchgeführt. Insgesamt wurden 46 relevante Patente (bzw. Patentfamilien) gefunden und bewertet.

- 20 Patentanmeldungen betrafen die Pyrolyse, 8 die Solvolyse, 5 eine mechanische Bearbeitung und 13 andere Methoden; insgesamt 8 Anmeldungen stammten aus Deutschland, 26 von japanischen Erfindern
- Insgesamt waren 14 Patente erteilt (8 für Pyrolysemethoden, 3 für mechanische Aufbereitung), 8 für Solvolyse, davon 4 auch mit Relevanz auf Deutschland/Europa (1 Patent wurde von der SGL Group gehalten)
- Eine rechtliche Einschränkung der im MAI - Carbon Cluster geplanten Entwicklungs- und Forschungsaktivitäten durch Schutzrechte war nach Textanalyse nicht gegeben

Im Bearbeitungszeitraum wurde eine Patentrecherche durchgeführt, die sich auf die Aufbereitung und Konditionierung von freigelegten Fasern konzentriert. Hier wurden zwei relevante Patente identifiziert, die jedoch für die Projektarbeiten keine rechtliche Einschränkung darstellten.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Vorhabens wurde über die Kooperation mit den Projektpartnern und dem MAI Carbon Clustermanagement sowie im Rahmen von MAI Carbon Veranstaltungen hinaus in vielfältiger Weise mit anderen Stellen zusammengearbeitet:

- Andere MAI-Projekte
 - Mit Partnern des Projektes **MAI POP** wurden im Rahmen einer Arbeitssitzung Anforderungen an die Erfassung von CFK-Materialien und Faser-Verschnittmaterial diskutiert und eine einheitliche Vorgabe zur Erfassung von Verbundmaterialien und Verschnitten erstellt.
 - Mit dem Projektkoordinator von **MAI Zfp** wurde im Rahmen einer Arbeitssitzung über die Möglichkeiten und Anforderungen bei der Prüfung und Charakterisierung von Carbonfasern und CFK-Materialien diskutiert.
 - Mit Partnern des Projektes **MAI Plast** wurde ein Vernetzungstreffen zum Wissens- und Erfahrungsaustausch durchgeführt.
- Unternehmen
 - **ELG Carbon Fibre Ltd., Coseley**: Das Unternehmen bereitete im Rahmen eines Großversuchs ca. 3 t CFK-Abfälle in seiner Pyrolyseanlage auf, ferner war es an der Analyse von Möglichkeit zur Anbindung einer CFK-Pyrolyseanlage an eine Müllverbrennungsanlage und an Diskussionen zum CFK-Recyclingmarkt intensiv beteiligt.

- **Gemeinsames Kommunalunternehmen für Abfallwirtschaft Geiselbullach (GfA):** Die GfA fungierte als exemplarischer Standort zur Analyse der Anbindung einer CFK-Pyrolyseanlage an eine Müllverbrennungsanlage. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene technische Optionen gemeinsam durchgespielt und diskutiert.
- **Kreisabfallwirtschaftsbetrieb des Landkreises Günzburg:** In mehreren Arbeitssitzungen wurde die Umrüstung der dort in Betrieb befindlichen Müllpyrolyseanlage zur Verarbeitung von CFK-Abfällen sowie die Einbindung der Müllpyrolyseanlage in einen Großversuch diskutiert.
- **Erdwisch Zerkleinerungssysteme GmbH, Kaufering:** Bei Erdwisch wurden mehrere Versuche zur Zerkleinerung von CFK-Abfällen durchgeführt und diskutiert und im Rahmen eines Großversuchs ca. 3 t CFK-Abfälle für die Pyrolyse vorzerkleinert.
- **Lober GmbH & Co. KG, Neunburg vorm Wald:** Bei Lober wurden Versuche zur Zerkleinerung von CFK-Abfällen mit Hilfe einer Rotorschere der Firma MeWa sowie einer Schneidmühle durchgeführt.
- **Trenso Technik Trenn- und Sortiertechnik GmbH, Weißenhorn:** Bei der Trenso wurde im Rahmen des Großversuchs etwa eine Tonne an vorzerkleinerten CFK-Abfällen gesiebt, ferner wurden Versuche zur Aufreinigung freigelegter Carbonfasern mit verschiedenen Sieb- und Sichteverfahren durchgeführt und diskutiert.
- **Hamos GmbH, Penzberg:** Bei Hamos wurden Versuche zur Aufreinigung freigelegter Carbonfasern mittels Corona-Walzenscheider durchgeführt und diskutiert.
- **Hosokawa Alpine AG, Augsburg:** Bei Hosokawa wurden Versuche zur Zerkleinerung und Aufreinigung freigelegter Carbonfasern durchgeführt und diskutiert.
- **Neidhardt GmbH, Memmingen:** Bei Neidhardt wurden Versuche zum Schneiden freigelegter Carbonfasern mit Hilfe des Pierret-Aggregats durchgeführt.
- **Wipag Deutschland GmbH & Co. KG, Neuburg:** Bei WIPAG wurden im Rahmen eines Großversuchs freigelegte Carbonfasern auf Zielfaserlängen geschnitten und Versuche zur Verarbeitung freigelegter Carbonfasern zu Carbon Compounds durchgeführt.
- **CFK Valley Stade Recycling GmbH Co. KG / CarboNXT:** Mit den Unternehmen wurde das zu erwartende Mengenaufkommen an carbonfaserhaltigen Abfällen sowie die technische Ausgestaltung von Recyclingprozessen diskutiert

- **Pyrum Innovations ESC GmbH, Dillingen/Saar:** An der Altreifenpyrolyseversuchsanlage der Firma Pyrum wurden Pyrolyseversuch mit CFK-Abfällen durchgeführt.
- **Autefa Solutions Germany GmbH, Friedberg:** Bei der Autefa wurde ein Verarbeitungsversuch mit freigelegten Carbonfasern durchgeführt.
- **Reso GmbH & Co. KG, Mering:** Bei Reso wurde ein Verarbeitungsversuch mit freigelegten Carbonfasern durchgeführt.
- Institute
 - Am **Fraunhofer IPA-Institut (IfW), Stuttgart** wurde im Rahmen einer Arbeitssitzung das Thema „Absaugtechniken und Schutzmaßnahmen“ behandelt.
 - Am **Helmholtz-Zentrum München** wurde eine Thermoanalyse-Flugzeitmassenspektrometrie mit CFK-Material durchgeführt.
 - An der **Universität Augsburg** wurden TGA-Analysen durchgeführt.

6. Erzielte Ergebnisse

6.1 Projektkoordination

In der Funktion des Projektkoordinators unterstützte das bifa den Informationsaustausch zwischen den Projektpartnern und organisierte die Strukturen für den Austausch und die Zusammenarbeit in Form von Arbeitstreffen und vertiefenden Workshops. Für diese Treffen wurde die Vor- und Nachbereitung (Dokumentation der Veranstaltungen) sowie die Moderation von bifa übernommen. bifa unterstützte die gemeinsame Arbeit im Rahmen dieser Veranstaltungen mit dem Einsatz von Workshop- und Kreativitätstechniken.

Generell wurden alle drei Monate Arbeitstreffen mit allen beteiligten Projektpartnern durchgeführt. Der Stand in den einzelnen Arbeitspaketen wurde besprochen – auch in Bezug auf den festgelegten Zeitplan – und Probleme und Lösungsansätze diskutiert. Es erfolgten in diesem Rahmen zudem organisatorische sowie den weiteren Projektfortschritt betreffende Abstimmungen.

Um den Austausch zwischen den Partnern im Sinne eines effizienten Wissensmanagements zu fördern und den Innovationstransfer innerhalb von MAI Recycling zu unterstützen, fungierte bifa als Knotenpunkt zwischen den Verbundpartnern und wurde als Ansprechpartner für Abstimmungen und aktuelle Fragen von den Partnern aktiv genutzt. Durch regelmäßigen Kontakt mit den Projektpartnern und die Distribution von relevanten Informationen sowohl von Seiten des Fördermittelgebers und des Clustermanagements als auch von Seiten der Partner sorgte bifa dafür, dass der Informationsfluss innerhalb von MAI Recycling gewährleistet war und eine Zusammenführung der Daten für die projektübergreifende Kooperationsarbeit erfolgte.

Im Hinblick auf eine themenspezifische Vernetzung wurden von bifa verschiedene Arbeitstreffen mit einzelnen MAI Recycling Partnern und anderen relevanten Unternehmen organisiert und durchgeführt. Spezifische Probleme wurden diskutiert und Kontakte zu potenziellen externen Partnern, Technologieanbietern und Auftraggebern vermittelt oder angestoßen.

Zur Abstimmung mit dem Clustermanagement beteiligte sich bifa u.a. an den Projektkoordinatoren-Treffen und den MAI Carbon Projektforen.

6.1.1 Arbeitstreffen und Workshops (in chronologischer Reihenfolge)

Erstes Projekttreffen

Aufgrund des ursprünglich geplanten Projektstarts zum 01. Juni 2012 wurde für den 11. Juni das erste Projekttreffen geplant und auch trotz geändertem Projektstarttermin durchgeführt. Bei diesem Treffen am bifa stand das gegenseitige Kennenlernen sowohl der Beteiligten als auch der Inhalte und Ziele der einzelnen Teilvorhaben im Vordergrund, um eine fundierte Basis für die gemeinsame Arbeit zu schaffen. Es wurden die Erwartungen der Projektbeteiligten an das Verbundprojekt und die Projektkoordination in Erfahrung gebracht, sowie die Schnittstellen zwischen den einzelnen Teilprojekten definiert. Bezogen auf die Arbeitspakete wurden die beteiligten Unternehmen zugeordnet und der jeweils hauptverantwortliche Partner festgelegt.

Kick-off-Meeting

Die offizielle Auftaktveranstaltung fand am 25. Juli 2012 am bifa in Augsburg statt. Teilnehmer waren Frau Dr. Nutz und Herr Dr. Bücken vom Projektträger Jülich, Herr von Reden und Herr Kehle vom Clustermanagement, Vertreter der inno-focus businessconsulting GmbH sowie Vertreter aller MAI-Recycling-Projektpartner.

Inhalte waren Informationen des Projektträgers Jülich zum Berichtswesen und Zahlungsverkehr, die Vorstellung der Teilvorhaben, Informationen des Clustermanagements zu seinen Aufgaben, zum Aufbau und den Zielen des Clusters sowie zu organisatorischen Punkten. Abschließend wurden die Funktionen der Plattform MAI Carbon Now vorgestellt und Sicherheitsfragen zum Austausch und Speichern von Projektdaten diskutiert.

1. Arbeitstreffen

Das erste Arbeitstreffen fand am 17. Oktober 2012 in Valley beim Fraunhofer Institut für Bauphysik statt. Neben der Darstellung des aktuellen Arbeitsstands war die Vernetzung mit MAI Plast ein zentrales Thema. Dazu war die Projektkoordination von MAI Plast zum Arbeitstreffen eingeladen. Ziel war es, Schnittstellen mit diesem Projekt zu identifizieren und innerhalb von MAI Carbon den Austausch zu fördern. Nach der Vorstellung der Inhalte und Ziele von MAI Plast wurde in der Diskussion beschlossen, ein eigenes „Vernetzungstreffen“ zwischen diesen beiden MAI-Projekten am bifa zu organisieren.

Vernetzung „MAI Recycling - MAI Plast“

Zur Intensivierung des Austauschs zwischen den Projekten MAI Recycling und MAI Plast wurde am 15. Januar 2013 am bifa ein Vernetzungstreffen durchgeführt. Beteiligt waren alle interessierten Partner der beiden MAI Carbon-Projekte. Für alle Beteiligten stellte nach deren Auskunft der Austausch einen wertvollen Gewinn an Wissen dar.

2. Arbeitstreffen

Am 24. Januar 2013 fand bei der Audi AG in Ingolstadt das zweite Arbeitstreffen statt. Im Rahmen einer Gruppenarbeit wurden geeignete Systematisierungskriterien zur Bewertung der Verfahrensvarianten erarbeitet. Zu den „technischen“, „wirtschaftlichen“ und „ökologischen“ Oberzielen wurden Unterziele skizziert und Systematisierungskriterien, unterteilt in die Bereiche Freilegungsprozess und Wiederverwertungsmöglichkeiten, erarbeitet.

Workshop Fertigung Probenkörper- und Versuchsmuster mit rCF

Im Februar 2013 hatte die Fa. Voith Abstimmungsbedarf in Bezug auf AP 3.3 signalisiert. Aus diesem Grund trafen sich die an diesem Arbeitspaket Beteiligten am 14. März 2013 am bifa. Besprochen wurden u.a. der Materialbedarf für die durchzuführenden Versuche sowie die Verarbeitungs- und Prüfmöglichkeiten in den einzelnen Unternehmen.

Außerdem wurde bei der Besprechung ein Verfahrensraster entwickelt, in dessen Rahmen die Freilegungs- und Verarbeitungs-Techniken dargestellt und anhand der festgelegten „Systematisierungskriterien“ beurteilt werden konnten.

3. Arbeitstreffen

Am 17. April 2013 fand bei der Fa. SGL Carbon in Meitingen das dritte Arbeitstreffen statt. Bei der Veranstaltung wurde, gegliedert nach Arbeitspaketen, der Stand im Projekt besprochen, der Austausch von Material und Daten abgestimmt und die Zusammenarbeit an den Schnittstellen diskutiert. Daneben wurden Termine abgestimmt und die Ergebnisse des „Projektbarometers“ erläutert.

Vernetzung „MAI Recycling - MAI Pop“

Im Rahmen einer Zusammenarbeit der beiden Projekte MAI Recycling und MAI Pop wurden am 26. Juni 2013 bei der Fa. Voith, Garching, die Anforderungen an die Erfassung von CfK-Materialien und Faser-Verschnittmaterial diskutiert. Es wurde eine einheitliche Vorgabe zur Erfassung von Verbundmaterialien und Verschnitten erstellt, damit diese anschließend gezielter den Aufbereitungsprozessen zugeführt werden können. Dazu wurden mit MAI Pop die Handhabung bzw. Sammlung vor Ort und die Logistik abgestimmt.

Bewertung der Verfahren – Lastenheft zur Technologieentwicklung

Als übergeordneter Meilenstein sollte Ende Juni 2013 unter anderem ein Assessment der Freilegungskonzepte erfolgen. Zur gemeinsamen Bewertung der Verfahren anhand der erarbeiteten Systematisierungskriterien trafen sich deshalb am 28. Juni 2013 bifa, Siemens und

IBP bei SGL in Meitingen. In dem Workshop wurden die im Projekttreffen im Februar 2013 erarbeiteten Bewertungskriterien zur technischen, ökonomischen und ökologischen Beurteilung der Verfahrensvarianten von Recyclingprozessen diskutiert und eine Gewichtung festgelegt.

Abstimmungsgespräch SGL und bifa Umweltinstitut

Am 04. Juli 2013 erfolgte am bifa Umweltinstitut ein Abstimmungsgespräch zwischen SGL und bifa zu folgenden Themen:

- Materialbedarf für Aufbereitungsversuche (Art und Menge)
- Durchzuführende Versuche und Versuchsplanung, intern und extern
- Diskussion und Abstimmung von über die Projektinhalte hinausgehendem Forschungsbedarf

Austausch mit CFK Valley Stade Recycling GmbH Co. KG

Am 04. Juli 2013 trafen sich Herr Dr. Fischer (SGL Carbon), Frau Gottlieb und Herr Hartleitner (bifa Umweltinstitut) mit Herrn Rademacker (CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG und CarboNXT) am bifa Umweltinstitut. Es wurde über die bereits seit langem laufenden Abstimmungen und eine engere Zusammenarbeit von MAI Recycling mit Stade diskutiert. (Bereits am 29.04.2011 fanden am bifa Gespräche bezüglich einer Allianz in der End-of-Life-Logistik und Aufbereitung statt.)

Zentrale Themen waren das zu erwartende Mengenaufkommen an carbonfaserhaltigen Abfällen sowie die technische Ausgestaltung der Recyclingprozesse. Während in Stade überwiegend sehr hochwertige CFK-Reststoffe verarbeitet werden, war MAI Recycling auf Mischmaterialien konzentriert, die in einer inhomogenen Mischung von Produktionsausschuss, Produktionsverschnitt oder als End of Life-Produkte anfallen. Wünschenswert wären Kooperationsansätze und gemeinsame Entwicklungen in Bereichen, in welchen ein weiterer Absatz (über die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Halbzeuge hinaus) von recycelten Fasern am Markt direkt unterstützt wird. Insbesondere sind laut Hr. Rademacker am Markt nach wie vor Vorbehalte gegenüber recycelten Fasern spürbar. Im Verbund mit geeigneten Partnern könnte verstärkt der Zugang zu Anwendungen gefunden und Vorbehalte gegenüber Sekundärware beseitigt werden.

Teilnahme an der Arbeitsgruppe „Absaugtechniken und Schutzmaßnahmen“

Am 10. Juli 2013 fand am Fraunhofer IPA-Institut (IfW), Stuttgart, eine Arbeitssitzung statt, bei der das Thema „Absaugtechniken und Schutzmaßnahmen“ anhand eines Impulsvortrages von Herrn Andreas Gebhard, IPA, vorgestellt wurde. Es wurden insbesondere die Unklarheit hinsichtlich des Gefährdungspotenzials und die Herausforderungen aus Sicht der Industrie diskutiert. Dabei wurden fünf Problemkreise festgeschrieben: fehlende Literatur, Bauteilhandhabung, automatisierte Reinigung, Einfluss von Werkzeug und Prozess auf Späne und Absaugeigenschaften und handgeführte Werkzeuge.

4. Arbeitstreffen und Vernetzung mit MAI ZfP

Am 18. Juli 2013 fand bei Voith in Garching das vierte Arbeitstreffen statt. Den Projektpartnern wurden die vom bifa Umweltinstitut zusammengestellten Prüf- und Verarbeitungsmöglichkeiten sowie eine Zusammenstellung relevanter Patente an die Hand gegeben. Es folgten Informationen zum Projektstand sowie anstehenden Terminen und es wurden aktuelle Entwicklungen, Fortschritte und Hindernisse dargestellt und diskutiert.

Hr. Dr. Markus Sause (Ansprechpartner des AMU - Anwenderzentrum für Material- und Umweltforschung der Universität Augsburg am Institut für Physik und Projektkoordinator von MAI Zfp) berichtete über die grundsätzlichen Möglichkeiten und Anforderungen bei der Prüfung und Charakterisierung von Carbonfasern und CFK-Materialien. Darüber hinaus stellte er die konkreten Möglichkeiten zur Messung und Analyse von Materialien am Institut dar.

Abstimmungsgespräch Kreisabfallwirtschaft Günzburg

Am 03. September 2013 traf sich bifa mit Herrn Schmid von der Kreisabfallwirtschaft Günzburg. Thema war der Status bezüglich der Überlegungen zur möglichen Schließung der MPA Burgau im Jahr 2015. Des Weiteren wurden der Zeitraum sowie die Rahmenbedingungen für den Großversuch diskutiert.

5. Arbeitstreffen

Das 5. Arbeitstreffen fand am 24. Oktober 2013 bei der BMW Group im BMW Recycling & Demontage Zentrum in Unterschleißheim statt. Zu Beginn wurden aktuelle Themen besprochen: Nach einer kurzen Diskussion des neuesten Projektbarometers gab es einen Erfahrungsaustausch bezüglich der Nutzung der Plattform „MAI Now“. Anschließend wurde der Abstimmungsprozess für die Freigabe von Artikeln reflektiert.

Des Weiteren wurde eine Diskussion zur Frage angeregt, welche Recyclingquote beim CFK-Recycling erreicht werden solle. Um systematisch einen Konsens zu finden, wurde beschlossen, mithilfe eines von bifa erstellten Templates eine Sammlung der erwarteten Verluste innerhalb der Prozesse durchzuführen. Im Rahmen von AP 4 wurde der Bedarf für einen Workshop zum Thema „Prozesskosteneinschätzung“ deutlich, der von Voith organisiert und durchgeführt wurde.

Workshop „Prozesskosten“

Im Workshop „Prozesskosten“, der am 28. November 2013 stattfand, wurde zusammen mit den Projektpartnern eine Matrix zur Beurteilung der verschiedenen Trennverfahren hinsichtlich Kosten-Nutzen-Aspekten des CFK-Recyclingprozesses erarbeitet. Hintergrund dafür war, dass eine spätere Realisierung des jeweiligen Recyclingprozesses nur dann wirtschaftlich sein kann, wenn die Summe der Kosten aus Sammlung, Aufbereitung, Veredelung und der allgemeinen Kosten den Erlös für das Sekundärmaterial deutlich unterschreitet.

Die Modellrechnung beinhaltet die bekannten Einflussfaktoren (Logistik-, Zerkleinerungs-, Demontagekosten, Kosten für verschiedenen Demontagekonzepte, spezifische Kosten für das

jeweilige Freilegungsverfahren) und die überschlägige Ermittlung stoffstrombezogener Wirtschaftlichkeitsfaktoren.

Treffen zur Abstimmung des Großversuchs an der MPA Burgau mit dem Kreisabfallwirtschaftsbetrieb Günzburg

In Vorbereitung des geplanten Großversuches fand im Februar 2014 ein Vororttermin mit dem Verantwortlichen der Kreislaufwirtschaftsbetriebe Günzburg, Herrn Schmid und den Verantwortlichen der MPA, statt. Ein Schwerpunkt der Diskussion waren Kosten und Durchführung des Vorhabens. Des Weiteren wurden die Rahmenbedingungen diskutiert. Als Ergebnis konnte festgehalten werden:

- Ausreichend Material für einen Großversuch ist vorhanden (ca. 5 t Mischmaterial)
- Für den Versuch wird das Material vorzerkleinert (10-50 mm) angeliefert

Die Kreisabfallwirtschaftsbetriebe Günzburg ermittelten im Nachgang des Treffen kaufmännisch die konkreten Kosten für den Großversuch, welche bifa im Anfang März 2014 mitgeteilt wurden.

6. Arbeitstreffen

Das Treffen fand am 13. Februar 2014 am bifa Umweltinstitut in Augsburg statt. Anwesend waren neben den Projektpartnern die Vorstände Herr Dr. Horn, Herr Prof. Heine und Herr Timm vom Spitzencluster MAI Carbon, sowie Vertreter des Projektträgers Jülich und des Clustermanagements. Das Clustermanagement gab einen Statusbericht und wies u.a. auf die anstehende Zwischenevaluierung des Clusters hin, die im Mai stattfinden sollte. Weitere Themen waren die Sonderausstellung im Deutschen Museum in München, die Plattform MAI 2.0 und Informationen zur „MAI Night“ für KMU. Neben der Vorstellung des aktuellen Bearbeitungsstands der AP wurden anstehende Aufgaben und Termine abgestimmt, das Projektbarometer Q4 2013 und die weitere Planung des Großversuchs an der MPA Burgau besprochen.

Treffen zur Vorbereitung des Großversuches an der MPA Burgau

Am 05. März 2014 trafen sich die Projektbearbeiter von Audi, SGL und Neenah Gessner am bifa. Die Teilnehmer wurden über Stand der Vorbereitungen des Großversuches informiert, der in KW 14 2014 an der Müllpyrolyseanlage Burgau stattfinden sollte. Die dabei anfallenden Kosten wurden vom Anlagenbetreiber mit ca. 45.000 € beziffert und lagen damit wesentlich höher als bei zuvor durchgeführten Versuchen. Die hohen Kosten wurden durch die zusätzlich anfallenden Reinigungskosten der Anlage nach der Versuchsdurchführung begründet. Als alternative Lösung schlug der Anlagenbetreiber einen Versuch im nicht gereinigten Ofen vor, hier sollten sich die Kosten auf ca. 15.000 € belaufen.

Der Anlagenbetreiber hatte zudem erstmals auf ein zusätzliches Kostenrisiko, durch erhöhten Selbstbehalt für die Versicherung der Anlage bei Versuchsdurchführung,

hingewiesen. Die Höhe des Selbstbehalts war damals von der Haftpflichtversicherung des Anlagenbetreibers noch nicht beziffert worden.

Das Versuchsmaterial für den Großversuch in Burgau sollte auf ca. 50 mm vorzerkleinert an die Anlage angeliefert werden.

7. Arbeitstreffen

Am 29. April 2014 fand bei der SGL Carbon GmbH in Meitingen das 7. Arbeitstreffen der Projektgruppe statt. Zu Beginn stellte Herr Bleischwitz von Fa. Voith Anpassungen ihres Teilprojektes (Entwicklung von Stapelfasergarn/Entwicklung Stretch Broken) vor. Im Rahmen des Projektes sollten mit der Fiber-Injection Moulding–Technik (FIM) RTM-Platten hergestellt, die -Verwertbarkeit und Verarbeitbarkeit von rC-Fasern betrachtet und Festigkeitswerte bestimmt werden. Ein Antrag zur Zieländerung war zu diesem Zeitpunkt bereits beim Projektträger Jülich eingereicht worden. Im Rahmen der Anpassung stellte Herr E. Förster, Geschäftsführender und Gesellschafter der Fa. Fiber Engineering, die FIM-Technik vor.

Innerhalb des Treffens wurde ein Workshop zur Verlustreduzierung im Recyclingprozess durchgeführt. Zudem wurden die für den Gutachterbesuch zur Zwischenevaluierung des Spitzenclusters (am 08. Mai 2014) erstellten Poster vorgestellt.

Gutachterbesuch

Am 7. und 8. Mai 2014 fand die Zwischenbegutachtung des Spitzenclusters MAI Carbon durch Fachgutachter statt. Am 8. Mai wurden den Gutachtern – nach der Präsentation der Clusterentwicklung – an neun Stationen die laufenden MAI Carbon Projekte präsentiert. MAI Recycling wurde von Herrn Dr. Kreibe (bifa) und Herrn Dr. Fischer (SGL) vertreten.

8. Arbeitstreffen

Das 8. Arbeitstreffen fand am 16. Juli 2014 bei der Neenah Gessner GmbH in Feldkirchen-Westerham statt. Teilnehmer waren alle Projektpartner, Herr von Reden (Clustermanagement) sowie Frau Dr. Wies vom Projektträger Jülich. Unter dem Punkt „Aktuelles“ wurde das letzte Projektbarometer vorgestellt und Herr von Reden berichtete über Wissenswertes aus dem Cluster.

Da sich inzwischen gezeigt hatte, dass der im Projekt geplante Großversuch an der MPA Burgau nicht realisierbar ist, stellte Herr Dr. Kreibe (bifa Umweltinstitut GmbH) den neuen Ansatz für das Teilprojekt des bifa vor: eine Machbarkeitsanalyse zu einem integrierten CFK-Verwertungszentrum (siehe AP 2.7). Die Zustimmung zu dem neuen Ansatz war bereits beim Projektträger Jülich beantragt worden. Seitens der Projektpartner wurden keine Einwände erhoben.

Im Rahmen eines Workshop-Elements wurde das Thema „Halbzeuge und Produkte aus rC-Fasern“ bearbeitet.

9. Arbeitstreffen

Am 27. November 2014 fand am bifa Umweltinstitut in Augsburg das 9. Projekttreffen im Rahmen des Kooperationsprojektes statt. Im aktuellen Teil wurde das Projektbarometer Q2 2014 vorgestellt und die Termine für die nächsten Projekttreffen festgelegt. Hauptarbeitspunkte waren die Diskussion der bisherigen Ergebnisse und vor allem das weitere Vorgehen in den Arbeitspaketen 3.3 – 3.6. Für die Öffentlichkeitsarbeit im Projekt wurde eine gemeinsame Präsentation erstellt, der alle Partner zustimmten.

10. Arbeitstreffen

Für das 10. Arbeitstreffen trafen sich die Projektpartner am 12. März 2015 bei der AUDI AG in Ingolstadt. Der Fokus dieses Treffens lag auf AP 3 und AP 4. Neben den Ergebnissen des Großversuchs sowie der Versuche der Partner zur Halbzeug-Herstellung bildeten die Diskussionen zu Arbeitspaket 4 einen Schwerpunkt: Von bifa wurde ein Prozessbaukasten zur stofflichen Verwertung von CFK bzw. C-Fasern sowie ein Bewertungsraster für Einzelprozesse vorgestellt und diskutiert. Des Weiteren wurde die Implementierung im industriellen Maßstab bearbeitet sowie die Vorgehensweise zur Wirtschaftlichkeitsabschätzung besprochen.

11. Arbeitstreffen

Das letzte Arbeitstreffen fand am 20. Mai 2015 in Valley beim Fraunhofer Institut für Bauphysik statt. Neben der Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse der abschließenden Arbeiten in Arbeitspaket 3 und 4 wurde die Gestaltung der Abschlussveranstaltung des Leitprojektes MAI Recycling im Juli besprochen. Zudem wurden die Inhalte und die Vorgehensweise zur Erstellung einer Abschlusspräsentation zum Gesamtprojekt sowie Veröffentlichungen in der Fachpresse diskutiert.

Abschlusstreffen

Das Abschlusstreffen des Leitprojektes MAI Recycling fand am 29. Juli 2015 am bifa Umweltinstitut in Augsburg statt. Neben den Projektpartnern nahmen Frau Dr. Wies vom Projektträger Jülich sowie Herr Schüppel vom Clustermanagement teil. Nach dem Bericht des Clustermanagements zum Abschluss-Projektbarometer und zum weiteren Verlauf von MAI Carbon stellte Frau Dr. Wies Details zur Erstellung des Abschlussberichts vor. Auf einen Rückblick auf die gemeinsame Projektarbeit und eine kurze Reflexion der Projektziele folgten partnerspezifisch die zentralen Ergebnisse und Highlights im Projekt MAI Recycling.

6.1.2 Abstimmung mit dem Clustermanagement

Clustermanagement am bifa Umweltinstitut

Das Cluster Management folgte am 04.06.2013 einer Einladung an das bifa Umweltinstitut, Augsburg. Mit Frau Fritsch und Herrn von Reden wurden die folgenden Themen bzgl. des

MAI Recycling-Projektes abgehandelt: Öffentlichkeitsarbeit (Abstimmung der Aktivitäten und der Möglichkeiten in diesem Bereich, u. a. Finanzierung, Bereitstellen von Pressetexten, Notwendigkeit von Freigaben, Art und Weise der Freigaben), Austausch mit anderen MAI Projekten, Abstimmung der Meilensteine sowie Koordination der Materialbedarfe für Versuche und Testverarbeitungen. Darüber hinaus fanden weitere Abstimmungsgespräche per Telefon oder im Rahmen von MAI Carbon Veranstaltungen statt.

Treffen der Projektkoordinatoren

bifa nahm an den in regelmäßigen Abständen stattfindenden Projektkoordinatoren-Treffen, die das Clustermanagement durchführte, teil. Im Rahmen der Veranstaltungen wurden Informationen aus dem Clustervorstand an die Projektbeteiligten weiter gegeben. Ziel dieser Veranstaltungen war zudem der Austausch über die laufende Projektarbeit in den verschiedenen MAI Carbon-Projekten sowie die Diskussion möglicher Schnittstellen.

Strategieworkshops

Das Clustermanagement veranstaltete einmal jährlich einen Strategie-Workshop. Der Fokus lag auf der Präsentation der einzelnen Projekte sowie auf der Vernetzung der Projektbeteiligten untereinander. Weitere Schwerpunkte waren die Projektskizzen der zweiten Förderphase, die bis zum 20. Oktober 2013 abzugeben waren, sowie die Einbindung von KMU in die Projektarbeit.

6.2 Marktanalyse Abfälle und Recyclingfasern

Zur näherungsweise Quantifizierung des in Europa derzeit gegebenen sowie des 2020 zu erwartenden Aufkommens an CFK-Abfällen wurde anhand fundierter Annahmen eine Abschätzung des Anfalls an Produktionsabfällen und End-of-Life-Abfällen vorgenommen. Ausgangsbasis war die CCeV-Analyse „Der globale CFK-Markt“ im Rahmen der von AVK und CCeV gemeinsam vorgelegten Composites-Marktberichte 2013²³ und 2014²⁴. Die folgenden beiden Tabellen zeigen die Ergebnisse der Abschätzung für das Jahr 2013 und der Prognose für 2020.

²³ CCeV (2013), Der globale CFK-Markt, in: CCeV und AVK, Composites-Marktbericht 2013

²⁴ CCeV (2014), Der globale CFK-Markt, in: CCeV und AVK, Composites-Marktbericht 2014

Einsatzbereich	CFK Europa (t)	Prod.Abf. 2013 (%)	EoL 2013 (%)	Prod.Abf. 2013 (t)	EoL 2013 (t)	Gesamt 2013 (t)
Luft- u. Raumfahrt incl. Verteidigung	10.000	40	2	4.100	200	4300
Windenergie	7.900	40	2	3.200	160	3360
Fahrzeugbau	4.500	40	3	1.800	130	1930
Sport und Freizeit	400	40	5	150	20	170
Molding, Compounding	4.000	10	5	400	200	600
Drucktanks	1.700	30	5	500	90	590
Bauwesen	1.700	20	2	350	30	380
Übrige	3.100	31	3	1.000	110	1110
Gesamt (2013)	33.300	0	0	11.500	940	12.440

Abbildung 6-1: Abschätzung des Aufkommens an CFK-Abfällen in Europa für das Jahr 2013. Datenbasis: CCeV (2014 und 2013), eigene Berechnungen; Annahme zu Molding, Compounding, Drucktanks, Bauwesen, Übrige: Anteil Bedarf Europa an Welt = Durchschnitt der übrigen Einsatzbereiche (45 %)

Einsatzbereich	CFK Europa (t)	Prod.Abf. 2020 (%)	EoL 2020 (%)	Prod.Abf. 2020 (t)	EoL 2020 (t)	Gesamt 2020 (t)
Luft- u. Raumfahrt incl. Verteidigung	19.140	25	5	4.800	960	5.760
Windenergie	15.121	25	5	3.800	760	4.560
Fahrzeugbau	8.613	20	20	1.700	1.720	3.420
Sport und Freizeit	766	25	20	190	150	340
Molding, Compounding	7.656	8	25	610	1.900	2.510
Drucktanks	3.254	25	25	810	810	1.620
Bauwesen	3.254	20	3	650	100	750
Übrige	5.933	21	15	1.250	870	2.120
Gesamt (2020)	63.736			13.810	7.270	21.080

Abbildung 6-2: Prognose des Aufkommens an CFK-Abfällen in Europa für das Jahr 2020. Datenbasis: CCeV (2014 und 2013), eigene Berechnungen; Annahme zu Molding, Compounding, Drucktanks, Bauwesen, Übrige: Anteil Bedarf Europa an Welt = Durchschnitt der übrigen Einsatzbereiche (45 %); Annahme: Marktanteil Europa am Weltmarkt entspricht dem Anteil im Jahr 2012.

Während der Anteil der End-of-Life-Abfälle im Jahr 2013 noch weniger als 10 % der Gesamtmenge beträgt, liegt er der Prognose zufolge 2020 bereits bei etwa einem Drittel. Ur-

sachne hierfür sind zum einen das zunehmende Aufkommen von End-of-Life-Abfällen insbesondere aus langlebigen Produkten, zum anderen die in Folge verbesserter CFK-Verarbeitungsverfahren abnehmenden spezifischen Mengen an Produktionsabfällen. Aufgrund des insgesamt wachsenden CFK-Marktes steigt die Gesamtmenge an CFK-Abfällen bis 2020 um etwa 70%.

Der Druck hinsichtlich der Schließung der Kapazitätslücke sowohl im Bereich der Verwertung als auch, insbesondere in Deutschland, der Beseitigung von CFK-Abfällen wird also weiter wachsen.

6.3 Erfassung

Zum Aufbau eines aufnahmefähigen und flexiblen Marktes für das CFK-Recycling ist es wichtig, eine standardisierte Nomenklatur zur Charakterisierung von CF- bzw. CFK-Abfällen festzulegen.

Dabei sollten die wichtigsten Charakteristika in einem Bezeichnungsschlüssel zusammengeführt werden: Fasertyp, Faserzustand, Matrixkunststoff, der Faservolumengehalt (FVG) und der Grad der Verunreinigung. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde hierzu ein Vorschlag erarbeitet, der auf das in der Papierindustrie seit langem gebräuchliche Charakterisierungsraster für Altpapier aufbaut.

Mögliche Nomenklatur						
Faser Type		Ausgangsmaterial (Faserzustand)		Matrix	FVG [%]	Fremd- / Störstoffe [Gew.-%] [00-10%: 01] [11-20%: 02]
HT	A	End of Life-Bauteile	1	z. B.: PA6	55	z.B. 8 % = 01
HM	B	Ausgehärtete Produktionsabfälle Beibinderter Verschnitt	2			
IM	C	Prepreg Verschnitt	3			
UHM	D	Unbeibinderter Verschnitt	4			
Mixed Fibers	E	Reine Faser	5			

rCF Nomenklatur z. B.: A2_PA6-55_01

Abbildung 6-3: Vorschlag zu einer einheitlichen Nomenklatur für Carbonfaser- und CFK-Abfälle

Grundsätzlich sollte darauf geachtet werden, dass CF- oder CFK-Abfälle möglichst typenrein erfasst werden. Verunreinigungen sollten so weit wie möglich vermieden werden.

6.4 Zerkleinerung

6.4.1 Zerkleinerungsversuche bei der Neidhardt GmbH (Pierret-Schneidemaschine)

In Zusammenarbeit mit dem Recyclingunternehmen Neidhardt GmbH, Memmingen, welches über eine Pierret-Schneidemaschine verfügt, wurden im Herbst 2013 am Standort Neu-Um Zerkleinerungsversuche mit verschiedenen CFK-Materialien durchgeführt.

Die Schnittlänge kann über die Geschwindigkeit des Zuführ-Förderbandes reguliert werden. Je langsamer das Band läuft, desto kürzer ist die Schnittlänge. Vorteilhaft ist vor allem, dass die Zerkleinerung staubarm und ohne große Wärmeentwicklung erfolgt.

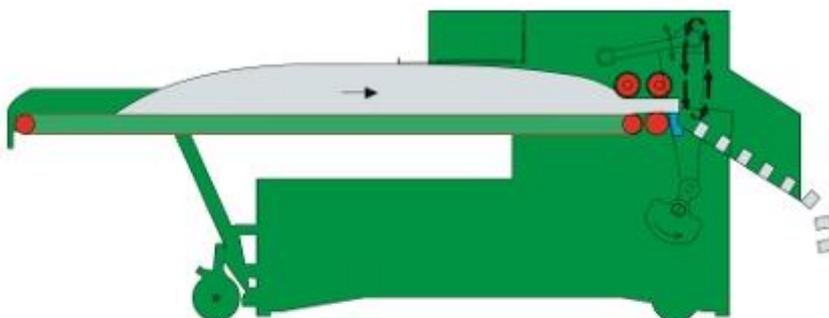


Abbildung 6-4: Pierret Schneidemaschine (Quelle Pierret Industries)

In mehreren Versuchsdurchgängen wurden CFK-Materialien zerkleinert. Die Ausgangsmaterialien wurden händisch auf das Zuführförderband aufgegeben. Da das Pierret-Aggregat nicht eingehaust war, konnten nur kleinere Materialmengen verarbeitet werden, um Schäden an der elektrischen Steuerung der Anlage zu vermeiden.

Ein Verkleben oder Zusetzen der Maschine erfolgte auch beim Schneiden der teilausgehärteten Prepregs nicht. Selbst Gewölle ließ sich mit der Maschine problemlos schneiden. Allerdings ist die Einstellung definierter Faserlängen nur bei parallel ausgerichteten Fasern möglich. In allen anderen Fällen kommt es zu mehr oder weniger breiten Faserlängenverteilungen.

Die Faserschnittlänge kann im automatisierten Betrieb stufenlos über die Geschwindigkeit des Zuführförderbandes variiert werden. Eine exakte Schnittlänge ist mit der Pierret nicht zu erreichen, es bildet sich eine Normalverteilung um die eingestellte Faserlänge in Abhängigkeit von der Längenverteilung des Inputmaterials.

6.4.2 Zerkleinerungsversuche bei der Lober GmbH & Co. KG (Rotorschere und Schneidmühle)

Beim Ausgangsmaterial dieser Zerkleinerungsversuche handelte es sich um Schnittabfälle, Prepregs und Fehlchargen von Bauteilen aus dem Flugzeugbau. Das Gesamtgewicht der Charge betrug vor der Zerkleinerung 1,68 t.

Im ersten Aufbereitungsschritt wurde das Ausgangsmaterial mithilfe einer Rotorschere vorzerkleinert. Die Aufgabe erfolgte händisch. Der Durchsatz der Anlage lag bei ca. 50 bis 80 kg pro Stunde (bei ausgehärteten Materialien). Auf einer Anlage im Produktionsmaßstab sind allerdings deutlich größere Durchsätze zu erzielen.



Abbildung 6-5: Rotorschere (Fa. MeWa)

Die mit dem Material beschickte Rotorschere der Firma MeWa verfügt über zwei gegenläufige Wellen mit auswechselbaren Messern. Der Schredder ist vorzugsweise für die Verarbeitung von Leichtmetallschrott, Mischschrott und sperrigen Teilen geeignet.

Aufgrund der Flexibilität der Prepregs war deren Zerkleinerung kaum möglich. Die unausgehärteten Folien führten zudem zum Verstopfen der Zerkleinerungsanlage. Weitere Probleme, die mit der Zerkleinerung von Prepregs verbunden waren, sind:

- Aushärten des Materials aufgrund der Wärmeentwicklung im Mahlwerk
- Verklemmen der Wellen
- Keine definierbare Endgröße
- Teilweise keine Zerkleinerung (Material legt sich in die Hohlräume)
- Gefahr des „Verbackens“ im Big Bag insbesondere bei direkter Sonneneinstrahlung

Aufgrund dieser Schwierigkeiten bei der Zerkleinerung bzw. Konditionierung von Prepregs wurde das Prepreg-Material aus der Versuchsmenge herausgenommen und die Rotorschere nur noch mit ausgehärteten CFK Bauteilen beschickt. Das Aufgabematerial wurde strei-

fenförmig zerkleinert mit einer Breite von ca. 40 mm und einer Länge zwischen 100 und 200 mm. Etwa 20% des Inputs blieb jedoch unzerkleinert und fiel zwischen den Wellen hindurch.



Abbildung 6-6: *Grobzerkleinertes Material*

Im Anschluss folgte die weitere Zerkleinerung mithilfe einer Schneidmühle mit Parallelschnittrotor (siehe Abbildung).



Abbildung 6-7: *Schneidmühle sowie Schneidwerk*

Schneidmühlen sind Zerkleinerungsaggregate, die mithilfe von Rotormessern und Statormessern das Mahlgut durch Scherwirkung zerkleinern. Das CFK haltige Material fällt durch einen Trichter in den Mahlraum, wo es vom Rotor erfasst und zwischen ihm und den feststehenden Schneidplatten vermahlen wird. Im unteren Teil des Mahlraums befindet sich ein Sieb, welches das Material erst nach Erreichen der gewünschten Endkorngröße passieren kann.

Die folgende Abbildung zeigt das feinerkleinerte Material.



Abbildung 6-8: *Feinzerkleinertes Material*

Das Endmaterial hatte eine mittlere Korngröße von etwa 20 mm. Teilweise wurde der CFK-Verbund durch die Zerkleinerung delaminiert, was für die Pyrolyse des Materials von Vorteil ist.

6.4.3 Zerkleinerung von Produktionsabfällen und CFK-Bauteilen aus dem Bereich Automotive bei Erdwich Zerkleinerungssysteme GmbH

Die Zerkleinerung ist ein für den Erfolg des Recycling wesentlicher Aspekt, denn eine Vorzerkleinerung ist erforderlich, um größere Metallanteile frühzeitig abtrennen zu können. Vorzerkleinertes und teilweise delaminiertes Material erlaubt aber auch eine schonendere Pyrolyse als im Falle insbesondere dickwandigerer größerer Teile. Darüber hinaus bietet die Zerkleinerung die Möglichkeit einer Voreinstellung der, z.B. nach der Pyrolyse, erhaltenen Faserlängen.

Es wurden Versuche zur Bewertung des Zerkleinerungsverhaltens verschiedener ausgehärteter Produktionsabfälle und EoL-Bauteile durchgeführt, um den Einfluss auf die späteren Freilegungsverfahren untersuchen zu können. Dabei sollte auch das Verhalten von Verunreinigungen, wie metallische Befestigungs- und Verstärkungsbauteile, während des Versuches betrachtet werden. Ein weiterer Aspekt der Untersuchung war der Einfluss des Materials auf die Anlagensicherheit wie z. B. Schäden aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit der Kohlefasern.

Die Zerkleinerungsversuche wurden bei der Firma Erdwich Zerkleinerungssysteme GmbH in Kaufering durchgeführt. Das Ausgangsmaterial wurde von den Projektpartner BMW und Audi zur Verfügung gestellt. Es handelte sich um Schnitt- und Produktionsabfälle sowie EoL Bauteile.

Mögliche Verunreinigungen können in Falle des Versuchsmaterials metallische Befestigungs- und Verstärkungsbauteile (z. B. Nieten, Meshes = Drahtgewebe oder Schraubverbindungen) sein. Das zu zerkleinernde Probematerial war bezüglich der Länge sehr inhomogen. Die Stücke reichten von wenigen Zentimetern bis zu Längen von ca. 1,2 m. Den größten

Anteil machten Bauteile im Bereich von ca. 80 - 100 cm Länge und ca. 30 – 50 cm Breite aus.

Zu Beginn der Versuchsreihe wurde das Aufgabematerial mithilfe eines 3-Wellen-Zerkleinerers grob zerkleinert. Ein Teil des Stoffstromes wurde anschließend mithilfe eines 1-Wellen-Zerkleinerers nachbehandelt, um das Verhalten des Materials bei einer weiteren Zerkleinerung zu untersuchen.

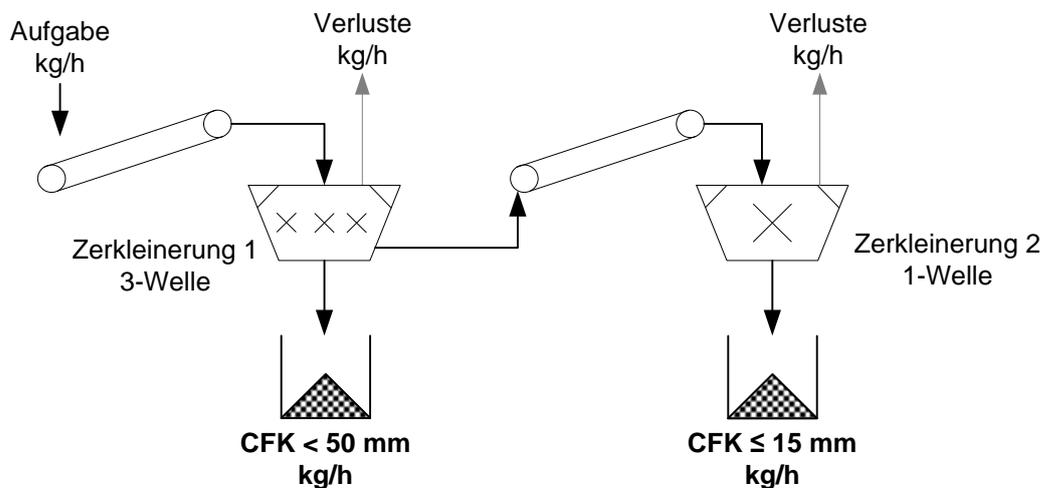


Abbildung 6-9: Zerkleinerungsversuch bei Erdwich Zerkleinerungssysteme GmbH: Versuchsschema.

Vor und nach der Zerkleinerung wurde jede Charge verwogen.

Bei der Verarbeitung der EoL Bauteile konnten zwei Motorhauben auf Grund ihrer Größe nicht zerkleinert werden. Sie wurden deshalb bei der Verlustbetrachtung nicht berücksichtigt. Die folgenden Tabellen zeigen die aufgetretenen Materialverluste.

Tabelle 6-1: Verluste am 3-Wellen-Zerkleinerer:

	Box Nr.	Gewicht Input CFK [kg]	Gewicht Output CFK [kg]	Verluste [%]
BMW	1	66	59	13
	2+3	176	159	11

Tabelle 6-2: Verluste am 1-Wellen-Zerkleinerer

	Box Nr.	Gewicht Input CFK [kg]	Gewicht Output CFK [kg]	Verluste [%]
Audi	4+5	3,7	3	9
	6	3,9	3	3

Ursachen für die Verluste waren

- Staubentwicklung während der Zerkleinerung
- Material fällt beim Ein- und Austrag neben das Aggregat
- Verbleib von Kleinstteilen in der Gitterbox
- Material verbleibt in der Anlage / im Siebboden (verfälscht insbesondere bei kleinen Versuchsmengen die Ergebnisse)

Im Rahmen eines Großversuchs mit etwa 3 t Material konnten die Materialverluste später erheblich reduziert werden.

Durch die Zerkleinerung entsteht keine einheitliche Korngröße, sondern ein Kornkollektiv mit einer charakteristischen Korngrößenverteilung. Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft einige Korngrößenverteilungen:

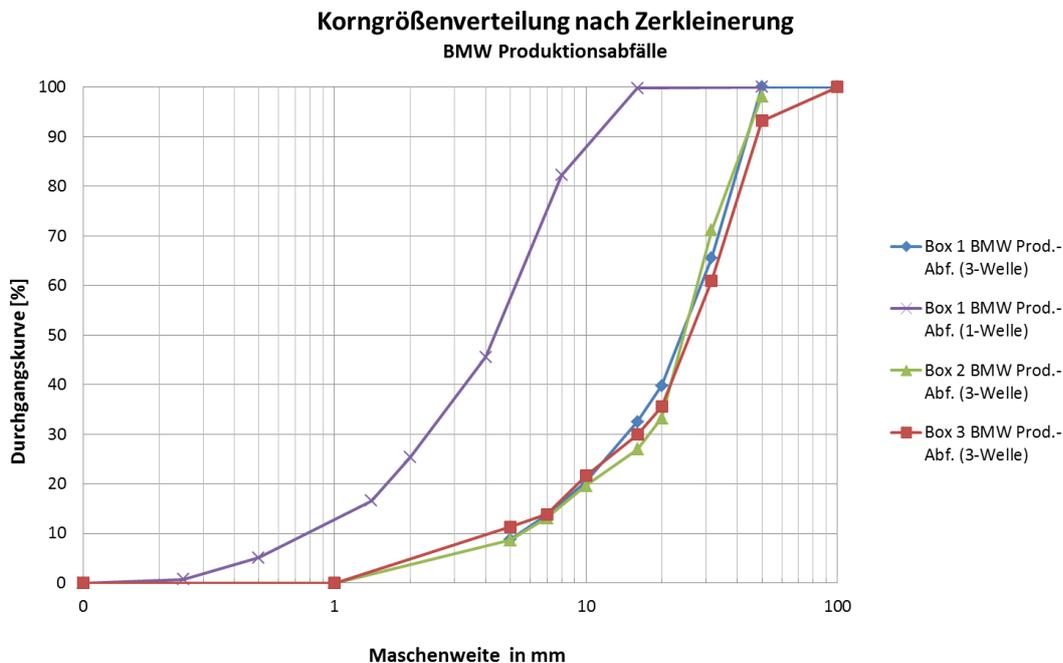


Abbildung 6-10: Korngrößenverteilung BMW Produktionsabfälle

Die im Material vorhandenen metallischen Verunreinigungen wie Schrauben und Nieten hatten keinen negativen Einfluss auf die Zerkleinerung. Je nach Art der Verbindung wurden die metallischen Bestandteile teilweise bzw. komplett freigelegt.

Kostenberechnung für eine CFK-Zerkleinerungsanlage

Die Kernkomponenten der Anlage sind zwei parallel arbeitende 3-Wellen-Zerkleinerer und zwei Siebmaschinen. Die folgende Abbildung zeigt das Anlagenkonzept mit sämtlichen Nebenaggregaten.

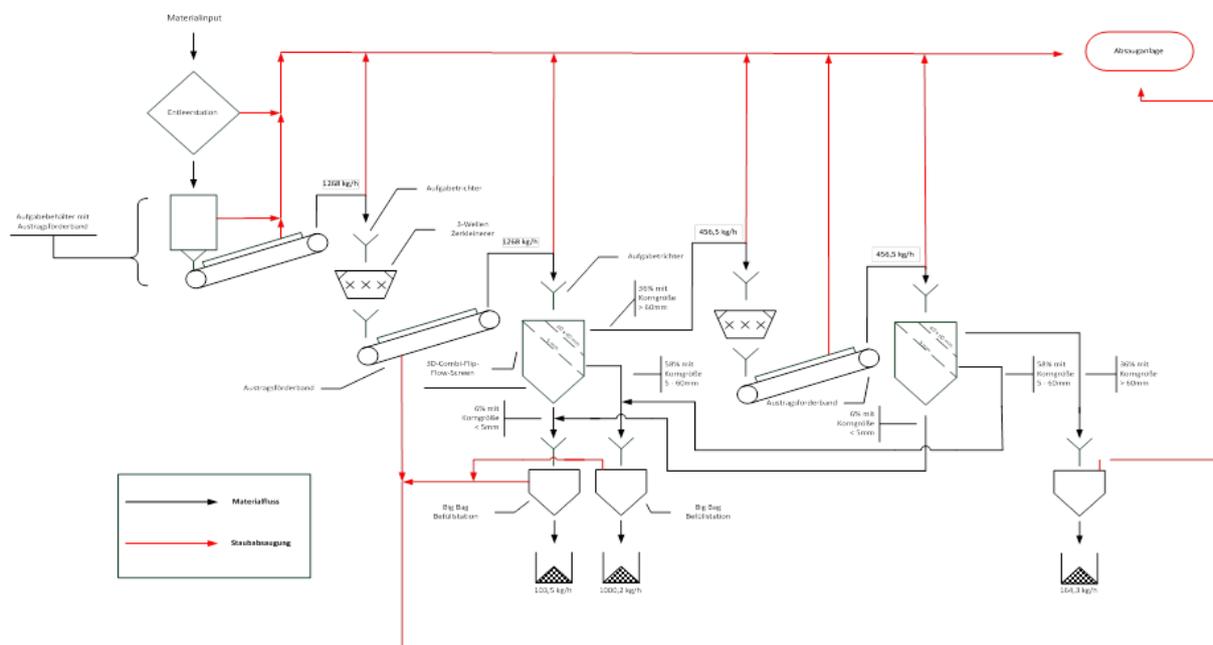


Abbildung 6-11: Fließbild Zerkleinerungsanlage für CFK-Bauteile

Die Kostenberechnung für den CFK-Zerkleinerungsprozess hängt unter anderem von den zu erwartenden Materialflüssen ab. Die Mengenabschätzung orientierte sich an den typischen Durchsätzen der vorgesehenen Anlagen, welche im Rahmen von Versuchsreihen ermittelt wurden. Neben den Durchsätzen pro Stunde sind aber auch die Betriebszeiten pro Jahr entscheidend.

Die aus den Daten resultierenden spezifischen Zerkleinerungskosten pro Tonne CFK-Material sind in Abhängigkeit von Durchsatz pro Stunde und den Betriebsstunden pro Jahr nachfolgend dargestellt.

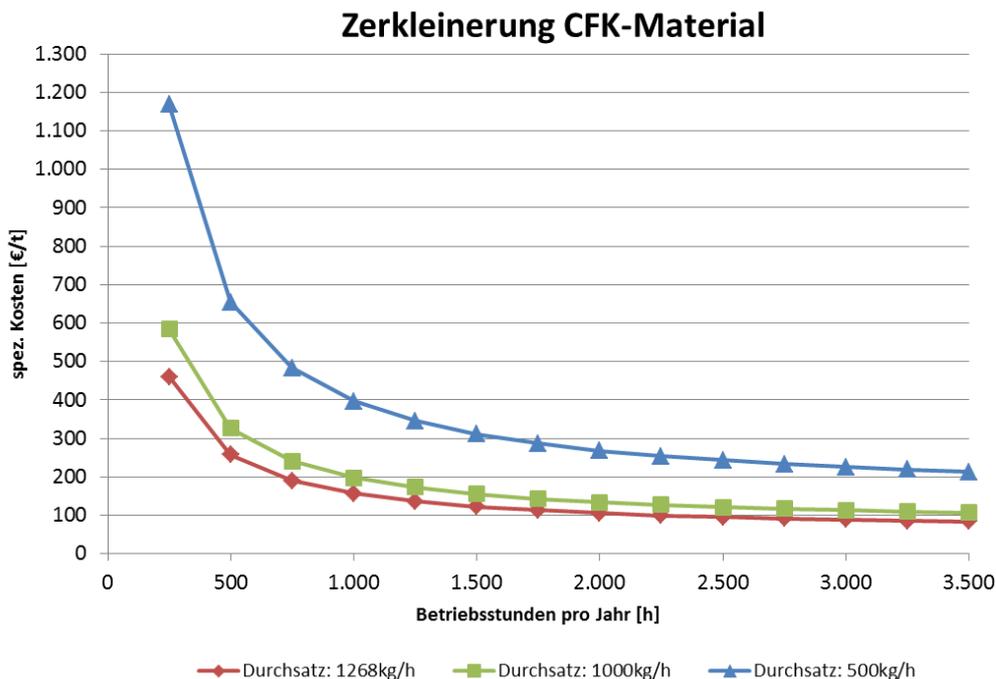


Abbildung 6-12: Spezifische Zerkleinerungskosten in Abhängigkeit von Durchsatz und Betriebsstunden pro Jahr

Bei der Ermittlung der spezifischen Zerkleinerungskosten wurden folgende Faktoren berücksichtigt:

- Investitionskosten für Maschinen und Fördertechnik
- Stahlbau
- Energiekosten
- Absaugung
- Montage / Inbetriebnahme/ Wartung / etc.

Unberücksichtigt blieben folgende Kostenpunkte:

- Lagerkosten
- Infrastrukturkosten
- Gebäudekosten
- Personalkosten

Wie aus dem Diagramm ersichtlich, sind bei einem Durchsatz von 1.000 t/a CFK-Material und einer Betriebszeit von 3.000 h/a, Kosten von etwa 100 €/t zu erwarten.

6.5 Pyrolyse

6.5.1 Behandlung von Duromer basierten CFK in der großtechnischen Pyrolyseanlage Burgau

In Anbetracht der zu erwartenden Mengenentwicklung von CFK-Materialien und der bislang fehlenden Recyclingtechnik wurde bereits im Jahr 2010 vom bifa Umweltinstitut ein Pilotversuch zur Wiedergewinnung von rC-Fasern an der Pyrolyseanlage Burgau durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten dabei die prinzipielle Machbarkeit der Rückgewinnung von Kohlefasern, was schließlich auch die Ausgangsbasis für die weiteren Entwicklungsarbeiten im Projekt MAI Recycling darstellte. Diese konzentrieren sich auf die Optimierung eines kontinuierlichen großtechnischen Pyrolyseprozesses.

Die Müllpyrolyseanlage (MPA) Burgau verfügt über zwei parallel betriebene Schweltrommeln identischer Größe zur thermischen Behandlung von Haus- und Sperrmüll sowie hausmüllähnlichem Gewerbemüll und Klärschlamm. Die Gesamtanlage ist für eine Durchsatzleistung von 6 t/h Abfall (3 t/h je Schweltrommel) genehmigt. Bei CFK-Material als Input sind voraussichtlich 4 t/h möglich. Abbildung 6-13 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Anlagentechnik an der MPA Burgau.

In den zwei an der MPA Burgau indirekt mit Abgas beheizten Drehtrommeln (Durchmesser 2,20 m, Länge 20 m) werden die Abfälle unter Luftausschluss in einem Temperaturbereich von 470°C bis 500°C verschwelt. Die Verweilzeit der Abfälle in den Drehtrommeln beträgt bei einer Drehgeschwindigkeit von 1,5 Umdrehungen pro Minute ca. 45 Minuten. An den Außenwänden der Schweltrommel herrschen Temperaturen von ca. 500°C bis 650°C. Um den Austritt von Schwelgasen zu vermeiden, werden die Schweler im Unterdruck betrieben.

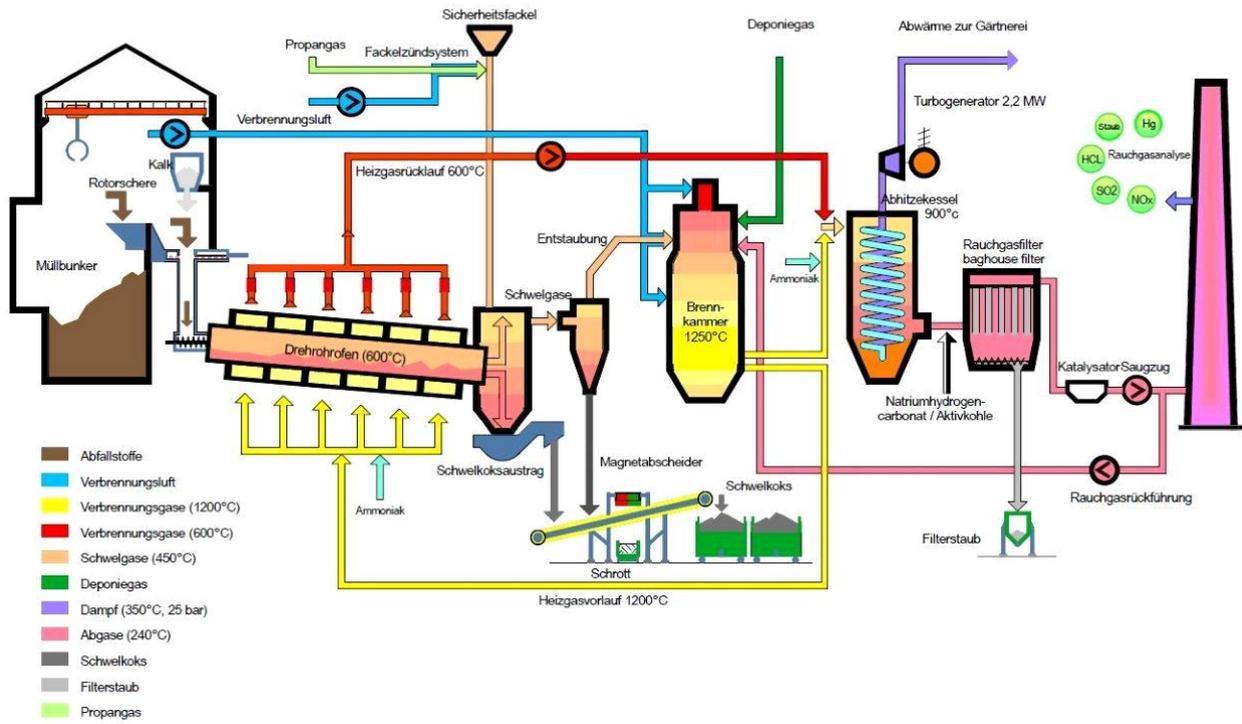


Abbildung 6-13: Verfahrensschema MPA Burgau (Quelle MPA Burgau)

6.5.2 Optimierung der Oberflächengüte und des Freilegungsgrades von C-Fasern bei der Pyrolyse

Aufgrund von Orientierungsversuchen wurde deutlich, dass vor allem Temperatur und Verweilzeit einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der rC-Fasern nach Freilegung im Drehrohrofen haben. Um die Oberflächengüte zu optimieren, wurden Technikumsversuche mit verschiedenen Temperaturprofilen durchgeführt. Abbildung 6-14 zeigt den Versuchsstand, mit dem dabei gearbeitet wurde.

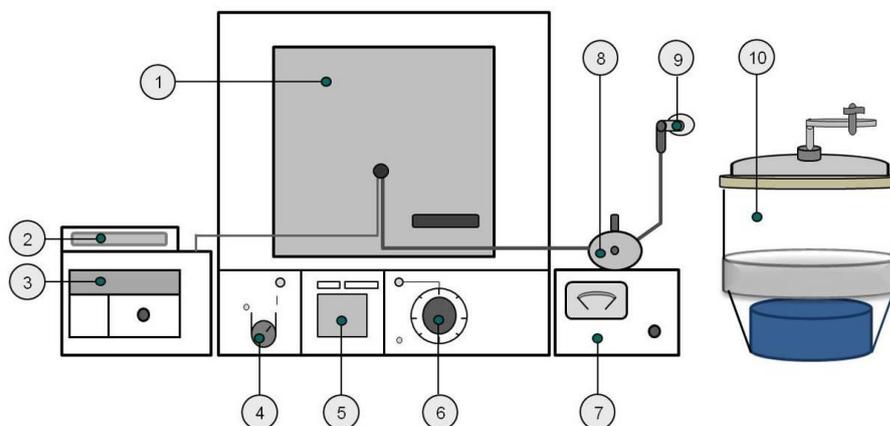


Abbildung 6-14: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Erläuterung des Versuchsaufbaus

- (1) Labor-Muffelofen
- (2) Messanzeige Stickstoffgehalt
- (3) Messanzeige Ofentemperatur
- (4) Netzschalter
- (5) Temperaturregler (digital)
- (6) Temperaturregler mit Sicherheitsschalter
- (7) Sauerstoffmessgerät
- (8) Durchflussmesser
- (9) Stickstoffversorgung
- (10) Exsikkator

Das Versuchsprogramm beinhaltete Versuche mit verschiedenen Temperaturniveaus und unterschiedlichen Verweilzeiten im Ofen. Für die Pyrolyse wurde eine inerte Atmosphäre mit Stickstoff bei möglichst geringem Restsauerstoffgehalt geschaffen. Aufgrund bereits vorliegender Ergebnisse aus TGA-Versuchen (Thermogravimetrische Analysen) wurde als Obergrenze eine Temperatur von 600°C festgelegt. Die Auswahl des Einsatzmaterials orientierte sich zur Gewährleistung vergleichbarer Ergebnisse an mehreren Aspekten. Zum einen sollte das Material weitgehend homogene Eigenschaften aufweisen. Des Weiteren sollten das Harz- bzw. Matrixsystem und die Zusammensetzung des Inputmaterials bezüglich Faser- und Harzgehalt bekannt sein.

Für die Versuche wurde eine Zielkörnung von 50 mm angestrebt (Zerkleinerung mit Rotor- schere und Mühle). Als Material wurden ausgehärtete Produktionsabfälle eines Projektpartners eingesetzt.



Abbildung 6-15: *Inputmaterial geschreddert und nach Zerkleinerung per Mühle*

Wie bei den Orientierungsversuchen wurde das Ergebnis zum einem durch den Masseverlust charakterisiert, zum anderen wurde die optische Qualität der Fasern nach einer Punkteskala beurteilt. Durch mehrere Versuchsreihen wurden die Qualitätsmerkmale der rC-Fasern bei verschiedenen Zeit-Temperatur-Profilen ermittelt.

Um den Einfluss der Pyrolysetemperatur festzustellen, wurde das Probenmaterial einer thermischen Behandlung unter inerter Atmosphäre (Stickstoff) und einer anschließenden fünfminütigen Nachoxidation bei jeweils veränderten Bedingungen unterzogen. Die Zeit-Temperatur-Kombinationen wurden auf Basis von Erfahrungswerten (durchgeführte Orientierungsversuche) festgelegt. Um Faserschädigungen zu vermeiden, wurden die Versuchseinstellungen so gewählt, dass höhere Temperaturen mit kürzeren Verweilzeiten kombiniert wurden.

Es wurden 22 Versuche mit zwei-, drei- und vierstufigen Temperaturprofilen und einem konstanten Stickstoffvolumenstrom von 25 l/min durchgeführt, um die inerte Umgebung im Ofenraum zu gewährleisten.

Bewertung der Ergebnisse:

Generell wurde bestätigt, dass eine Endtemperatur von 600°C zur pyrolytische Freilegung erforderlich ist und dass stufenweise Temperaturprofile gute Ergebnisse in Bezug auf Restanhaftungen an den rC-Fasern bringen. In Abbildung 6-16 sind durchgeführte Stufenprozesse beispielhaft dargestellt. Die Untersuchungen zeigen, dass die Pyrolysetemperatur einen erheblichen Einfluss auf den Freilegungsprozess hat und dass ein gezielt eingestelltes Temperaturprofil wesentlich für die Ergebnisse der Pyrolyse ist.

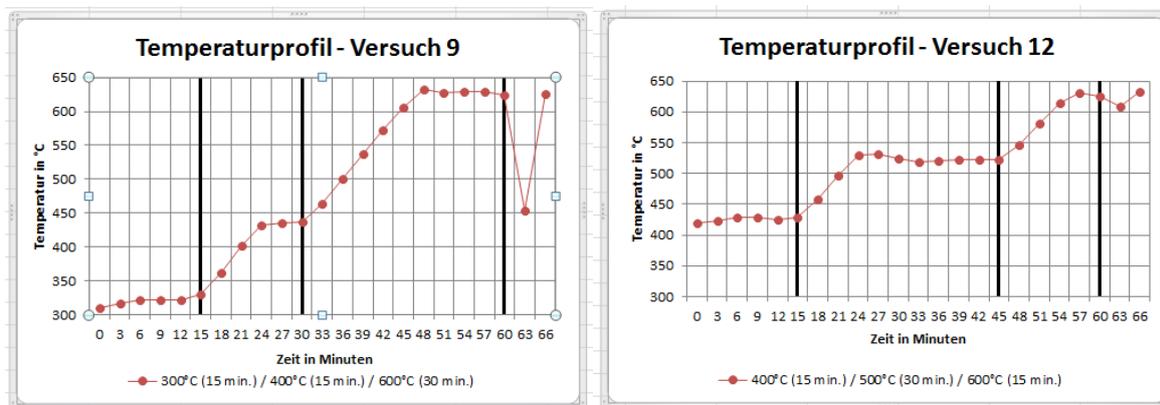


Abbildung 6-16: Beispiel für Temperaturprofile

Solche Temperaturprofile wären auch an der Müllpyrolyseanlage Burgau umsetzbar gewesen.

Fazit aus den Versuchen

Es wurde aufgrund der Versuche angestrebt, bei einem Großversuch ein Temperaturprofil von 400°C, 450°C und 600°C zu fahren (wie in Versuch 12).

Optimierung des Pyrolyseprozesses an der MPA Burgau hinsichtlich Temperatur und Zeit

Die Verweilzeit und das Temperaturprofil im Drehrohrföfen waren unter der Zielvorgabe zu optimieren, dass die Fasern des zu pyrolysierenden Materials möglichst wenig geschädigt werden und keine Anhaftungen von Pyrolysekoks aufweisen.

Ein zuverlässige Entfernung der Matrix erfordert Temperaturen von über ca. 500°C. Andererseits führen Temperaturen im Bereich von über 600°C schnell zu einer Schädigung der Fasern. Aus bisherigen in Laborversuchen am bifa ermittelten Ergebnissen geht hervor, dass eine Schädigung der Faser bei Temperaturen im Bereich von 550 bis 600°C in ausreichendem Maße vermieden werden kann, wenn das Material nur für kurze Zeit den hohen Temperaturen ausgesetzt wird. Bei ausreichend guter Inertisierung der Ofenatmosphäre hängt also das Ergebnis der Faserfreilegung durch Pyrolyse im Wesentlichen von der bestmöglichen Einsteuerung der beiden gegenläufigen Parameter Temperatur und Zeit ab (geringere Temperaturen erfordern längere Verweilzeiten, kürzere Verweilzeiten erfordern höhere Temperaturen).

An der MPA Burgau könnte die Verweilzeit des Materials durch die Umdrehungsgeschwindigkeit der Drehtrommel gesteuert werden; dabei sind Verweilzeiten zwischen 45 und 75 Minuten möglich. Daneben kann durch die Trennung der Drehtrommelheizkammer in sechs Heizbereiche in begrenztem Rahmen ein Temperaturprofil in der Trommel erzeugt werden.

Optimierung Gaspfad und Abluftreinigung an der MPA Burgau

Da die freigelegten Carbonfasern aufgrund ihres sehr geringen Eigengewichtes bereits bei geringsten Gasbewegungen mitgerissen werden, gelangen Fasern auch in den Gaspfad der Anlage. Dies kann im Dauerbetrieb zu einer Störung des Prozesses führen.

Bislang wird Staub, der mit dem Gas aus der Pyrolysetrommel ausgetragen wird, über einen Zyklon abgeschieden. Carbonfasern passieren jedoch in größerer Menge den Zyklon und belasten die nachfolgende Verbrennung und Abgasbehandlung.

Die vorhandenen Zyclone in der Abgasreinigung müssten daher bei Verarbeitung von CFK durch keramische Filterkerzen ergänzt werden, mit welchen die Fasern sicher abgeschieden werden. Damit der Druckverlust des Filters nicht zu stark ansteigt, müsste der Filterkuchen in regelmäßigen Intervallen durch eine Umkehrung der Durchströmungsrichtung der Filterkerze abgereinigt werden. Dazu wird die Kerze von der Reingasseite aus mit einem Druckstoß beaufschlagt und so der Filterkuchen abgesprengt.

Optimierung des Austrages an der Drehtrommel der MPA Burgau

Die festen Pyrolyserückstände wie Pyrolysekoks, Metalle oder andere nichtorganische Materialien fallen derzeit am Ende der Schweltrommel in ein Wasserbecken. Im Wasserbecken sollen die Rückstände absinken. Anschließend werden sie von einem Schieber, der am Grund des Wasserbeckens läuft, nach außen geschoben. Mittels eines Gurtfördersystems wird der nasse und abgekühlte Rückstand in Container-Mulden abtransportiert, wobei auch ein Magnetabscheider durchlaufen wird. Der Nassentschlacker erfüllt dabei neben dem Austrag der Rückstände zwei wichtige Funktionen:

- Abkühlen der heißen Schlackerückstände
- Ofenraum wird luftdicht abgeschlossen

Aufgrund der geringen Dichte sinken die freigelegten rC-Fasern allerdings im Wasserbecken nicht ab und es kommt zu Verstopfen des Nassentschlackers. Um bei Verarbeitung von CFK einen ungestörten Betrieb des Austrags zu gewährleisten, wurden daher verschiedene Alternativen betrachtet.

Optimierung des Austrages durch Einblasen eines Gases in das Wasserbecken

Das entstehende Wasser-Gas-Gemisch hat eine geringere Dichte, dadurch werden die Auftriebskräfte, die auf die Fasern wirken, geringer und die behandelten Fasern sinken ab. Um die Oberflächenspannung des Wassers zu senken, wäre das Einbringen einer Schlichte denkbar. Damit sollten auch Koksrückstände entfernt und die weitere Verarbeitung der Fasern erleichtert werden.

Halbnassaustrag

Bei der Umrüstung auf einen Halbnassaustrag kann das bestehende Austragsgehäuse beibehalten werden. Es wird aber über einen senkrechten Schacht um 2,0 m verlängert. Die Inertatmosphäre in der Drehtrommel wird nicht mehr über den Wasserstand des bisher vor-

handenen Nassentschlackers abgedichtet, sondern über den Füllstand im nach unten geführten Schacht. Der etwa ein Meter hohe Füllstand muss über eine entsprechende Messeinrichtung sichergestellt werden. Unterhalb des Schachts soll eine gekühlte Schnecke angebracht werden, die je nach Füllstand den etwa 450-500°C heißen Rückstand abtransportiert.

6.5.3 Integriertes CFK-Verwertungszentrum

Im Rahmen des Projektes sollte in der MPA Burgau ein Großversuch durchgeführt werden, um den Pyrolyseprozess mit verbesserten Prozessparametern zu erproben, vor allem aber, um unter Realbedingungen freigelegte Carbonfasern zu erhalten, die im Rahmen des Gesamtprojektes für Verarbeitungsversuche eingesetzt werden können.

Da eine Nutzung der MPA Burgau für die Pyrolyse von CFK-Abfällen nicht mehr möglich war wurde während der Projektlaufzeit in Abstimmung mit dem Fördergeber folgende Alternative für die im Zusammenhang mit der MPA Burgau geplanten Arbeiten gesucht: Es wurde eine Analyse zur technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit eines integrierten CFK-Verwertungszentrums, in dem CFK-Abfälle aller Art verwertet werden können, durchgeführt. Kern dieses Ansatzes sollte die Integration einer Pyrolyseanlage in eine bereits in Betrieb befindliche Müllverbrennungsanlage (MVA) sein.

Zur Mitwirkung am Projektmodul „integriertes CFK-Verwertungszentrum“ konnten zwei Unternehmen gewonnen werden:

- Die ELG Carbon Fibre Ltd. (ELG), die eine CFK-Pyrolyseanlage in Großbritannien betreibt. Die ELG ist eine 100 %-ige Tochter der deutschen ELG Haniel GmbH in Duisburg und sie ist MAI Carbon Partner.
- Das Gemeinsame Kommunalunternehmen für Abfallwirtschaft Geiselbullach (GfA Geiselbullach), das eine Müllverbrennungsanlage in der MAI-Region betreibt.

Dieser Ansatz erschien aus mehreren Gründen besonders interessant:

- Die Anbindung einer CFK-Pyrolyseanlage an die MVA bietet die Möglichkeit der Mitnutzung verschiedener Infrastrukturkomponenten, z. B. war zu prüfen, ob die Pyrolysegase in der MVA energetisch verwertet und die vorhandene Rauchgasreinigung mit genutzt werden können.
- Die Einbindung in die MVA bietet voraussichtlich Zugang zu einem energieeffizienten Gesamtkonzept mit Vorteilen für die Wirtschaftlichkeit und die Ökobilanz der CFK-Verwertung, z. B. die Nutzung der MVA-Abwärme für das Aufheizen der Pyrolyseanlage oder die Verteilung der Überschusswärme aus der Pyrolyse im bestehenden Nahwärmenetz der MVA.
- Teil des Konzeptes war die Bewertung der Zweckmäßigkeit einer zusätzlichen kleineren Drehrohrpyrolyseanlagen, mit der minderwertige CFK-Abfälle (Mischabfälle) für entsprechende Einsatzfelder aufbereitet werden können.

- Die ELG zog den Bau einer neuen Pyrolyseanlage in Deutschland in Erwägung. Sie war daher an der Prüfung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit eines integrierten CFK-Verwertungszentrums unter Einbeziehung ihres Pyrolyseprozesses und unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette für das CFK-Recycling interessiert. Die Verwertung der Ergebnisse soll in Deutschland erfolgen.

Zur Integration der pyrolytischen Verwertung von CFK-Abfällen in die Anlage der MVA Geiselbullach müssen an der bestehenden Anlage jedoch einige bautechnische Veränderungen und Anpassungen vorgenommen werden. Im Kern gilt es dabei, den eigentlichen Pyrolyseofen mit der bestehenden Anlagentechnik zu kombinieren. Im Vergleich zu einem kompletten Neubau können aber vorhandene Infrastrukturen, wie z. B. die Rauchgasreinigung mit genutzt werden. Das prinzipielle Konzept ist nachfolgend kurz dargestellt.

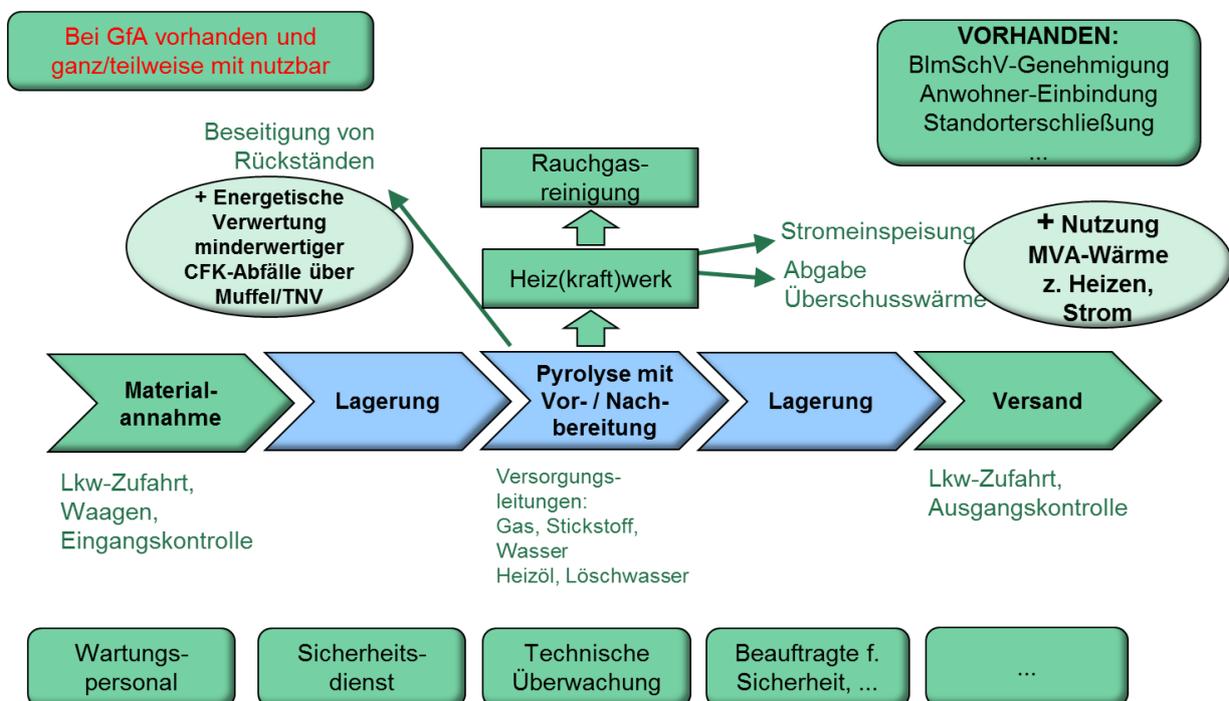


Abbildung 6-17: Konzept für die Integration einer Pyrolyse-Anlage in eine Müllverbrennungsanlage; grün: ganz oder teilweise in der MVA mitnutzbar, blau: neu zu errichtende Kernkomponenten

Die angelieferten CFK-Abfälle sollen zunächst verwogen, nach ihrer Abfallart, –menge und -herkunft registriert, sortiert und entsprechend gelagert werden. Anschließend erfolgt mithilfe eines 3-Wellen-Zerkleinerers die Homogenisierung des Inputmaterials auf eine möglichst einheitliche Korngröße. Dieser zerkleinerte CFK-Abfall wird über einen Trichter in den Pyrolyseofen geschleust.

In dem indirekt beheizten Pyrolyseofen sollen die Abfälle unter Luftausschluss in einem Temperaturbereich von 450 – 600°C verschwelt werden. In der letzten Zone des Ofens er-

folgt eine kurze Nachoxidation, um etwaige Koksreste zu zersetzen. Die festen Pyrolyserückstände (rC-Fasern) sollen nach dem Ofen gekühlt und über ein nachfolgendes Gurtfördersystem abgeführt werden.

Im Kopfbereich des Pyrolyseofens sollen die staubbeladenen Pyrolysegase abgezogen und anschließend in eine Hochtemperatur-Verbrennung eingebracht werden. In dieser Prozessstufe sollen auch die nicht stofflich verwertbaren CFK-Abfälle thermisch verwertet werden. Aufgrund der hohen Temperatur von 1.000 – 1.200°C und der deutlich längeren Verweilzeit ist davon auszugehen, dass die nicht für das Recycling geeigneten Carbonfasern vollständig zerstört werden.

Die entstehenden Gase werden anschließend bei einer Temperatur von etwa 1.200°C in der TNV (Thermische Nachverbrennung) verbrannt. Das entstehende Rauchgas soll sowohl das Heizgas für den Pyrolyseofen mit Energie versorgen, als auch zur Dampferzeugung genutzt werden.

In Abbildung 6-18 ist der bislang fiktive Prozess vereinfacht dargestellt.

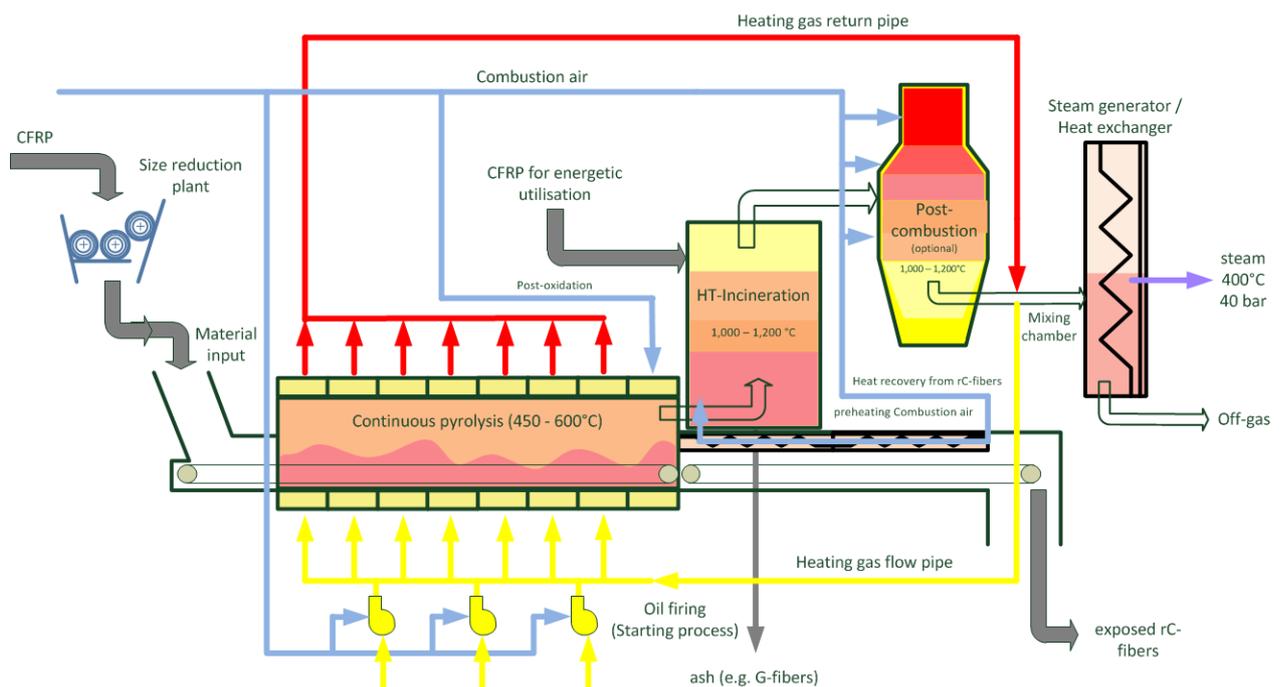


Abbildung 6-18: Verfahrensfliessbild CFK-Pyrolyseanlage (fiktive Anlage)

Zur Anbindung eines CFK Verwertungszentrums an die MVA Geiselbullach müssten an der bestehenden Anlage einige bautechnische Veränderungen und Anpassungen vorgenommen werden. Neben dem Konzept des integrierten Verwertungszentrums am Standort Geiselbullach wurden in der folgenden Wirtschaftlichkeitsanalyse auch die Kosten für eine neue Anlage auf der „grünen Wiese“ bilanziert.

Tabelle 6-3: Kostenvergleich eines integrierten CFK-Verwertungszentrum mit einem kompletten Neubau

	GfA Geiselbullach	„Grüne Wiese“
Durchsatz CFK [t/a]	6,000	6,000
Investitionskosten [€]	100%	184%
Gebäude [€/a]	100%	100%
Bauplatz [€/a]	0	100%
Zubehör [€/a]	100%	127%
Instandhaltung [€/a]	100%	154%
Personal (23 bzw. 24 MA) [€/a]	100%	105%
Mietkosten [€/a]	100%	0%
Sonstiges [€/a]	100%	120%
Gesamtkosten [€/a]	100%	111%

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind folgende Positionen, welche sich auf die Kosten auswirken können, nicht berücksichtigt:

- Einnahmen aus Dampfproduktion und Abwärmenutzung
- Einnahmen aus Verkauf der rC-Fasern
- Einsparungen der bisherigen Entsorgungskosten für CFK
- Overhead und Profit des Anlagenbetreibers

Unter den getroffenen Annahmen zeigt sich, dass die Gesamtkosten des Neubaus eines CFK-Verwertungszentrums auf der „grünen Wiese“ um 11 % höher liegen, als die eines in den Standort Geiselbullach integrierten CFK-Verwertungszentrums. Der Kostenunterschied ist prozentual deshalb relativ gering, weil in beiden Szenarien die Investitionskosten für das Gebäude und die Personalkosten sehr ähnlich sind.

Als nicht zielführend erwies sich die Idee, für minderwertige CFK-Abfälle zusätzlich eine kleine Drehrohrpyrolyseanlage zu installieren. Ein wesentlicher Teil der Technik hätte doppelt installiert werden müssen. Mit einer wirtschaftlichen Realisierung war daher nicht zu rechnen. Stattdessen wurde eine chargenweise Nutzung des Durchlaufpyrolyseofens zur Verwertung minderwertiger CFK-Abfälle vorgesehen.

6.6 Sortierung

6.6.1 Abtrennung von Glasfasern und weiteren Störstoffen

Je nach Inputmaterial können die freigelegten Carbonfasern Verunreinigungen oder Störstoffe enthalten, deren Abtrennung die Qualität der Fasern verbessern würde. Hierzu wurden folgende Verfahren erprobt.

6.6.1.1 Fasersortierung und Störstoffabscheidung mit Korona-Walzenscheider (Fa. Hamos, Penzberg)

In einem Korona-Walzenscheider (KWS) werden die zu trennenden Stoffe mithilfe einer Korona-Elektrode, an der eine Spannung von bis zu 35 kV anliegt, und einer Ablenkelektrode aufgeladen. Trifft das Aufgabegut auf die rotierende Walze im elektrischen Feld, werden die Oberflächen der Teilchen elektrisch aufgeladen. Die leitenden Partikel geben die Ladung unmittelbar an die geerdete Walze ab und werden abgestoßen. Hingegen haften die nicht leitenden Partikel an der Walze, da sie die Ladung nur sehr langsam abgeben können. Am tiefsten Punkt der Walze werden sie durch die Schwerkraft abgeschieden. Es entstehen typischerweise eine Leiterfraktion (L), eine Nichtleiterfraktion (N) und eine Halbleiter- bzw. Mischfraktion (M). Letztere enthält sowohl Leiter als auch Nichtleiter. Getrennt werden die Flugbereiche der Fraktionen durch einstellbare Leitbleche.

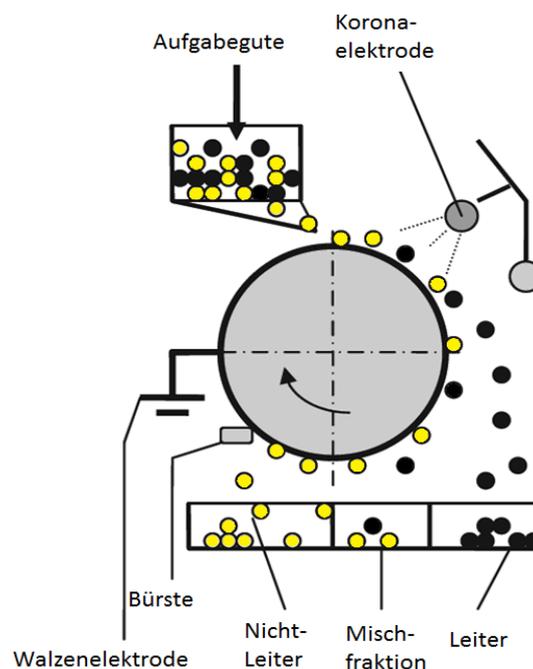


Abbildung 6-19: Funktionsprinzip Korona-Walzenscheider (KWS)

Versuchsdurchführung

Im Herbst 2013 wurde bei der Fa. Hamos GmbH in Penzberg die Eignung des Korona-Walzenscheiders (KWS) zur Abtrennung von Glasfasern aus freigelegten Carbonfasern untersucht. Hierzu wurden in mehreren Versuchsreihen definierte Gemische aus Kohlenstoff- und Glasfasern über den KWS geschickt. Die Trennschärfe des KWS wurde auf die höchste Empfindlichkeitsstufe, mit entsprechend sehr geringen Durchsatzleistungen, eingestellt

Ergebnisse

Mit der Technik kann nur ein geringfügiger Sortiereffekt erzielt werden. Zudem kam es zu erheblichen Materialverlusten durch Ablagerungen, Verwirbelungen und über den Abzug.

Eine erfolgreiche Trennung mit dem KWS erfordert eine Faservereinzelung und ein Vorliegen des Materials in möglichst rieselfähiger Form. Das Material sollte „so grob wie möglich, aber so fein wie nötig“ vorliegen. Die Fasern sollten zudem in vereinzelter Form über die Walze laufen. Offensichtlich ist hier die aufgrund des geringen Faserdurchmessers pro Masseneinheit sehr große Faserzahl der Carbonfasern limitierend. Die Fasern bilden feine gewölleartige Strukturen in die auch Glasfasern eingebunden sind. Auf diese Weise wird ein gutes Trennergebnis verhindert.

6.6.1.2 Dispergierung von C-Fasern

Die Untersuchungen zur Dispergierbarkeit freigelegter Carbonfasern waren unter anderem erforderlich zur Vorbereitung von Flotationsversuchen (s. 6.6.1.3), da die Dispergierung, also Vereinzelung von Fasern im Flotationsmedium Voraussetzung für eine gelingende Trennung von Carbonfasern und Glasfasern ist.

Hierzu wurden zwei Verfahrensansätze verfolgt. Zum einen die Dispergierung mittels Propeller- bzw. Magnetrührer und zum anderen eine Dispergierung mittels Ultraschallbad.

Für die Untersuchungen wurden z. T. oberflächenmodifizierende Zusätze ausgewählt, die als Hilfschemikalien bei der Flotation bekannt sind.

Folgende Versuchsbedingungen bzw. Hilfsstoffe wurden bei den Versuchen variiert:

- Dispergierung ohne Hilfschemikalien zur Bestimmung eines Ausgangswertes
- Dispergierung mit Flotationshilfsmitteln (Polyethylenglykol 400 und Butanol)
- Dispergierung im sauren bzw. basischen Milieu
- Dispergierung mit Natriumlaurylsulfat

Die Versuche wurden mit pyrolysierten Carbonfasern der Faserlänge 6 mm durchgeführt. Die folgende Tabelle zeigt die dabei erzielten Ergebnisse.

Tabelle 6-4: Beispielhafte Ergebnisse von Dispergierversuchen mittels Propellerrührer

Verwendete Chemikalien	Ohne Hilfsmittel	Flotationshilfsmittel	Saures Milieu	Basisches Milieu	Natriumlaurylsulfat
Input	1 g Carbonfasern, 500 ml VE-Wasser	0,5 g Carbonfasern, 500 ml VE-Wasser, 200 ml Polyethylenglycol und 1 ml Butanol	1 g Carbonfasern, 500 ml VE-Wasser, 1 ml Salpetersäure	1 g Carbonfasern, 500 ml VE-Wasser, 0,1 g Natronlauge	0,5 g Carbonfasern, 500 ml VE-Wasser, 0,2 g Natriumlaurylsulfat
Prozessparameter	Ultraschallbad 60 Min.	Ultraschallbad 60 Min.	Ultraschallbad 60 Min.	Ultraschallbad 60 Min.	Ultraschallbad 60 Min.
	Propellerrührer 400 rpm, 60 Min.	Propellerrührer 400 rpm, 60 Min.	Propellerrührer 400 rpm, 60 Min.	Propellerrührer 400 rpm, 60 Min.	Propellerrührer 400 rpm, 60 Min.
	5 Stufe, 60 Min.	5 Stufe, 60 Min.	5 Stufe, 60 Min.	5 Stufe, 60 Min.	5 Stufe, 60 Min.
Ergebnisse	Keine Dispergierung der Fasern erkennbar	Keine Dispergierung der Fasern erkennbar	Keine Dispergierung der Fasern erkennbar	Keine Dispergierung der Fasern erkennbar	Teilweise Dispergierung erkennbar

Bei keinem der verwendeten Hilfsmittel konnte eine befriedigende Dispergierung der Carbonfasern im rein wässrigen Milieu erreicht werden. Lediglich beim Einsatz von Natriumlaurylsulfat, einem anionischen Tensid, konnte eine Verbesserung beobachtet werden, jedoch ist das Gesamtergebnis nicht zufriedenstellend. Es zeigte sich aber, dass die Dispersionserfolge mit abnehmender Fasermenge verbessert werden konnten. Aus diesem Grund wurden bei den anschließenden Flotationsversuchen nur geringe Feststoffanteile eingesetzt.

6.6.1.3 Flotation von C-Fasern

Ziel dieser Versuche war die Abtrennung von Glasfasern aus einem Gemisch freigelegter Carbon- und Glasfasern mithilfe des Flotationsverfahrens. Eine weitere Zerkleinerung bzw. Schädigung der Carbonfasern sollte bei den Versuchen möglichst vermieden werden.

Bei der Flotation handelt es sich um ein Trennverfahren, bei dem in Wasser dispergierte Stoffe aus Stoffgemischen durch in die Flüssigkeit eingetragene feine Gasblasen (in unserem Falle Luft) selektiv an die Wasseroberfläche transportiert werden. Konkret wurde hierbei versucht, die Carbonfasern mit den Luftblasen an die Wasseroberfläche zu tragen. Die polaren Glasfasern sollten am Boden des Flotationsgefäßes sedimentieren.

Bei der Flotation werden verschiedene chemische Hilfsstoffe eingesetzt:

- **Schäumer / Schaumbildner** dienen zum Stabilisieren der Luftblasen. In unserem Fall wurde Polyethylenglykol 400 verwendet.
- **Sammler** haben die Aufgabe den hydrophoben Charakter der Carbonfasern oder den hydrophilen Charakter der Glasfaseroberflächen zu verstärken. In die Suspension

eingeblassene Luft haftet nur an den hydrophoben Fasern und trägt diese zur Wasseroberfläche. Bei den Versuchen kam vorwiegend Butanol zum Einsatz.

In der Abbildung 6-20 ist die Versuchsanordnung schematisch dargestellt. Den Flotationsapparat bilden ein 3l-Becherglas und ein Rotor-Stator-System, welches aus dem Begasungsrührer und dem Rührapparat besteht. Die erforderliche Luft wird durch die Rotation und den dabei entstehenden Unterdruck mithilfe der Rührerhohlwelle der Suspension zugeführt.

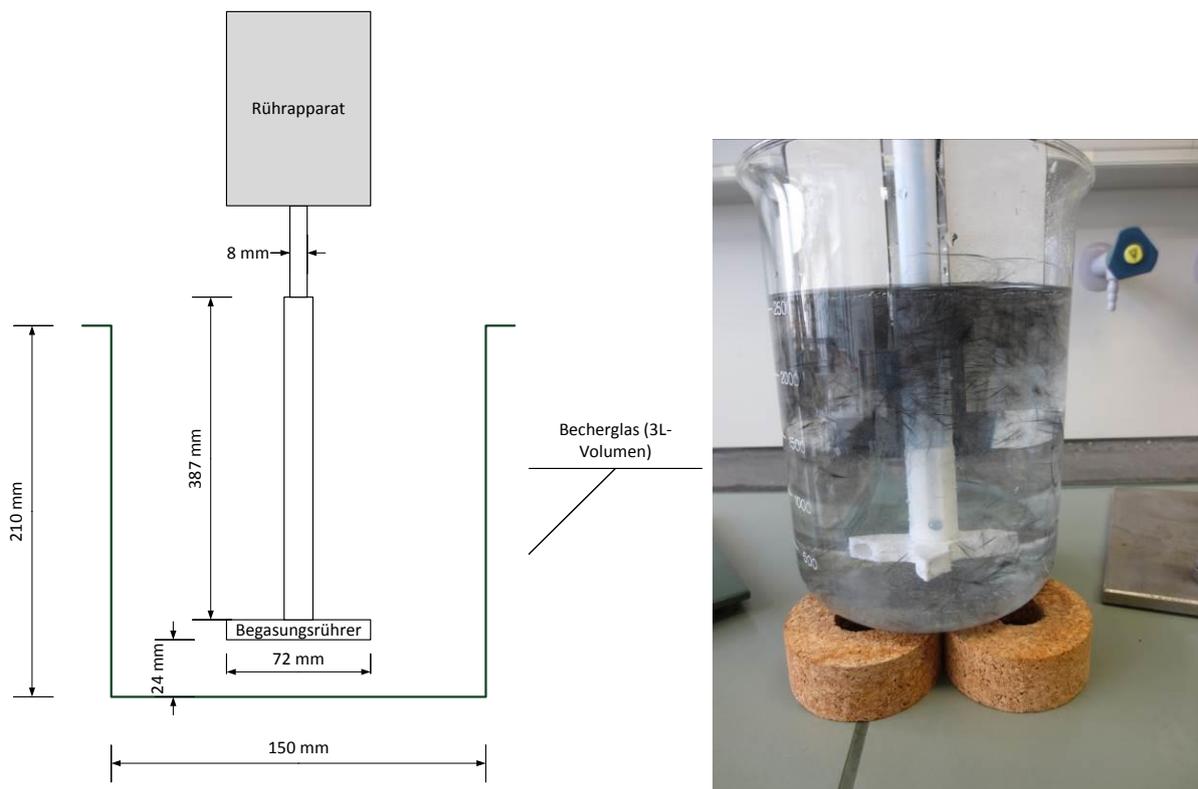


Abbildung 6-20: Versuchsaufbau Flotation

Prozessparameter

Folgende Parameter wurden während der Versuche variiert:

Drehzahl des Begasungsrührers:

Durch Variation der Drehzahl verändert sich der eingetragene Luftdurchsatz und somit die Blasenmenge und -größe. Dies ist ein entscheidender Einflussfaktor auf das Flotationsverfahren.

Änderung des Feststoffgehalts:

Der Erfolg der Flotation ist mit der Menge an zugegebenem Fasermaterial verbunden. Zur Bestimmung des optimalen Feststoffgehalts wurde die zugegebene Faser Menge verändert.

Änderungen der verwendeten Reagenzien:

Durch Variierung der zugegebenen Mengen wurde sowohl die optimale Substanzkombination als auch die jeweilig optimale Substanzmenge ermittelt.

Änderung der Flotationszeit:

Durch die Veränderung der Flotationszeit sollte die erforderliche Verweilzeit der Fasermaterialien in der Flotationszelle ermittelt werden.

Versuchsablauf

Zu Beginn der Versuchsreihe wurde das 3l-Becherglas mit ca. 2 Liter VE-Wasser gefüllt. Die Reagenzien wurden in das Becherglas zugegeben und vermischt. Anschließend wurde das Fasergemisch zugegeben. Für die Versuche wurden pyrolysierte Carbon- sowie Glasfasern mit einer durchschnittlichen Länge von etwa 6 mm verwendet.

Nach kurzer Einwirkzeit der Inhaltsstoffe wurde die Drehzahl des Begasungsrührers auf 800 Umdrehungen pro Minute hochfahren und die Flotation begonnen. Die optimale Rührdauer lag bei etwa 10 Minuten. Nach Beendigung des Rührvorganges wurde das aufschwimmende Konzentrat abgezogen und getrocknet. Der Bodensatz wurde abfiltriert und ebenfalls getrocknet. Die beiden je Versuchsdurchgang entstehenden Fraktionen wurden anschließend auf ihr Carbon- / Glasfaser-Verhältnis hin untersucht.

Ergebnisse

In der Versuchsreihe wurde der Mengenanteil von Carbon- bzw. Glasfasern variiert. Das Gesamtgewicht der Fasern betrug jedes Mal insgesamt 0,5 g, was einem Feststoffanteil der Suspension von 0,025 Masse-% entsprach. Es zeigte sich, dass sich das Flotationsergebnis bei höheren Faseranteilen deutlich verschlechterte.

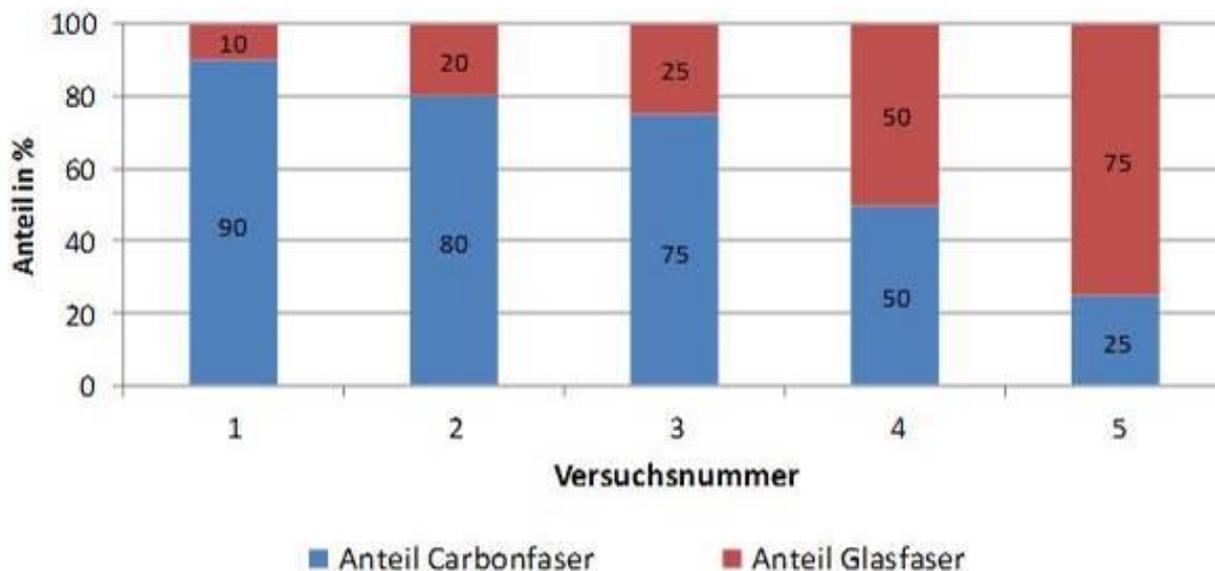


Abbildung 6-21: Mengenanteile von Carbon- /Glasfasern je Versuch

Um das Verhältnis von Carbon- zu Glasfasern in den erhaltenen Fraktionen zu bestimmen, wurden die filtrierte und getrocknete Proben bei 850°C an der Luft erhitzt. Als Rückstand blieb nur das enthaltende Glas zurück.

Die Verteilungen der Fasern in der flотиerten und in der nicht flотиerten Phase stellten sich wie folgt dar:

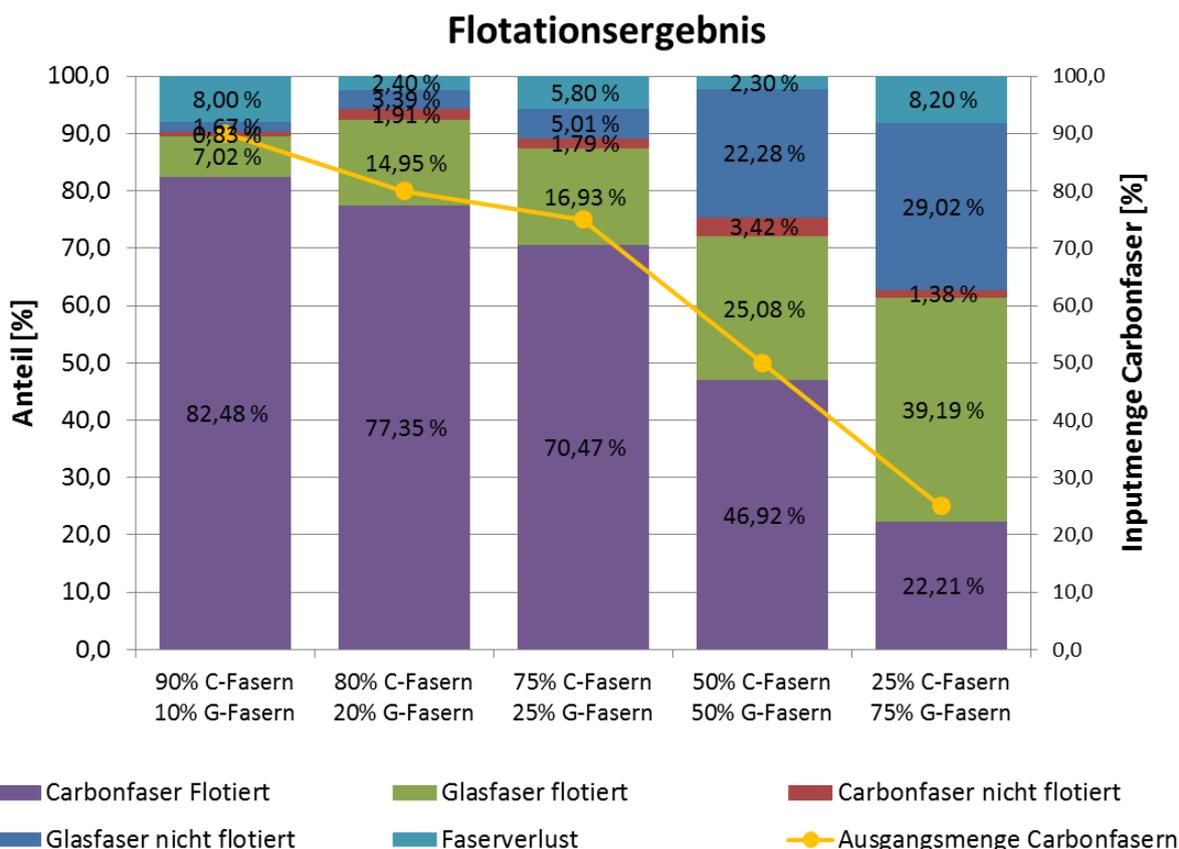


Abbildung 6-22: Verteilung zwischen Carbon- und Glasfasern nach der Flotation

Es zeigte sich, dass in allen Versuchen mehr als 90 % der Carbonfasern flотиert werden. Kleinere Mengen an Glasfasern finden sich ebenfalls in der flотиerten Phase wieder. Die Ursache ist vermutlich, dass diese von aufsteigenden Carbonfasern mit transportiert werden.

Insgesamt erweist sich die Flotation als eine technisch realistische Möglichkeit um Carbonfasern von Glasfasern abzutrennen. Die wirtschaftliche Umsetzung ist auf Grund des geringen möglichen Feststoffgehaltes jedoch fraglich. Durch eine Verbesserung der Faserdispersion könnten weitere Fortschritte erzielt werden. Die Eignung des Verfahrens dürfte aber insbesondere durch die Faserlänge limitiert sein. Je länger die Fasern, desto größer der Anteil mit nach oben gerissener Glasfasern bzw. desto kleiner die mögliche Einwaage.

6.6.2 Bewertung der betrachteten Verfahren

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2.3 wurden von SGL und bifa verschiedene Sortierverfahren für rC-Fasern erprobt. Dabei wurde insbesondere die Trennung von Carbon- und Glasfasern untersucht. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über sämtliche erprobten Verfahren und ihre Bewertung.

Tabelle 6-5: Übersicht erprobter Sortierverfahren für freigelegte Carbonfasern

	Verfahren	Ziel	Ergebnis
sgl	Hydrozyklon	<ul style="list-style-type: none"> Faserlängensortierung Abtrennung von Verunreinigungen 	<ul style="list-style-type: none"> Erhebliche Faserverkürzung Geringfügige Längensortiereffekte
sgl	Schwerflüssigkeits-Dichtentrennung	<ul style="list-style-type: none"> Abtrennung von Glasfasern 	<ul style="list-style-type: none"> Trennversuch erfolgreich Wirtschaftlich nicht realisierbar
sgl	Trennung im elektrischen Feld	<ul style="list-style-type: none"> Faserlängensortierung 	<ul style="list-style-type: none"> Sehr hohe Feldstärken erforderlich Längensortierung nicht erfolgreich
bifa	Elektrostatische Separation	<ul style="list-style-type: none"> Abtrennung von Verunreinigungen (v.a. Glasfasern) 	<ul style="list-style-type: none"> Großer Aufwand zur Faservereinzelnung Sehr geringer Durchsatz Nur geringfügige Anreicherungseffekte
bifa	Flotation	<ul style="list-style-type: none"> Abtrennung von Glasfasern 	<ul style="list-style-type: none"> Deutlicher Trenneffekt Großer Aufwand bei schlechtem Durchsatz => Wirtschaftlichkeit sehr fraglich
bifa	Sichtung (Zickzacksichter und Trenntisch)	<ul style="list-style-type: none"> Abtrennung von Verunreinigungen Abtrennung von Glasfasern 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Abreicherung von Glasfasern Grobe Verunreinigungen (Schrauben o.ä.) abtrennbar
bifa	Luftstrahlsieb	<ul style="list-style-type: none"> Abtrennung von Verunreinigungen 	<ul style="list-style-type: none"> Abtrennung von Staub und Verunreinigungen möglich Probleme durch Gewöllebildung

Zur Abtrennung von Glasfasern ist die Flotation grundsätzlich geeignet, allerdings aufgrund des zur Vereinzelnung der sehr dünnen Carbonfasern extrem hohen Wassereinsatzes wirtschaftlich kaum realisierbar. Zur Separierung von Metallen gibt es verschiedene Möglichkei-

ten. Neben der klassischen Magnetseparation für FE-Metalle kommen hierzu vor allem Dichtentrennverfahren in Frage. Bei allen trockenen Verfahren bereitet allerdings die Staubbildung erhebliche Probleme.

Die großen Schwierigkeiten bei der Aufreinigung pyrolysierter Fasern machen aber vor allem deutlich, wie wichtig eine frühzeitige Abtrennung von Fremdstoffen, insbesondere von Metallen bereits vor der Freilegung der Fasern ist. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Erfassung der Abfälle und die Metallabtrennung nach der Zerkleinerung im Vorfeld der Pyrolyse.

Lediglich in den Bereichen der Längensortierung und der Faserausrichtung führte keines der erprobten Verfahren zu befriedigenden Ergebnissen.

6.7 Großversuch

Ein übergeordnetes Ziel des Projektes MAI Recycling war die Konzeption und Erprobung einer Prozesskette, mit der aus EoL-Bauteilen und Produktionsausschuss rC-Fasern für die Weiterverarbeitung zu verschiedenen Halbzeuge gewonnen werden können.

Hierzu wurde ein Großversuch mit mehr als 3 t CFK-Abfällen (Produktionsabfälle von BMW) durchgeführt. Die folgende Abbildung zeigt den Gesamtprozess in der Übersicht.



Abbildung 6-23: Prozesskette Großversuch (Quelle für Abbildung zur Pyrolyse: ELG Carbon Fibre Ltd.)

Der Entfall der ursprünglich vorgesehenen Pyrolyse in der MPA Burgau verursachte in der Planung des Großversuchs erhebliche Verzögerungen. Der Versuch konnte stattdessen bei der ELG Carbon Fibre Ltd. durchgeführt werden, musste hierzu aber mit entsprechendem Zeitbedarf, vollständig neu geplant und organisiert werden. Aus diesem Grunde, aber auch aus Kostengründen konnte für den Großversuch nur ein Durchgang realisiert werden. Es gab daher keine Möglichkeit, die Erfahrungen aus der Verarbeitung der rC-Fasern zu Halbzeugen zur Durchführung eines weiteren optimierten Versuchsdurchlaufs zu nutzen. Entsprechende Schlussfolgerungen werden jedoch bei der Beschreibung der Ergebnisse von Verarbeitungsversuchen dargestellt.

6.7.1 Vorzerkleinerung

Zu Beginn des Großversuches wurde das Aufgabematerial mithilfe eines 3-Wellen-Zerkleinerers grob zerkleinert. Ziel war es, das CFK-Gemisch für die Pyrolyse vorzubereiten und in ein Kornspektrum zu überführen, das für die Verarbeitungsversuche möglichst gut geeignet ist. Die Zerkleinerung wurde bei der Erdwich Zerkleinerungssysteme GmbH durchgeführt. Nachdem die Zerkleinerung aufgrund der oben beschriebenen Vorversuche gut vorbereitet werden konnte verlief sie gänzlich unproblematisch.

Nach der Zerkleinerung wurde die Korngrößenverteilung durch mehrere Siebschnitte bestimmt. Die folgende Darstellung zeigt die logarithmischen Durchgangssummenkurven. Die Durchgangssummenkurve gibt für jede Korngröße an, wieviel Prozent der Körnung kleiner sind als diese Korngröße. Dies gibt zugleich einen groben Anhalt für die nach der Pyrolyse zu erwartende Faserlängenverteilung.

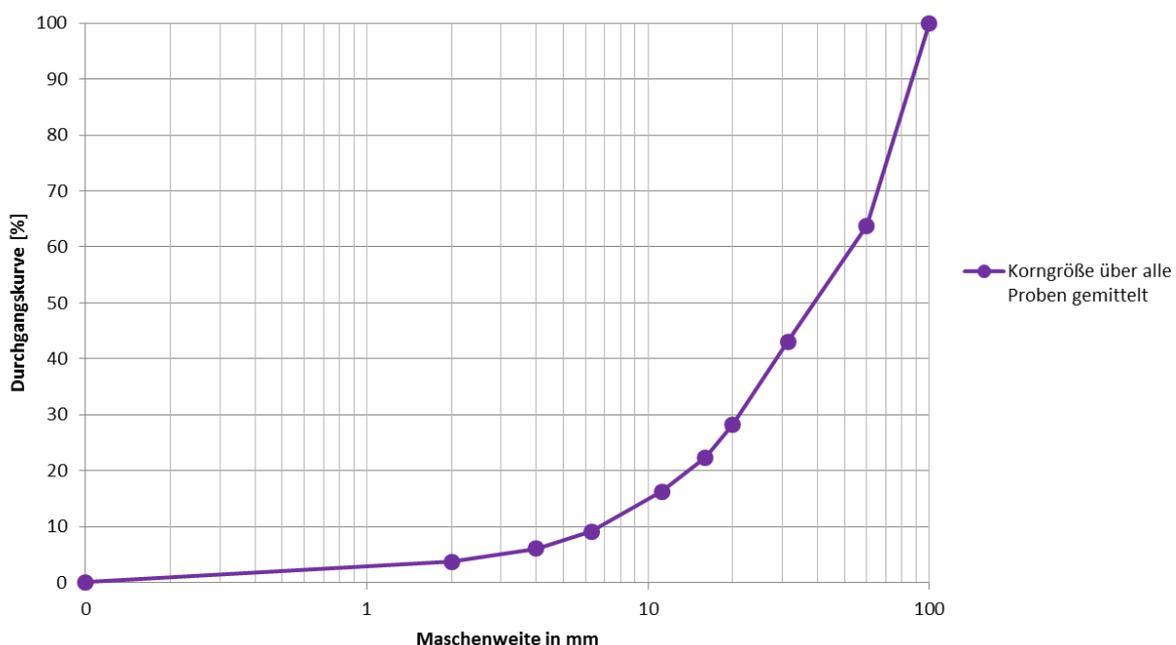


Abbildung 6-24: Korngrößenverteilung nach der Vorzerkleinerung

Die Zerkleinerung ergab eine Korngröße von überwiegend (ca. 55%) zwischen 6 und 60 mm. Zur Abtrennung des Feingutes (< 5 mm) wurde das zerkleinerte Probematerial anschließend bei der TRENNSO TECHNIK - Trenn- und Sortiertechnik GmbH in Weißenhorn auf ein Rüttelsieb aufgegeben. Ziel war es, den Staubanteil in den weiteren Freilegungs- bzw. Verarbeitungsschritten möglichst gering zu halten.

Das verwendete Rüttelsieb verfügte über zwei Siebstufen mit unterschiedlichen Maschenweiten. Der erste Siebboden besaß eine Weite von 60x60 mm und diente dazu, zu große CFK-Teile abzutrennen. Der zweite Siebboden bestand aus Rundlöchern mit einem Durchmesser von jeweils 5 mm und diente dazu, feine CFK-Partikel aus dem Materialstrom heraus zu sieben. Die Partikel, welche einen Durchmesser zwischen 5 mm und 60 mm aufwiesen, fielen zwischen diesen Siebböden an.

Abbildung 6-25 zeigt das Rüttelsieb, sowie die Mengenverteilungen der Korngrößenfraktionen in Bezug auf das Inputmaterial.

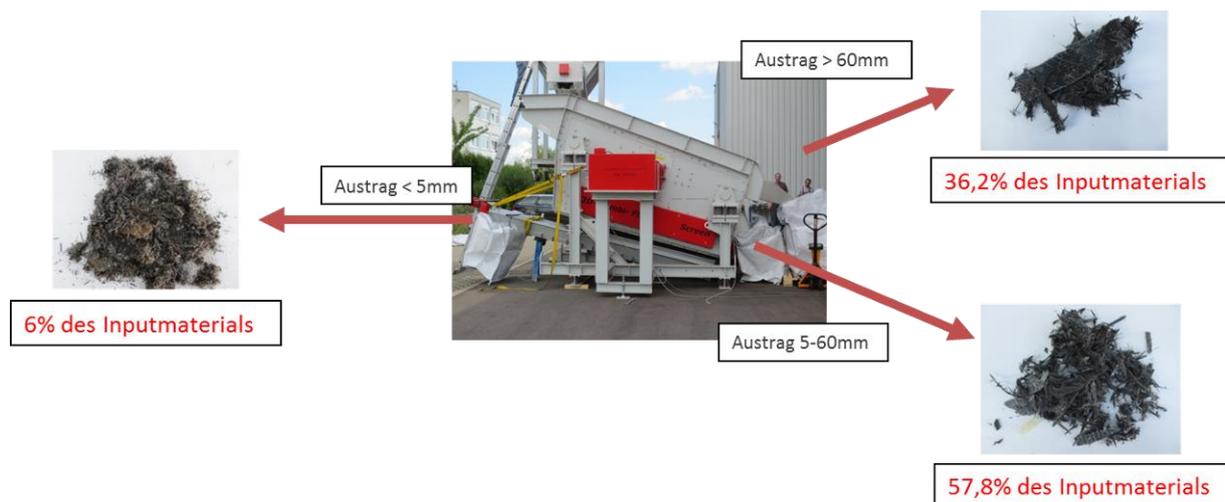


Abbildung 6-25: Rüttelsieb inkl. Verteilung auf die Fraktionen

Der Siebprozess verlief unproblematisch und mit gutem Erfolg. Wegen unerwartet starker Staubentwicklung konnte allerdings nicht die gesamte Menge verarbeitet werden. Knapp 60% des Aufgabegutes der gesiebten Fraktion entfiel auf die Zielkorngröße. Die Fraktion >60 mm ist kommerziellen Betrieb ebenfalls nicht verloren. Sie kann abermals dem Zerkleinerungsschritt zugeführt werden.

6.7.2 Freilegung durch Pyrolyse bei ELG in Coseley

Die Pyrolyse des so erhaltenen Materials erfolgt in der Pyrolyseanlage der ELG Carbon Fibre Ltd. in Coseley (West Midlands, Großbritannien). Die Verarbeitung erfolgte in einem Durchlauf-Pyrolyseofen. Die Verarbeitungsparameter (Temperatur, Verweilzeit, etc.) wurden aus Gründen des Know-how-Schutzes nicht offengelegt.

Pyrolysiert wurden 3.132 kg zerkleinerte CFK-Abfälle. Nach der Pyrolyse wurde ein Output von 1.530 kg rC-Fasern rückgewogen, was einem Gewichtsverlust von 51 Masse-% entspricht. Der weitaus größte Teil dieses Gewichtsverlustes entfällt auf die in der Pyrolyse zersetzte Matrix. Festgehalten werden kann allerdings, dass es insbesondere im Falle kurzfasriger Anteile auch im Pyrolyseschritt zu nennenswerten Faserverlusten kommen kann.

6.7.3 Bewertung der freigelegten Fasern

Die nach der Pyrolyse erhaltenen Carbonfasern wurden zur Beurteilung der Einzelfaserqualität unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet. Hier konnte keine Faserschädigung durch das Freilegungsverfahren festgestellt werden. Ein Teil der in mehreren Chargen pyrolysierten Fasern wies noch geringe Koksanteile auf, andere Chargen waren nahezu vollständig frei von Koksrückständen.

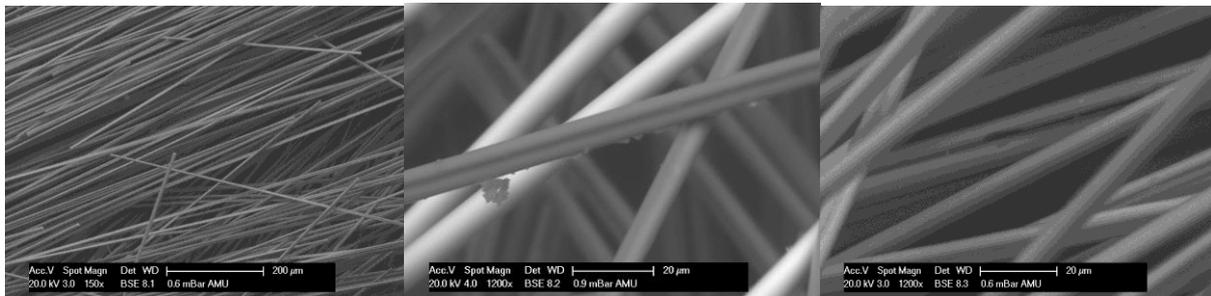


Abbildung 6-26: Freigelegte rC-Fasern unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM)

Beurteilung des thermischen Zersetzungsverhaltens der rC-Fasern in oxidativer Atmosphäre

Eingesetzt wurden rC-Fasern mit geringen Restanhaftungen. Die Versuche wurden mit synthetischer Luft und in sauerstoffreicher Atmosphäre durchgeführt. Die Aufheizrate bis 1.200°C betrug 30 K/Min.

Die Durchflussraten des Gas-Mediums betragen:

- Messung 1: synthetische Luft → 200 ml/min
- Messung 2: synthetische Luft 20ml/min und Sauerstoff 180 ml/min.

Aus den erhaltenen TGA-Diagrammen wird ersichtlich, dass die Zersetzung der Carbonfasern bei beiden Medien bei etwa 300 – 400°C beginnt. Wie erwartet, ist in sauerstoffreicher Atmosphäre eine deutlich schnellere Reaktion zu beobachten. Die Massenänderungen nach Abschluss der TGA lagen in beiden Fällen bei etwa 98 % der Ausgangsmasse. Unter synthetischer Luft vollzieht sich der Zersetzungsprozess deutlich langsamer als in sauerstoffreicherer Atmosphäre. Auch bei Erreichen von 1.200°C ist er noch nicht vollständig abgeschlossen.

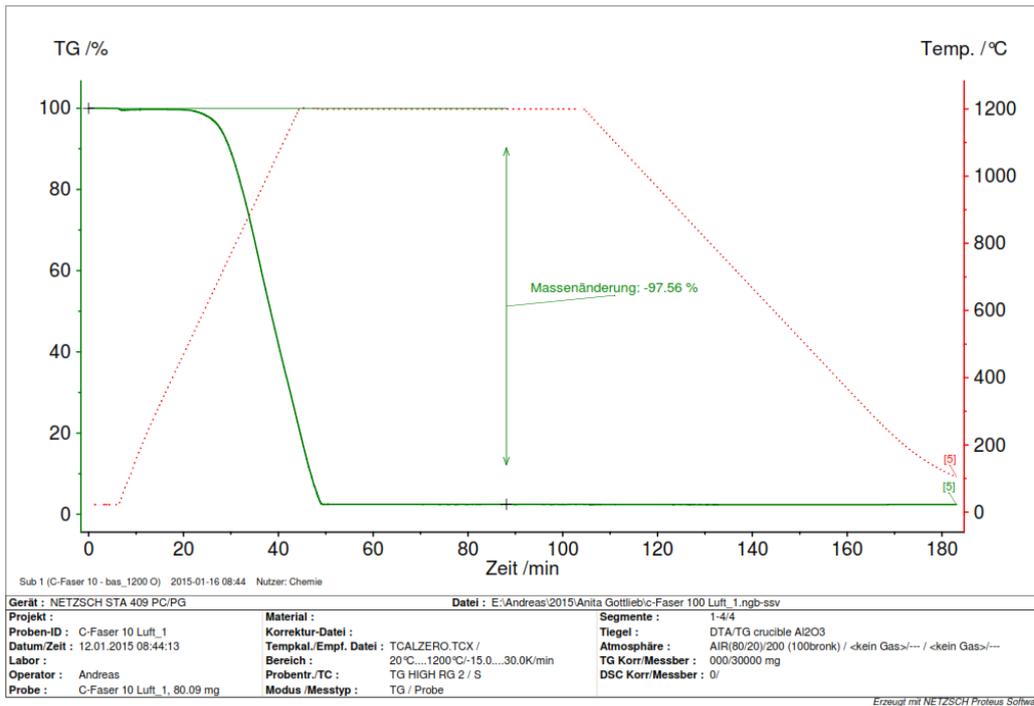


Abbildung 6-27: rC-Fasern; TGA unter synthetischer Luft

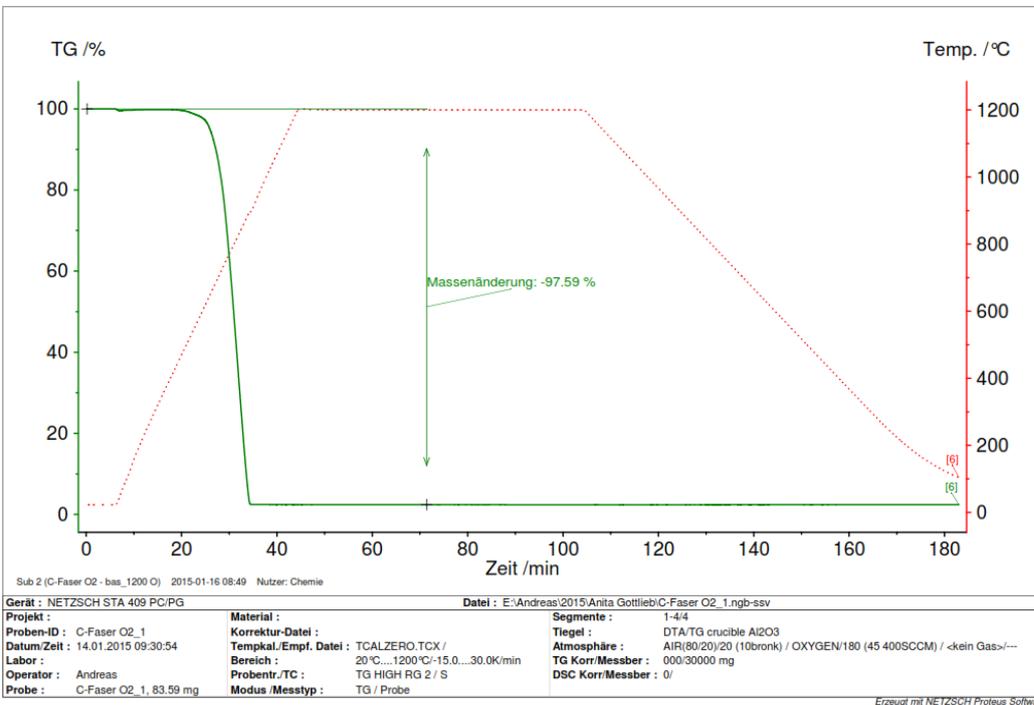


Abbildung 6-28: rC-Fasern; TGA unter 20% synthetischer Luft und 80% Sauerstoff

6.7.4 Schneiden von freigelegten Fasern

Die weitere Verarbeitung der rC-Fasern zu Halbzeugen kann mittels unterschiedlicher Verfahren erfolgen. Jedes dieser Verfahren stellt spezifische Anforderungen an die mittlere Länge der Carbonfasern und an die Faserlängenverteilung. Die Einstellung der Faserlängen kann im Recyclingprozess an zwei Stellen erfolgen. Vor der Zufuhr zur Pyrolyse können durch Vorzerkleinerung der CFK und Siebfraktionierung Faserlängenbereiche voreingestellt werden. Nach der Pyrolyse können auch die freigelegten Fasern geschnitten werden. Da diese Fasern in ungeordneter Form vorliegen und zur Gewöllebildung neigen, ist auch hier eine präzise Schnittlänge nicht möglich.

Für den geplanten Verarbeitungsversuch auf der großtechnischen Papiermaschine bei Nee-nah Gessner wurde eine Faserlänge von 8 mm bis maximal 15 mm angestrebt, da ansonsten Probleme beim Dispergieren und in der Verarbeitung (Bildung von Stippen) auftreten können.

Um pyrolysiertes Material auf diese Zielfaserlänge zu schneiden wurden zwei Verfahren erprobt.

Versuche mit der Schneidmühle bei Hosokawa Alpine AG in Augsburg

Bei der Hosokawa Alpine AG in Augsburg wurden Technikumsversuche mit der Schneidmühle Rotorplex 36/60 bei Siebmaschenweiten von 8 mm und 10 mm durchgeführt. Die folgende Abbildung zeigt das Verfahrensschema.

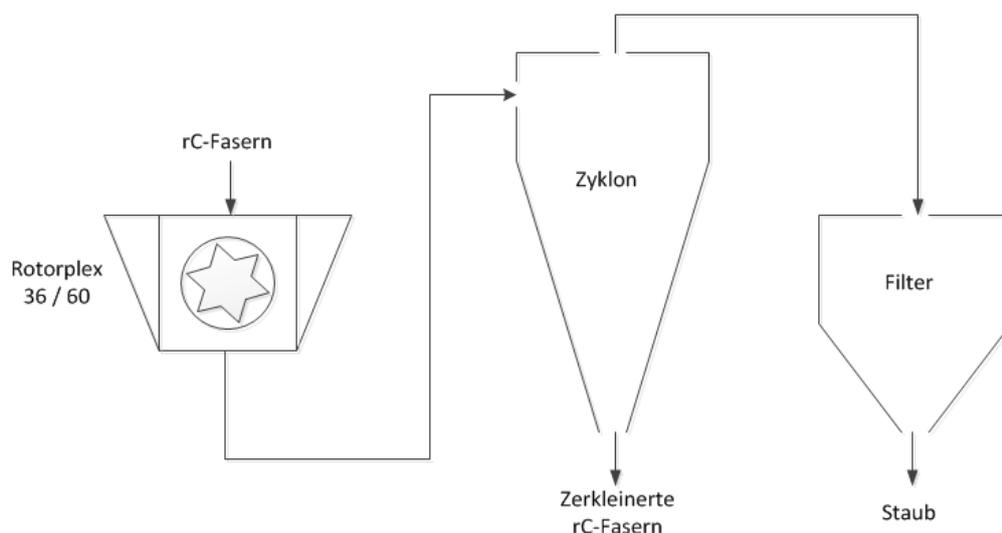


Abbildung 6-29: Verfahrensschema zum Versuch mit einer Schneidmühle bei der Hosokawa Alpine AG

Bei der Zerkleinerung in der Schneidmühle konnte ein starkes Auffasern beobachtet werden, was zu einer deutlichen Volumenzunahme des Materials führte. Aufgrund des beschränkten

den Durchsatzes bei der Absaugung (durch starke Staubentwicklung während des Prozesses) konnte der Durchsatz nicht realistisch bestimmt werden. Durch die starke Aufwirbelung bei der Aufgabe wurde das Material schlecht eingezogen und neigte generell zu starker Knäul- und Brückenbildung.

Folgende Ergebnisse bezüglich der Faserlänge konnten erzielt werden:

- 8 mm Sieb durchschnittliche Faserlänge 12 mm
- 10 mm Sieb durchschnittliche Faserlänge 21 mm

Für die Zerkleinerung von großen Mengen an rC-Fasern ist die Schneidmühle aus den genannten Gründen nicht geeignet.

Versuche mit dem Pierret-Aggregat

Die Versuche mit dem Pierret-Aggregat wurden bei der Wipag Deutschland GmbH Co. KG in Neuburg (Donau) durchgeführt (Verfahrensbeschreibung s. Abschnitt 6.4.1). Die Zerkleinerung verlief problemlos.

6.7.5 Weiterverarbeitung der freigelegten rC-Fasern zu Halbzeugen

Um die Qualität und Verarbeitbarkeit der rC-Fasern beurteilen zu können, wurden verschiedene Prozesse zur Herstellung von Halbzeugen erprobt. In diesen Verarbeitungsversuchen wurden jeweils Mengen von einigen zehn bis einigen hundert Kilogramm der freigelegten Carbonfasern verarbeitet und anschließend Platten nach DIN EN 2565:2013-12 hergestellt, um die Faserkennwerte (Zugfestigkeit, E-Modul) im Vergleich zu Neuware zu analysieren.

Für Trockenlegeverfahren wurde eine Faserlänge von 50–60mm – für Nasslegeverfahren eine Faserlänge von ca. 8–12mm angestrebt.

6.7.5.1 Verarbeitungsversuche zur Herstellung von Trockenvliesen (Mattenhalbzeug)

Die Herstellung von Mattenhalbzeugen aus rC-Fasern wurde bei unterschiedlichen faserverarbeitenden Unternehmen erprobt.

Versuche zur Herstellung von Halbzeugen beim Projektpartner BMW

Die BMW AG führte bei der SGL Automotive Carbon Fibers (ACF) Versuche mit recycelten Carbonfasern (überwiegende Faserlänge ca. 50 – 60mm) aus dem Großversuch an der Krempel für längsorientierte Mattenhalbzeuge und an der ICV-Anlage für quasi-isotrope Mattenhalbzeuge durch. Die Fasern waren mit beiden Verarbeitungsprozessen verarbeitbar.

Die verarbeiteten rC-Fasern enthielten neben den aufgeschlossenen Einzelcarbonfasern und Faserbündeln noch ca. 15% koksverklebte Fasern. Außerdem war ein hoher Anteil an Staub und Kurzfasern zu beobachten, was bei der Verarbeitung zu starker Staubbelastung führte. Bei der Verarbeitung der Versuchsmengen traten keine technischen Probleme auf. Inwieweit dies für einen kontinuierlichen Betrieb zutrifft, ist schwer abzuschätzen, da es zu einem ver-

stärkten Zusetzen von Garnituren und anschließenden Folgeproblemen durch die Staubbelastung in den Fasern kommen könnte.



Abbildung 6-30: Vliesmuster aus rC-Fasern

Durch die hohe Fasersprödigkeit in Kombination mit der reduzierten Faserzugfestigkeit der rC-Fasern wurde die Faserstaubbildung während der Verarbeitung an der ICV-Anlage begünstigt, Aufgrund dessen kam es nach relativ kurzer Zeit zum Zusetzen und Verstopfen der Speisewalze.

Aus beiden Vliesen wurden Prüfplatten hergestellt. Durch die enthaltenen Anteile koksverklebter Faserbündel und die geringere Faserfestigkeit kam es zu Störungen im Prozess und zu niedrigen mechanischen Kennwerten im Verbund.

Die Versuche zeigten, dass für eine stabile Produktion von Mattenhalbzeugen auf den Verarbeitungsanlagen die Einstellparameter an die Besonderheit von rC-Fasern angepasst werden müssen.

Tabelle 6-6: Mechanische Kennwerte von Verbundplatten aus Vlieshalbzeugen mit einem Faservolumenanteil von ca. 31,5%

Vlieshalbzeug gekrempelt (längs orientiert)						
PP-Platte	E-Modul [MPa]			Zugfestigkeit [MPa]		
Platte	längs	quer	Anisotrop	längs	quer	Anisotrop
rC-Fasern	34310	13860	2,48	235	92,3	2,55
Neuware	29300 bis 34700	9500 bis 11800	2,48-bis 3,49	202 bis263	73,7 bis 90,4	2,47 bis 3,32
EP-Platte						
EP-Platte	E-Modul [MPa]			Zugfestigkeit [MPa]		
Platte	längs	quer	Anisotrop	längs	quer	Anisotrop

rC-Fasern	36790	17880	2,06	244	119	2,05
Neuware	40520 bis 11660	17055 bis18963	2,24 bis 2,54	352 bis 423	153 bis181	1,99 bis 2,57

Isotropes Carbonfaservlies ICV (quasi-isotrope Faserausrichtung)					
EP-Platte	E-Modul [MPa]			Zugfestigkeit [MPa]	
Platte	längs	quer		längs	quer
rC-Fasern Platte 1	22430	13860		235	92,3
rC-Fasern Platte 2	26320				
Neuware	21000 bis 25000	28000 bis 32000		160 bis 200	230 bis 260

Sowohl der Anteil an Restkoksverklebungen als auch der Anteil an Kurzfasern können durch entsprechende Steuerung der Vorzerkleinerung, durch konsequentes Absieben der Feinfraktion sowie durch Anpassung der Pyrolyseparameter erheblich vermindert werden. Auf diese Weise kann die Verarbeitbarkeit der Fasern noch einmal deutlich verbessert werden.

Versuche zur Herstellung von Trockenvlies bei der Fa. Autefa Solutions Germany GmbH in Friedberg

Analoge Versuche bei Autefa zeigten ähnliche Erkenntnisse wie bei der Verarbeitung bei der SGL Automotive Carbon Fibers (ACF). Hinderlich im Legeprozess war vor allem der Anteil an kurzen Fasern mit einer Faserlänge < 15 mm. Bei Trockenlegeverfahren ist der Anteil an Fasern < 50 mm und der Staubanteil möglichst gering zu halten.

Die oben genannten Hinweise zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit gelten hier in gleicher Weise.

6.7.5.2 Verarbeitungsversuche zur Herstellung von Nassvliesen

Die Herstellung von Papieren aus Kohlefasern ist bereits ein etabliertes Verfahren. Solche Papiere können zur Weiterverarbeitung in der Bauteilfertigung oder zum Beispiel als elektrisch leitendes Papier zum Einsatz kommen. Der Einsatz von recycelten Materialien ist für dieses Verfahren durchaus denkbar, da hier, je nach Anwendung, nicht nur die Festigkeitswerte ausschlaggebend sind.

Versuche bei RESO Oberflächentechnik GmbH

Die Reso Oberflächentechnik GmbH & Co. KG. bearbeitet Metalle, Polymere und Verbundwerkstoffe in einem niederenergetischen plasmaphysikalischen Vakuumprozess, um zum

Beispiel eine Erhöhung der Leitfähigkeit, Verschleißreduzierung oder Härtesteigerung bei Bauteilen zu erreichen. Zu diesen Zwecken kommen Papiere aus Kohlefasern zum Einsatz. Laborversuche mit den rC-Fasern zeigten, dass deren Dispergierbarkeit im RESO-Verfahren schlechter ist als im Falle von Neuware. Die rC-Fasern mussten länger behandelt werden, um ein Blatt herstellen zu können. Die Verteilung der Fasern gelang recht gut. Aufgrund der teilweise unvollständigen Freilegung der Fasern bei der Pyrolyse konnten vereinzelt vorhandene, noch Koksreste enthaltende Faserbündel nicht getrennt werden, was zu ungleichmäßigen Blattoberflächen führte.



Abbildung 6-31: Oberfläche von Carbonfaservlies (Quelle Helfer Papier/RESO GmbH)

Die Carbonfaservliese sind vor allem für den Einsatz als elektrisch leitende Papiere vorgesehen.

Generell ist davon auszugehen, dass Fasern, nach Optimierung der Freilegung bzw. des Weiterverarbeitungsverfahrens eingesetzt werden können und Neufasern in bestimmten Bereichen ersetzen können.

Großversuch auf der Papiermaschine bei der Neenah Gessner GmbH

Auf einer Papiermaschine des Projektpartners wurde ein Großversuch mit rC-Fasern aus der Pyrolyse durchgeführt.

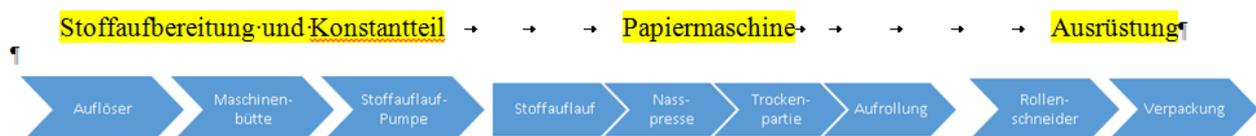


Abbildung 6-32: Papierprozess bei Neenah Gessner

Zunächst wurden die Fasern bei der WIPAG Deutschland GmbH & Co. KG auf ca. 8-12mm Länge geschnitten. Das Schneiden erfolgte als trockener Prozess mit einer komplett eingehausten Pierret Schneidemaschine. Bei diesem Guillotine-Schneidverfahren, das vor allem zum Zerkleinern von Fasern eingesetzt wird, erfolgt das Schneiden durch die Hin- und Herbewegung des beweglichen Messers. Die geschnittenen Fasern wurden in BigBags verpackt und an Neenah Gessner zur Verarbeitung gegeben.

Der Versuch wurde analog zu einem Versuch gefahren, der mit nicht eingebetteten Carbonfaserabschnitten aus der Fertigung durchgeführt wurde. Das Handling des Materials erwies sich als schwierig, da beim Eintrag trotz vorheriger Befeuchtung der Big Bags starke Staubentwicklung auftrat. Während des Versuches in der Maschine war keine erhöhte Staubentwicklung zu beobachten. Es zeigte sich, dass ein Wässern der geschnittenen Fasern nach dem Abpacken in Big Bags nicht zu einer durchgängigen Befeuchtung führt. Das Material muss daher nass in Big Bags abgefüllt werden, um das Handling zu erleichtern.

Der Maschinenlauf während des Versuches war unauffällig. Lediglich beim Leerfahren der Behälter ging die Förderleistung der Pumpen zurück. Aus diesem Grunde wurde der Versuch vorzeitig abgebrochen.



Abbildung 6-33: Im Rahmen des Großversuchs bei Neenah-Gesner aus Pyrloysefasern hergestelltes carbonfaserhaltiges Papier (Foto: Neenah-Gessner)

Das erhaltene rC-Faserpapier war von überwiegend guter Qualität, wies jedoch noch zu viele Stippen auf, die zum Teil auf der Papierbahn aufschwimmen und so keinen festen Verbund zum Papier haben.

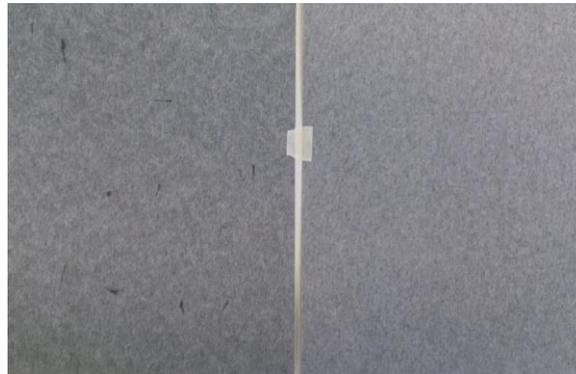


Abbildung 6-34: Links rC-Fasern, rechts Neufasern (Quelle Neenah Gessner)

Auch bei diesem Verfahren ist davon auszugehen, dass nach Optimierung der Parameter ein Einsatz von rC-Fasern möglich ist. Eine Anpassung der Vorkette ist hierzu in folgenden Bereichen erforderlich: Der Anteil sehr kurzer Fasern sollte durch konsequentes Absieben des Feinanteils im Rahmen der Vorzerkleinerung vor der Pyrolyse reduziert werden. Die Pyrolyseparameter sind so anzupassen, dass Restkoks vermieden wird. Durch nasses Abfüllen der Fasern in Big Bags ist vor der Verarbeitung auf der Papiermaschine vollständige Befeuchtung zu gewährleisten.

6.7.6 Verarbeitungsversuche zur Carbon-Compoundierung für den Spritzguss bei der WIPAG Deutschland GmbH & Co. KG

Vor allem im Bereich Compounding liegt der Einsatz von rC-Fasern nahe. Deshalb wurden zusammen mit WIPAG Versuche zur Herstellung von rC-Faser-Compounds durchgeführt. Es wurden zwei verschiedene thermoplastische Matrixkunststoffe eingesetzt, nämlich Polyamid 6 (PA 6) und Polypropylen (PP). Während der Extrusion wird die Faserlänge auf ca. 200µm verkürzt. Die folgende Abbildung zeigt die Prozesskette des Carbon Compounding.



Abbildung 6-35: Prozesskette Carbon Compounding bei WIPAG

Die folgende Tabelle zeigt die Eigenschaftsprofile von Prüfkörpern, die mit Carbonfasern aus dem Großversuch hergestellt wurden, im Vergleich zu Prüfkörpern aus Neuware.

Tabelle 6-7: Carbon Compounding bei WIPAG - Eigenschaftsprofile von Prüfkörpern mit Carbonfaser-Neuware und rCF

	Standard	DIM	WIC PA6 20 compound black		WIC PP20 compound black	
			Data sheet (virgin fiber)	rC-fiber	Data sheet (virgin fiber)	rC-fiber
Melt flow index MVR 230/2, 16	ISO 1133	cm ³ /10 min		46,11	20 ± 5	26,2
Impact resistance (23°C) 1eU 4J	ISO 179	kJ/m ²	50 ± 5	48,6 ± 1,6 C*	47 ± 5	36,3 ± 3,1 C*
Notch toughness (23°C) 1eA 0,5J	ISO 179	kJ/m ²	6 ± 2	5,1 ± 1,6 C*	9 ± 2	6,1 ± 1,1 C* + H*
Young's modulus 1mm/min 1A	ISO 527/2	Mpa	13.000 ± 800	13.326 ± 52	8.400 ± 400	8.151 ± 119
Tensile strength (RM) 5mm/min 1A	ISO 527/2	Mpa	155 ± 8	160,9 ± 0,5	73 ± 5	72,2 ± 1,2
Tear strength (RB)	ISO 527/2	Mpa	155 ± 8	160,7 ± 0,5	73 ± 5	71,9 ± 1,2
Elongation at break (AB)	ISO 527/2	%	1,4 ± 0,2	1,5 ± 0,1	2,4 ± 0,3	1,5 ± 0,2
Ash content (1h/500°C)	ISO 3451-1	%	20 ± 3	15,6	20 ± 3	17,6
Number of test specimen			10	10	10	10
Density	ISO 1183-1	g/cm ³	1,22 ± 0,02		1,02 ± 0,02	

C* = complete rupture H * = hinge rupture

Bei Einbindung in PA6 liegen die Prüfkörpereigenschaften für rCF innerhalb der Fehlertoleranzen gleichauf mit denen für Neuware. Die Ergebnisse mit PP fallen teilweise deutlich hinter die mit Neuware erzielten Resultate zurück. Den Eigenschaftsverlusten kann jedoch durch Einsatz entsprechender Additive entgegengewirkt werden.

6.7.7 Verarbeitungsversuche zur FIM-Faserblastechnik bei der Fiber Engineering GmbH in Karlsruhe

Der Projektpartner VOITH Composites GmbH & Co. KG hat Carbonfasern aus dem Großversuch bei der Fiber Engineering GmbH in Karlsruhe zur Verarbeitung mit der FIM-Faserblastechnik eingesetzt.

Mit der FIM-Technologie werden 3D-Formteile mit homogener und inhomogener Dichte bei gleicher oder ungleicher Wandstärke hergestellt. In diesem Verfahren ist es möglich ein breites Spektrum an Faserstoffen gezielt einzusetzen. Die Möglichkeiten des Verfahrens liegen in der Kombination von Endlos- und Langfasern in einem integrierten Verfahren zur Herstellung von hochbelastbaren, preiswerten Bauteilen. Dabei werden Langfasern für die Grund-

geometrie und Endlosfasern für Belastungsstruktur verwendet. Das Anbinden der Endlosfasern erfolgt durch Insert- oder Metalleinleger.

6.8 Prozessbewertung

6.8.1 Prozessbaukasten

Die Prozesskette für das Recycling von CFK kann durch Kombination unterschiedlicher Prozessschritte auf vielfältige Weise gestaltet werden. Zahlreiche Teilprozesse wurden im Projekt MAI Recycling erprobt und fortentwickelt. Diese Teilprozesse wurden klassifiziert und zu einem Prozessbaukasten zusammengeführt, aus dem je nach Input-Material und Weiterverarbeitungsverfahren zur Herstellung von Halbzeugen jeweils geeignete Prozessketten zusammengestellt werden können (Abbildung 6-36).

In den Spalten 1 und 2 sind die möglichen Input Materialien aufgelistet, unterteilt nach Quelle (Aufkommen des Abfallstromes) und Art der Matrix (z. B. Duroplaste). Für das jeweils angefallene Input-Material kann in den Prozessschritten 3 bis 10 ein geeignetes Verfahren ausgewählt werden. Somit entstehen stoffspezifische Prozessketten. Der Prozessbaukasten kann bspw. wie folgt verwendet werden:

Duroplastisches (2b) CFK-Material, welches als Produktionsausschuss (1b) anfällt, muss nicht speziell demontiert (3a) werden. Eine Vorzerkleinerung erfolgt mithilfe eines Schredders (4b) und die Störstoffseparierung sowohl vor (5a) als auch nach (7a) der pyrolytischen Freilegung (6b) entfällt. Zur Herstellung einer möglichst einheitlichen Faserlängenverteilung werden die freigelegten Fasern geschnitten (8b) und benötigen keine weitere Konditionierung (9a). Die Verarbeitung zu einem entsprechenden Halbzeug erfolgt im Nasslegeverfahren (10a).

Die im Prozessbaukasten rot umrahmten Prozesse haben sich während der Bearbeitung des Gesamtprojektes als nicht zielführend herausgestellt und wurden deshalb nicht weiter verfolgt.



Abbildung 6-36: Prozessbaukasten zur stofflichen Verwertung von CFK-Material

6.8.2 Bewertung der Einzelprozesse

Zur Bewertung dieser Einzelprozesse wurde ein Bewertungsbogen entwickelt. Der Bogen umfasst folgende Kriterien, zu denen jeweils ein qualitatives oder halbquantitatives Skalierungsraaster entwickelt wurde:

- Entwicklungsstand
- Automatisierungsgrad
- Faserverlust
- Robustheit gegenüber Fremdstoffen
- Flexibilität gegenüber CFK-Zusammensetzung
- Einfluss auf Faserlänge
- Einfluss auf Qualität Faseroberfläche
- Einfluss auf Zugfestigkeit
- Einfluss auf Schüttdichte
- Investitionskosten
- Betriebskosten
- Kosten für Entsorgung/Aufbereitung von Reststoffen
- Energiebilanz
- Staubentwicklung
- Emissionen Luft: erforderliche Minderungsmaßnahmen
- Emissionen Wasser: erforderliche Minderungsmaßnahmen
- Erforderliche Arbeitssicherheitsmaßnahmen

Die folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus dem Bewertungsraster. Sämtliche Prozesse des Prozessbaukastens wurden nach diesem Schema bewertet.

Bewertung des Verfahrens:

Unter den Kriterienbezeichnungen ist jeweils das Bewertungsraster dargestellt. Bsp.: Ein Verfahren im Entwicklungsstand „Technikumsmaßstab“ wird mit „3“ bewertet => Kreuz in Spalte „3“

Kriterium	1	2	3	4	5	Kommentar
Entwicklungsstand <ul style="list-style-type: none"> 1: Labormaßstab 3: Technikumsmaßstab 5: Produktionsmaßstab 						
Automatisierungsgrad <ul style="list-style-type: none"> 1: Vollständig manuell 2: Weitgehend manuell 3: Zu wesentlichen Teilen automatisiert 4: Weitgehend automatisiert 5: Vollständig automatisiert 						
Faserverlust <ul style="list-style-type: none"> 1: Größer 20 % 2: 10 bis 20 % 3: 5 bis 10 % 4: 1 bis 5 % 5: Kleiner 1 % 						
Robustheit gegenüber Fremdstoffen (Metalle, Glasfasern, Kunststofffasern) <ul style="list-style-type: none"> 1: keine Verunreinigungen zulässig 2: geringe Anteile (< 1%) zulässig 3: Moderate Anteile (< 10%) und kleine Metallteile (< 3mm) zulässig 						

Abbildung 6-37: Bewertungsraster für Prozessschritte des Prozessbaukastens.

6.8.3 Verlustanalyse

Um im Laufe des gesamten Recyclingprozesses zu erwartende Faserverluste orientierend abzuschätzen, wurde beim 7. Arbeitstreffen ein Workshop durchgeführt. Im Vorfeld dazu erhielten die Unternehmen einen Fragebogen zum Thema. In Gruppenarbeit wurde folgende Teilbereiche der Recycling-Prozesskette in Bezug auf mögliche Verluste und Maßnahmen zur Verlustreduzierung betrachtet:

- Erfassung/Bauteilsortierung, Konfektionierung für Freilegung
- Freilegungsverfahren
- Aufbereitung der freigelegten Fasern
- Verarbeitung zu marktfähigen Produkten

Die Ergebnisse wurden anhand einer vereinfachten Prozesskette dargestellt.

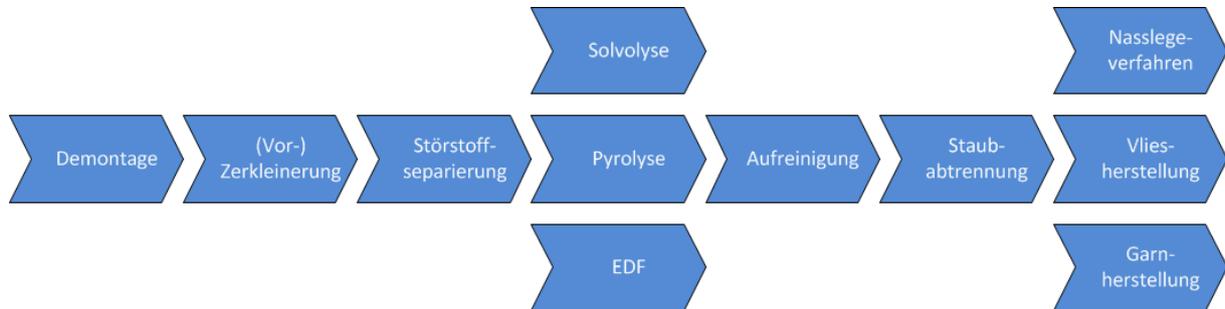


Abbildung 6-38: Vereinfachte Prozesskette

Es wurde davon ausgegangen das alle Freilegungsverfahren ähnliche Verluste aufweisen und das Referenz-Inputmaterial wie folgt zusammengesetzt ist:

- 65 Gew.-% Carbonfasern
- 20 Gew.-% Harzanteil
- 10 Gew.-% Fremdstoffe
- 5 Gew.-% Glasfasern

Die Darstellung der erarbeiteten Mengenflüsse erfolgte über Sankey-Diagramme. Es wurden verschiedene Verlustszenarien durchgespielt. Abbildung 6-39 zeigt beispielhaft die mittleren Verluste einer dieser Abschätzungen bezogen auf C-Fasern, bei einer Inputmenge von einer Tonne CFK-Material.

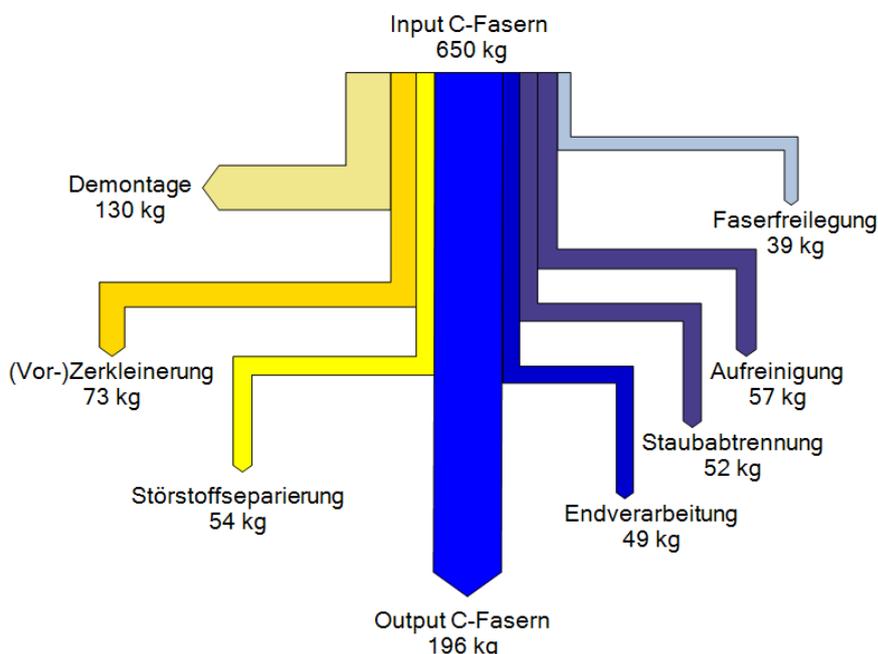


Abbildung 6-39: Mittlere Verluste an C-Fasern, Beispiel

Obwohl es sich hier nur um eine orientierende Abschätzung handelt, wird deutlich, dass über die gesamte Prozesskette mit erheblichen Faserverlusten gerechnet werden muss. Im dargestellten Beispiel beträgt die Ausbeute an rC-Fasern ca. 30%. Die folgende Tabelle zeigt zusätzlich die Ergebnisse für worst und best case-Abschätzungen.

Tabelle 6-8: Orientierende Abschätzung der Faserausbeuten in der gesamten Recyclingkette

	Minimale Ausbeute	Durchschnitt	Maximale Ausbeute
Anteil an CFK-Input [%]	9 %	20 %	41 %
Anteil an C-Faser-Input [%]	13 %	30 %	63 %

Für die Verlustreduzierung sind unter anderem Art und Zahl der Prozessschritte bei der Aufbereitung entscheidend: je größer die Zahl der Prozessschritte, desto größer auch die Zahl der möglichen Verlustquellen. Von großer Bedeutung ist die Art des Inputmaterials. Bei einem großen Anteil an Fremdmaterialien, wie z.B. Metallen, in eher feiner Verteilung ist mit erheblichen Carbonfaserverlusten durch die Fremdstoffabtrennung zu rechnen.

Zur Verlustminimierung ist insbesondere eine gute Abstimmung der Gesamtprozesskette auf die Anforderungen des Verfahrens erforderlich. Wesentlich ist zudem eine

angepasste Zerkleinerungstechnik. Und schließlich kann die Realisierung von Lösungen für die Erfassung und Verwertung von Feinanteilen bzw. Stäuben dazu beitragen ungenutzte Faseranteile zu reduzieren.

6.8.4 Entwicklungsbedarf

Über die Verlustreduzierung hinaus besteht in der gesamten CFK-Recyclingkette vor allem in folgenden Feldern Handlungsbedarf:

- Ein gut geführter Pyrolyseprozess liefert freigelegte Carbonfasern von guter Qualität. Die Herausforderungen liegen weniger im Festigkeitsniveau der pyrolysierten Einzel-Fasern, als in Schwankungen der Inputqualität und der Faserlängenverteilung.
- Die Faserlängenverteilung sollte über gezielt an die Anforderungen der Halbzeugherstellung angepasste Zerkleinerungstechnik definierter und enger werden.
- Die meisten Verfahren zur Herstellung von Halbzeugen führen noch zu erheblichen verfahrensbedingten Schwankungen zentraler Halbzeugeigenschaften (z.B. Faservolumengehalt).
- Aus CFK-Abfällen freigelegte Carbonfasern unterscheiden sich erheblich von Neuware. So sind Recyclingfasern keine Endlosfasern. Sie weisen typischerweise eine relativ breite Faserlängenverteilung auf. Verunreinigungen wie z.B. Glasfasern sind nur bei separater Verarbeitung nicht mit anderen Stoffen vermischter CFK-Abfälle zu vermeiden. Einheitliche Carbonfasertypen sind nur bei separater Verarbeitung definierter CFK-Abfälle zu erzielen. Bei der Pyrolyse sind geringfügige Koksreste nicht immer verlässlich zu vermeiden. Aus diesen Gründen können Recyclingfasern nur in Ausnahmefällen (v.a. Compounding) 1:1 Neuware ersetzen. Es müssen also die Verarbeitungsverfahren und vor allem die Produktdesigns an die realen Gegebenheiten dieses Materials angepasst werden. Das ist eine Aufgabe, die Kooperation entlang der gesamten Verwertungskette erfordert.
- Die Zielgrößen sämtlicher Schritte der Verwertungskette sollten zudem wesentlich besser aufeinander abgestimmt werden. Hierzu sollte die gesamte Kette von der Abfallcharakterisierung bis zur Verarbeitung der freigelegten Fasern auf die Anforderungen konkreter Verfahren zur Herstellung von Halbzeugen zugeschnitten sein. Langfristig kann es aufbauend auf eine solche verfahrensspezifische Abstimmung zur Entwicklung von Recyclingfaser-Commodities kommen.

6.9 Zuordnung zu den Arbeitspaketen

Tabelle 6-9: Arbeitspakete und Verweise auf die Kapitel, in denen die AP behandelt werden

AP	S. Kapitel
AP 0 Wissensmanagement, Innovationstransfer u. Projektkoordination	5; 6.1
AP 1 Assessment und Konzeptentwicklung effizienter Recycling-Prozessketten	
AP 1.5: Assessment und Konzepte der 4 betrachteten Trennverfahren	6.5
AP 1.5.1: Duromer basiertes CFK: Pyrolyse	6.5
AP 1.6: Assessment und Konzepte für Sortierung der getrennten Faser/Matrix/Füllstoffe	6.6
AP 1.9: Abschließende Bewertung der Zwischenergebnisse aus AP 1	6.5; 6.6
AP 2 Technologieentwicklung und Optimierung	
AP 2.2: Technologieentwicklung und Optimierung der 4 betrachteten Trennverfahren	6.5
AP 2.2.1: Pyrolyse (Fokus auf Optimierung Oberflächengüte + Großserientauglichkeit)	6.5; 6.6
AP 2.3: Technologieentwicklung und Optimierung für Aufbereitung und Sortierung der Fasern	6.2; 6.3; 6.4; 6.5; 6.6
AP 2.7 Umsetzung an Anlagen für experimentelle Erprobungszwecke	6.5; 6.6
AP 3 Machbarkeitsdemonstration und Validierung im Technikumsmaßstab	
AP 3.1: Definition verfahrensabhängige Versuchsreihen	6.7; 6.8.1
AP 3.2: Durchführung systematischer Versuchsreihen auf "Coupon-Level"	6.7
AP 3.2.1 Recyclingversuche (d.h. je nach Trennverfahren) + Prozessanalyse	6.4; 6.5; 6.6; 6.7, 6.8
AP 3.2.2: Nachbereitungsversuche (d.h. Separation und Klassifizierung des Rezyklats)	6.6
AP 4 Konzepterstellung seriennaher CFK-Recyclingverfahren, - Prozessketten und –Prozessabläufe	
AP 4.1 Bewertung der Funktionsfähigkeit der umgesetzten Recyclingkonzepte und Verfahren bezüglich der Faserverluste	6.8

7. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

7.1 Nutzen und Verwertbarkeit für bifa

Das Projekt hat wesentlich zur Schaffung und Erweiterung von Know-how zum Thema beigetragen. Weiterhin konnte bifa über vielfältige Kooperationen mit Projektpartnern und im Rahmen von Versuchen mit zahlreichen Unternehmen sein Netzwerks rund um das Thema CFK deutlich ausweiten. Dies vereinfacht den Zugang zu Informationen. bifa konnte auf diese Weise eine verbesserte Grundlage für die Bearbeitung von Anfragen zu abfallwirtschaftlichen Aufgaben sowie zur Bearbeitung von Kundenaufträgen rund um das Thema CFK-Recycling in Form von Beratungs- und Entwicklungsdienstleistungen schaffen. Allerdings ist der Markt für solche Leistungen außerhalb geförderter Forschungsprojekte derzeit recht überschaubar.

7.2 Nutzen und Verwertbarkeit über bifa hinaus

Über die erarbeiteten Ergebnisse selbst hinaus sind vor allem folgende Faktoren zu nennen: Die beteiligten Projektpartner, aber auch die zahlreichen im Rahmen von Versuchen eingebundenen Unternehmen haben durch das Projekt Erfahrungen mit dem Recycling von CFK gesammelt, durch die für die künftige Bearbeitung von Fragestellungen zum Thema die Voraussetzungen verbessert wurden. Diese Beteiligten konnten ihr Netzwerk rund um das Thema CFK zum Teil erheblich erweitern. Dadurch gewinnen sie sowohl besseren Zugang zu Informationen als auch zusätzliche Marktchancen, etwa zum Absatz von Recyclingtechnik. Das Thema CFK-Recycling wurde zudem durch das Projekt auch außerhalb von MAI Carbon verbreitet. So war es etwa im Netzwerk Recycling Technologies Bayern e.V. schon dadurch ein wichtiges Thema, dass mehrere Mitglieder des Netzwerks an Versuchen beteiligt waren.

Insbesondere durch die Realisierung des Großversuchs wurden Handlungsbedarf, Handlungsoptionen, aber auch Limitierungen beim Recycling von CFK sehr deutlich sichtbar. Damit konnte die Grundlage für eine prozesskettenübergreifende Weiterentwicklung des CFK-Recycling wesentlich verbessert werden.

8. Bekannte Fortschritte anderer Stellen auf diesem Gebiet

Trotz vielfältiger Aktivitäten hinsichtlich neuer Verfahren zur Freilegung von Carbonfasern aus CFK sind während der Projektlaufzeit keine Arbeiten bekannt geworden, die wesentliche Bedeutung für den Forschungsgegenstand gehabt hätten. Nach wie vor basieren die wenigen im industriellen Maßstab kommerziell betriebenen Verfahren zur Freilegung von Carbonfasern auf der Pyrolyse.

Gleichwohl sind nach wie vor vielfältige Forschungsaktivitäten zu neuen oder veränderten Freilegungsverfahren, besonders im Bereich solvolytischer Verfahren zu verzeichnen. So ist

der Einsatz von überhitztem Dampf ist ein neuerer Ansatz, der zwischen der Pyrolyse und der Solvolyse anzuordnen ist.²⁵ Vermehrt finden im Bereich der Solvolyse auch Entwicklungen unter Einsatz überkritischer Fluide statt. Bisher findet jedoch kein Einsatz solvolytischer Verfahren zum CFK-Recycling im industriellen Maßstab statt.

Ansätze zur stofflichen Nutzung der solvolytisch oder pyrolytisch freigesetzten Abbauprodukte von Matrixkunststoffen scheitern nach wie vor an fehlender Wirtschaftlichkeit. Im Falle der Pyrolyse liegt zudem die energetische Nutzung im Prozess selbst nahe.

Trotz vielfältiger Forschungsaktivitäten sind während der Projektlaufzeit keine Arbeiten bekannt geworden, die wesentliche Bedeutung für den Forschungsgegenstand gehabt hätten.

Es gibt verschiedene Forschungsprojekte, etwa im Baubereich, die aber nur begrenzten Bezug zu den Projektergebnissen haben.

Vielfältige interessante Aktivitäten sind im Bereich der Wirtschaft zu verzeichnen. Diese betreffen einerseits Weiterentwicklungen in der Recyclingkette, andererseits aber auch schon einzelne Praxisprojekte zum Einsatz von Recyclingmaterial. Je näher diese Projekte an der Produktentwicklung sind, desto restriktiver ist die Informationspolitik der beteiligten Unternehmen.

Eine aktuelle Übersicht zum Stand des Recyclings von CFK wurde 2015 von Oliveux et al. veröffentlicht.²⁶

8.1 Patente

Eine Patentrecherche zeigt, dass seit Projektbeginn zahlreiche Patente angemeldet wurden, die sich mit dem Recycling von Carbonfasern befassen. Ein großer Teil der Anmeldungen betrifft die Fortentwicklung von Freilegungsverfahren:

- Solvolytische Verfahren incl. superkritische Fluide, teils mit Zusatz von Katalysatoren: 11 Anmeldungen
- Pyrolyseverfahren mit Varianten wie z.B. Fließbettpyrolyse, Pyrolyse im Drehrohr: 7 Anmeldungen
- Anmeldungen zu grundsätzlich bekannten Verfahrensgruppen wie Einsatz von Mikrowellen oder Salzschnmelzen
- Daneben einige Anmeldungen zu speziellen Ansätzen wie thermokatalytische Vergasung mit Katalysator-Rückgewinnung, Einsatz von überhitztem Wasserdampf, Erhitzen mit Solarkollektoren und Einsatz gasförmiger Säure

²⁵ Olivera Nunes, A., Barna, R., Soudais, Y., Recycling of carbon fiber reinforced thermoplastic resin waste by steam-thermolysis: thermo-gravimetric analysis and bench-scale studies. In: Proceedings of the 4th international carbon composites conference, 12.-14.05.2014, Arcachon

²⁶ Oliveux, G., Dandy, L.O., Lekke, G.A., Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties

Weitere Anmeldungen betreffen Verfahren zur Verarbeitung von freigelegten Carbonfasern zu verschiedenen Arten von Halbzeugen, beispielsweise für textile Verarbeitungsprozesse. Andere behandeln die Herstellung von Pellets, Formmassen oder anderen Produkten aus CFK, teilweise ohne vorherige Freilegung.

Daneben gibt es Anmeldungen zu speziellen Ansätzen wie etwa dem Einsatz von Sprengladungen zur Zerlegung großer CFK-haltiger Teile.

Es konnten keine Patente identifiziert werden, die für die Projektergebnisse von wesentlicher Bedeutung sind.

9. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

- Bereits gehaltene Vorträge
 - S. Kreibe, W. Rommel (2015): CFK – Recycling, Ökologie und Abfallwirtschaft: Ein Blick über den Tellerrand; Fachtagung Carbon Composites (FCC), 01./02.12.2015, Augsburg
 - S. Kreibe (2015): CFK–Recycling und –Entsorgung, Vollversammlung der ATAB - Arbeitsgemeinschaft der Betreiber thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Bayern, Zweckverband Müllverbrennung, 26.11.2015, Schwandorf
 - S. Kreibe (2015): recycling of CFRP: a promising challenge for a delicate material; 1st International Composites Congress (ICC), 21. - 22. September 2015, ICS Internationales Congresscenter Stuttgart
 - S. Kreibe, W. Rommel (2015): CFRP-Recycling – a view on complete process chains; 8th international symposium on Feedstock Recycling of Polymeric Materials (ISFR) 07.-10.09.2015, Leoben
 - S. Kreibe (2015): CFK-Recycling: Vielversprechende Herausforderung für ein heikles Material; CCeV-Thementag Recycling, 30. Juni 2015, Hochschule Augsburg
 - S. Kreibe (2015): Das Projekt MAI Recycling und strategische Aspekte des CFK-Recyclings aus abfallwirtschaftlicher Sicht; Fachtagung Composite Recycling, 25. März 2015, Stuttgart
 - Kreibe, S. (2014): CFK-Recycling als Schlüssel für den ökologischen Durchbruch – MAI Recycling. Perspektiven der Faserverbundtechnologie für KMU (Ingolstadt, 23.01.2014)
 - Hartleitner, B. (2013): Recycling von Faserverstärkten Kunststoffen mit Potenzial für eine textile Weiterverarbeitung. re4tex, 11. Kolloquium "recycling for textiles" (Chemnitz, 04./05.12.2013)

-
- Hartleitner, B. (2013): Recycling von CFK-Materialien. Übersichtsvortrag. 3. Fachtagung Carbon Composites (Augsburg, 21. November 2013)
 - Hartleitner, B. (2013): Recycling von faserverstärkten Kunststoffen. AFBW Allianz Faserbasierte Werkstoffe Baden-Württemberg e.V. AG Materialien/Garne/Textilien mit dem Schwerpunkt Recycling (Stuttgart, 22. Januar 2013)
 - Geplante Vorträge
 - S. Kreibe (2016): Der Umgang mit Verbundmaterialien (CFK, GFK) am Ende ihres Produktlebenswege; 17. Bayerische Abfall- und Deponietage, 16./17.3. 2016, Augsburg
 - S. Kreibe (2016): MAI Carbon Nachhaltigkeit: Recycling carbonfaserverstärkter Kunststoffe (CFK); Informations- und Dialogveranstaltung „Innovative Materialien und Arbeitsschutz“, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 7.3.2016, Dortmund
 - S. Kreibe (2016): Faserverbundkunststoffe – Möglichkeiten und Hemmnisse des Ökodesigns und des Recyclings; Re-source 2016 - Ressourcenschonung – von der Idee zum Handeln; München, 21./22.4.2016
 - Bereits erfolgte Veröffentlichungen
 - Kreibe, S. (2015): CFK-Recycling: Der Stand der Dinge; in: Technik in Bayern 05/2015, S. 12-13; VDI
 - Geplante Veröffentlichung
 - Publikation zum Thema CFK-Recycling, in der auch Ergebnisse des Projekts MAI-Recycling enthalten sein werden; die Veröffentlichung ist in der Schriftenreihe bifa-Texte geplant