

ForCYCLE

Projektverbund
Rohstoffwende Bayern

finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Projektverbund ForCycle

Ressourcenstrategie für Bayern unter besonderer Berücksichtigung von
Sekundärrohstoffen

Abschlussbericht 12/2016

Teilprojekt 7:

Ressourceneffiziente Faser-Matrix-Separation für das Recycling
von Carbonfaserstrukturen

UNA Universität
Augsburg
University

 **Fraunhofer**
IGCV

Inhalt

1	Motivation	1
2	Stand der Forschung zu Beginn des Projektes	2
3	Konzept des geschlossenen Recyclingkreislaufes	4
4	Faser-Matrix-Separationsprozesse	5
4.1	Benchmarkprozess: Pyrolyse	5
4.2	Induktive Faser-Matrix-Separation	6
4.2.1	Entwicklung des Versuchsaufbaus	6
4.2.2	Charakterisierung der separierten Carbonfasern	7
4.3	Separation mittels Superkritischer Fluide	11
4.3.1	Versuchsaufbau und Durchführung	11
4.3.2	Charakterisierung der separierten Carbonfasern	11
5	Textile Verarbeitung	15
5.1	Trocken- und Nassvliese im Vergleich	15
5.2	Vlies-Herstellung im Nasslegeverfahren	16
5.2.1	Einfluss der Bindefasern	18
5.2.2	Einfluss der Faserlänge	19
5.2.3	Übertragbarkeit auf kontinuierlichen Prozess	19
5.3	Vlies-Herstellung im Trockenlegeverfahren ^[20]	20
6	Mechanische Auswertung	21
6.1	Vergleich der CFK Herstellungsverfahren mit unterschiedlichen Matrixsystemen ^{[19], [20]}	21
6.1.1	VARI Herstellungsverfahren	22
6.1.2	RTM Verfahren	25
6.1.3	Heizpress- Verfahren	26
6.2	Drapierverhalten	27

7	Ökologische Betrachtung / LCA-Studie zum CFK-Recycling	28
7.1	Modellierung der Herstellungs- und Recyclingprozesse	29
7.1.1	Modell zur Carbonfaserherstellung	29
7.1.2	Modell zur Glasfaserherstellung	30
7.1.3	Pyrolysemodell	30
7.2	Bilanzierungsergebnisse der Laboranlage am Fraunhofer IGCV	31
7.3	Diskussion des Energieverbrauchs	33
7.3.1	Optimierung des Energieverbrauchs	34
7.3.2	Nutzung der Nachverbrennung zur Energierückführung	36
7.3.3	Nutzung erneuerbarer Energien	37
7.3.4	Erhöhung der Anlagenauslastung	38
7.3.5	Zusammenfassung zu den Ergebnissen der energetischen Optimierung	39
7.4	Diskussion der Emissionen	40
7.5	Ergebnisse der Optimierung und Datenauswahl	43
7.6	Vergleich von Induktion und Pyrolyse	45
8	Zusammenfassung	47
9	Ausblick	49
	Anhang	50
A 1.	Daten der Bilanzierung	50
A 2.	Literaturverzeichnis	54
A 3.	Abbildungsverzeichnis	56
A 4.	Tabellenverzeichnis	57
A 5.	Projekt-Kontakte	58
A 6.	Unternehmenskontakte	58

Kurzdarstellung

Der Fokus des Projekts liegt auf der Entwicklung von Verfahren zur Trennung von Carbonfasern (CF) und Matrix. Um die separierten Carbonfasern direkt zu einem Vlies weiter verarbeiten zu können, ist das Ziel eine Vereinzelnung der Carbonfasern ohne die Bildung von Verknotungen, welche zur Bildung von Fasergewöllen führen. Für die Faser-Matrix Separation wurden drei Verfahren untersucht: die Pyrolyse als derzeitiges Benchmark-Verfahren, sowie als innovative Verfahren ein Solvolyse-Prozess mittels superkritischer Fluide (SCF) und ein auf induktiver Erwärmung basierendes thermisches Verfahren. Mit allen drei Verfahren können Carbonfaser-Gewebelagen aus einem duromeren Matrixverbund gelöst werden.

Eine Gegenüberstellung der drei genannten Verfahren zur Separation von Carbonfasern und Matrix erfolgt mittels einer Ökobilanzierung.

Zur Verarbeitung von rezyklierten Carbonfasern (rCF) eignen sich die Nass- und Trockenvliesherstellung. In beiden Verfahren können unterschiedliche Faserlängen eingesetzt und die Flächengewichte variabel eingestellt werden. Die Fasern können sowohl durch das Nass- als auch durch das Trockenlege-Verfahren in einer Vorzugsrichtung orientiert werden, wodurch sich eine Steigerung der anisotropen mechanischen Eigenschaften des Carbonfaser-Vlieses erzielen lässt.

1 Motivation

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) werden aufgrund ihrer herausragenden mechanischen Eigenschaften kombiniert mit einem geringen Gewicht als Substituent für bisher im Leichtbau genutzte Materialien eingesetzt. Mechanische Eigenschaften wie eine hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit gepaart mit einer guten chemischen Beständigkeit machen den Werkstoff interessant für den Automobil-, Luftfahrt- und Freizeitbereich. Ein limitierender Faktor, welcher einem noch breiteren Einsatz von CFK entgegenwirkt, ist der energieintensive Herstellungsprozess der Carbonfaser. Um die CO₂-Bilanz der Herstellung ausgleichen zu können sind lange Nutzungsphasen sowie das Recycling unabdingbar. Die Schließung des Stoffkreislaufes der Carbonfaser ist ein Hauptaspekt des vorliegenden Projektes.

Erster Schritt bei der Schließung des Stoffkreislaufes der Carbonfaser ist ihre Separation aus dem eingesetzten Matrixmaterial. Eine schonende Trennung von Carbonfaser und Matrix unter Erhalt der mechanischen Eigenschaften sowie der Erzeugung von Faseroberflächen, welche nur geringe bis keine Reinigungs- und Aufbereitung vor einer potentiellen Weiterverarbeitung benötigen, ist das Ziel dieses ersten Schrittes.

Innerhalb des Projektes werden zwei im Hinblick auf Faserschonung und Ressourceneffizienz potentialträchtige Verfahren zur Faser-Matrix-Separation untersucht, im Vergleich zur Pyrolyse als Benchmark-Prozess. Hierbei handelt es sich zum einen um die Solvolyse mittels superkritischer Fluide und zum anderen um die Trennung durch ein induktives thermisches Verfahren. Diese beiden Verfahren werden hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit und vorhandenem Optimierungspotential untersucht.

Der nächste Schritt zur Schließung des Stoffkreislaufes der CF ist die textile Verarbeitung der rCF. Hier werden innerhalb des Projektes die Nass- und Trockenvliesherstellung betrachtet. Im Nassvliesprozess werden überwiegend Faserlängen von 1 bis 36 mm verarbeitet. Kürzere Fasern bilden dabei ein homogeneres Vlies. Auf der Trockenvliesanlage werden längere Fasern in Größenordnungen von 20 bis 150 mm verarbeitet. Der Einfluss von Material- und Prozessparametern auf die textile Weiterverarbeitung der rCF zu Carbonfaser-Halbzeugen wird untersucht.

Um den Stoffkreislauf der Carbonfaser zu komplettieren werden die aus rCF-Material hergestellten Vliese durch die Infiltration mit einem Matrixmaterial zu rCF-basierten CFK-Bauteilen verarbeitet. Anschließend erfolgt eine Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften.

Resultierende Energie- und Emissionseinsparungen gegenüber der Neufaserherstellung und der konventionellen Pyrolyse werden über eine abschließende Ökobilanzierung ermittelt.

2 Stand der Forschung zu Beginn des Projektes

Um die Notwendigkeit der Entwicklung neuer Separationsmethoden von Carbonfaser und Matrixmaterial zu verdeutlichen, werden im Folgenden die zu Beginn des Projektes und auch zum Zeitpunkt des Verfassens des Abschlussberichtes allgemein bekannten und zum Teil auch industriell umgesetzten Recyclingverfahren von CFK dargestellt. Eine Übersicht der bekannten Recyclingverfahren carbonfaserverstärkter Kunststoffen gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Überblick der Methoden der Faser-Matrix-Separation.

<i>Mechanisch</i>	<i>Thermisch</i>	<i>Chemisch</i>	<i>Sonstige</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Zerkleinern • Mahlen 	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidation (Wirbelschicht) • Pyrolyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Solvolyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrodynamische Fragmentierung

Das mechanische Recycling, welches auf der Zerkleinerung oder dem Vermahlen der End-of-Life-(EoL)-Materialien beruht, liefert Kurzfaserverfragmente bzw. Pulver. Es findet keine Separation von Carbonfaser und Matrixmaterial statt, und die entstehenden Stoffe können als Füllmaterial oder Verstärkungselement in Kunststoffen eingearbeitet werden. Aus der starken Faserkürzung resultieren deutliche Einbußen hinsichtlich der mechanischen Performance. Das Resultat ist ein starkes Downcycling des Materials. [1]

Eine Separation von Carbonfaser und Matrix kann mittels thermischer Prozesse umgesetzt werden. Neben dem oxidativen Verfahren der Wirbelschicht-Oxidation gibt es die schon im industriellen Maßstab eingesetzte Methode der Pyrolyse. All diese Prozesse nutzen Energie in Form von Wärme, um die Matrix von den Fasern zu lösen. Der Unterschied liegt vorwiegend in der Art der Energiezufuhr sowie in der eingesetzten Gasatmosphäre. Vor allem die Pyrolyse ermöglicht die Rückgewinnung von rCF mit guten mechanischen Eigenschaften. Da die CFK-Materialien auch vor diesen Prozessen zerkleinert werden müssen, werden auch hier weitgehend Kurzfasern zurückgewonnen. [2]

Die Solvolyse als chemisches Verfahren nutzt die Löslichkeit eines Matrixwerkstoffes unter bestimmten Bedingungen (Medien, Temperatur, Druck), um die Verstärkungsfaser vom Matrixmaterial zu separieren. Die Carbonfasern können mit guten mechanischen Eigenschaften zurückgewonnen werden, und es besteht zusätzlich die Möglichkeit das gelöste Matrixmaterial aufzuarbeiten und wieder einzusetzen [2]. Durch den Einsatz superkritischer Fluide während der Separation bietet dieses Verfahren ökologische und auch ökonomische Vorteile. Die hierbei eingesetzten Chemikalien sind unter atmosphärischen Bedingungen ungefährlich. Dies bietet auch den ökonomischen Vorteil, dass bei der Lagerung und Nachbehandlung keine aufwendigen Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden müssen. Dies ermöglicht eine günstige Aufbereitung und letztlich einen erneuten Einsatz der verwendeten Lösemittel. Bisherige Ver-

fahren arbeiten oft selektiv, weshalb dieser Aspekt im vorliegenden Projekt bearbeitet wurde. [2]

Das Optimierungspotential der genannten Separationsmethoden ist Ausgangspunkt für die Entwicklung weiterer innovativer Verfahren. Hier ist zum Beispiel die elektrodynamische Fragmentierung zu nennen, welche zur Aufbereitung von Betonabfällen entwickelt wurde. Die Adaption auf das Recycling von CFK-Bauteilen befindet sich noch in der Entwicklungsphase, und es sind noch keine rCF aus diesem Prozess erhältlich. [3]

Die Weiterverarbeitung der rCF ist ein weiterer wichtiger Punkt der im Zusammenhang mit Recycling von CFK genau betrachtet werden muss. An der Universität Nottingham wird eine Methode untersucht, welche das Ablegen der rCF nach der Faser-Matrix-Separation aus einer Träger-Flüssigkeit auf einer rotierenden Trommel ermöglichen soll [4].

Prozesse zur Weiterverarbeitung von rCF orientieren sich an etablierten Prozessen zur Verarbeitung von neuen Carbonfasern (vCF) wie zum Beispiel dem Sheet moulding compound (SMC) Verfahren. In Studien ermittelte Eigenschaften der so hergestellten Verbunde zeigen, dass sich die rCF nicht wesentlich von vCF unterscheiden [5], [6]. Die textile Verarbeitung von rCF zu Vliesen wird durch unterschiedlichste Forschungsaktivitäten forciert. Fragestellungen in Bezug auf die mechanische Performance und Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit von der Faserlänge, und -orientierung, der Packungsdichte und vor allem des Verarbeitungsprozesses (Nass- oder Trockenvliesverfahren) sind bisher noch unzureichend beantwortet und sollen im Rahmen des Projektes aufgegriffen werden.

3 Konzept des geschlossenen Recyclingkreislaufes

Das Recycling von Carbonfasern ist ein wesentlicher Schritt zur Entwicklung eines ressourceneffizienten Gesamtlebenszyklus der Carbonfaser. Innerhalb des Projektes soll das in Abbildung 1 dargestellte Konzept einer möglichen Carbonfaser-Recyclingprozesskette erarbeitet werden.

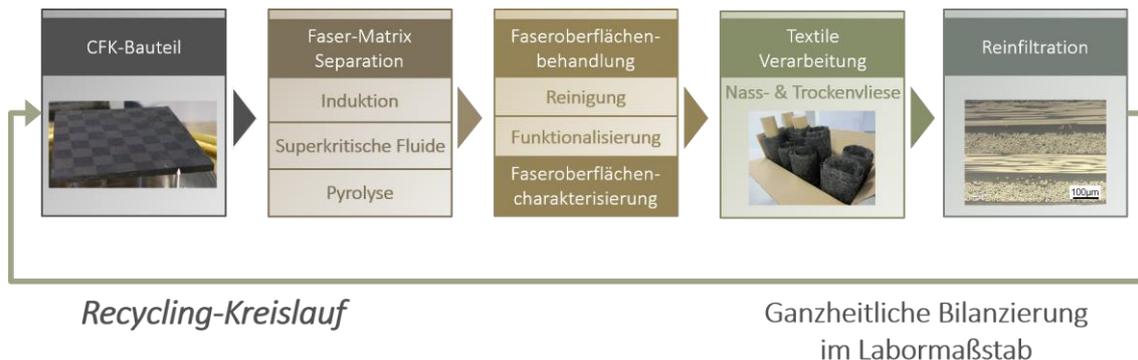


Abbildung 1: Die Carbonfaser-Recyclingprozesskette im Rahmen des ForCycle-Teilprojektes

Ein Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung von faserschonenden, ressourceneffizienten Separationsverfahren von Fasern und Matrix. Ein wesentlicher Punkt ist hierbei der Erhalt der mechanischen Eigenschaften der Carbonfasern sowie die Rückgewinnung von längeren Fasern, welche die verstärkenden Eigenschaften in ein neues CFK-Bauteil einbringen können. Ein ebenso wichtiger Aspekt der Separationsverfahren ist die resultierende Oberflächensummenzusammensetzung der wiedergewonnenen Carbonfasern. Diese beeinflusst die Weiterverarbeitbarkeit der rCF maßgeblich. Die Faseroberflächencharakterisierung hat einen maßgeblichen Anteil an der Bewertung der Separation mittels der unterschiedlichen Verfahren.

Im Rahmen des Projekts wird die textile Weiterverarbeitung zu Carbonfaser-Vliesen durch systematische Variation von Material- und Prozessparametern untersucht. Hierbei werden die Nass- und auch die Trockenvliestechnik untersucht. Der Einfluss der textilen Verarbeitung auf die mechanischen Eigenschaften rCF-basierter CFK-Bauteile, nach einer erneuten Infiltration mit einem Matrixmaterial, wird anhand von Versuchsreihen mit unterschiedlichsten Parametern bestimmt.

Abschließend erfolgt eine Ökobilanz der Separationsverfahren im Labormaßstab. Durch das Forschungsvorhaben wird eine Steigerung der Gesamtproduktivität und Wirtschaftlichkeit des C-Faser Einsatzes angestrebt. Ein breiterer Einsatz der Carbonfaser kann so erzielt werden. Dies soll zu einer Reduktion des Energieverbrauches sowie der klimaschädlichen Emissionen beitragen.

4 Faser-Matrix-Separationsprozesse

Für alle zu untersuchenden Separationsmethoden wurde das gleiche Materialsystem eingesetzt. Hierbei handelt es sich um im Labormaßstab hergestellte CFK-Platten. Diese sind aus 12 Lagen Leinwandgewebe, bestehend aus Carbonfasern der Firma Toray Carbon Fibers America mit der Bezeichnung T700S, aufgebaut. Zur Herstellung der Platten werden die 12 Lagen mit dem Einkomponenten-Epoxidharz HexFlow-RTM6 infiltriert. Die Infiltration erfolgt mittels des VARI-Verfahrens am Fraunhofer IGCV.

4.1 Benchmarkprozess: Pyrolyse

Zur Herstellung der Vergleichbarkeit der im Projekt zu untersuchenden Prozesse wurden an einem konventionell beheizten Ofen Referenzproben hergestellt. Hierbei wurden unterschiedliche Parameter variiert, um den Einfluss der Sauerstoff-Konzentration auf die Porosität der Faseroberfläche (Abbildung 2), die Restverunreinigungen (Abbildung 3) und den Faserdurchmesser (Abbildung 4) zu ermitteln. Eine detaillierte Diskussion der Zusammenhänge wurde in Tutzingen und in Wien veröffentlicht [7], [8].

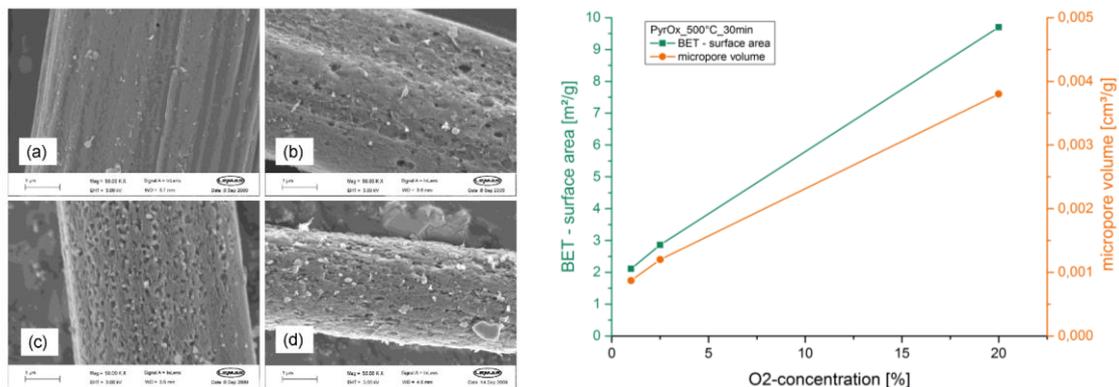


Abbildung 2: Zunehmende Porosität der Faseroberfläche mit steigendem Sauerstoffgehalt: REM-Bilder (links), BET-Messung (rechts) [9]

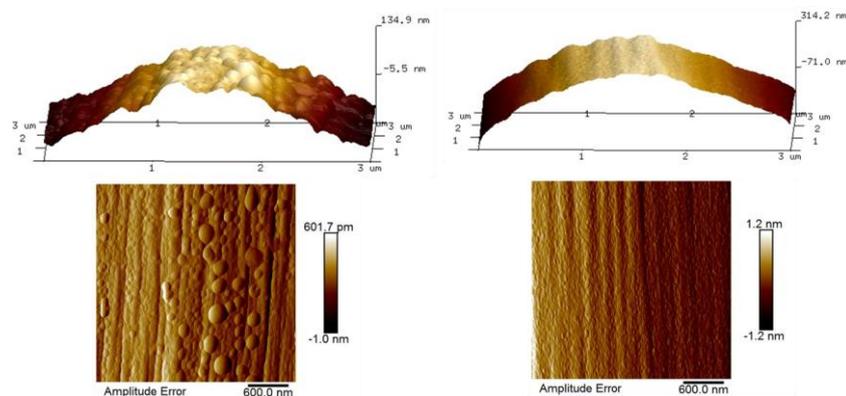


Abbildung 3: Einfluss des Separationsprozesses auf Pyrolysekoks-Rückstände: pyrolysiert (links), oxidiert (rechts).

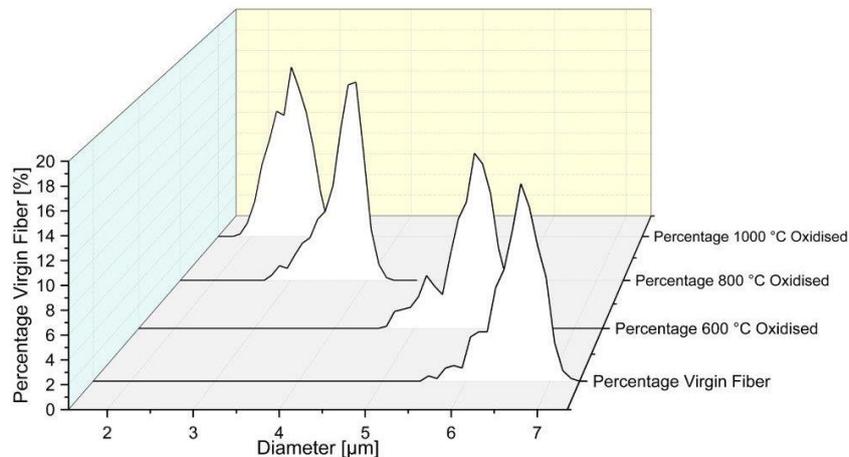


Abbildung 4: Einfluss von Sauerstoffgehalt auf den Faserdurchmesser nach der Pyrolyse

4.2 Induktive Faser-Matrix-Separation

Grundidee der induktiven Faser-Matrix-Separation ist die induktive Erwärmung der elektrisch leitfähigen Carbonfasern. Die Erwärmung erfolgt durch elektrische Wirbelströme, welche im Bauteil durch Anlegen eines elektromagnetischen Wechselfeldes induziert werden. Die selektive Erwärmung der Carbonfasern führt zu einer gezielten Ablösung von Faser und Matrix an deren Grenzfläche. Vorteil hierbei ist, dass bei diesem Verfahren im Unterschied zu anderen Recyclingmethoden (wie zum Beispiel der Pyrolyse) nur ein Teil der Matrix in den gasförmigen Zustand überführt wird. Es ist zu erwarten, dass Vorteile in Bezug auf Energieeintrag und Emissionen resultieren. Die unmittelbare Erwärmung der Carbonfasern auf die erforderlichen Temperaturen erfolgt innerhalb von Sekunden und ermöglicht so kurze Prozesszeiten.

4.2.1 Entwicklung des Versuchsaufbaus

Zu Beginn des Förderzeitraums wurde der in Abbildung 5 dargestellte Versuchsaufbau konzipiert und aufgebaut.

Herzstück des Aufbaus ist der Generator, welcher über die Induktionsspule das elektromagnetische Wechselfeld im CFK-Bauteil erzeugt. Das CFK-Bauteil befindet sich dabei in einer Probenkammer mit definierter Stickstoff-Atmosphäre. Die Leistung des Generators wird über ein Pyrometer auf eine Soll-Temperatur geregelt.

Im Laufe des ersten Projektjahres konnte der Versuchsaufbau realisiert und die erfolgreiche Freilegung der Gewebelagen aus laminierten CFK-Platten demonstriert werden.

Das elektromagnetische Feld des Induktors führt im statischen Fall des Laboraufbaus zu einer inhomogenen Erwärmung der CFK-Platte. Bei einer Relativbewegung zwischen Induktionsspule und Probe führt dies zu keinem Nachteil im Verfahren. Im statischen Laboraufbau wurde die Relativbewegung durch ein schrittweises Versetzen der Probe nachgestellt.

Auf dieser Grundlage wurden im zweiten Projektjahr Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Prozessparameter, wie der Soll-Temperatur und des Koppelabstands zwischen CFK-Probe und Induktionsspule, auf die Eigenschaften der rCF (Masserückstand der Matrix auf den rCF-Oberflächen, mechanische Eigenschaften der rCF, chemische Zusammensetzung der rCF-Oberflächen) durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden als Konferenzbeitrag unter dem Titel „Recycling of woven carbon fiber patches from laminated CFRP by means of induction heating“ bei der 20th International Conference on Composite Materials (ICCM20, Kopenhagen) [10] veröffentlicht und als Vortrag präsentiert (Juli 2015).

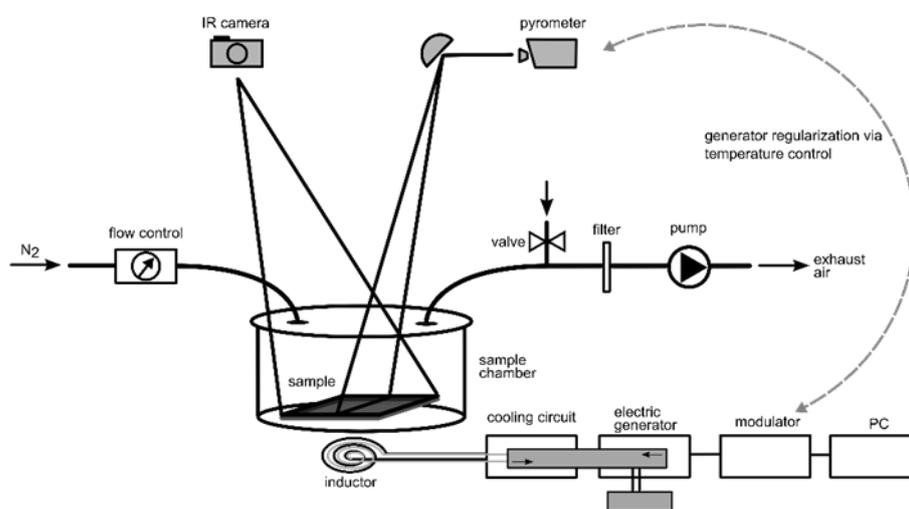


Abbildung 5: Skizze zum Versuchsaufbau zur Faser-Matrix-Separation mittels Induktion

Der Versuchsaufbau wurde im Laufe des Projektes durch die Beschaffung eines Thermographie-Systems erweitert (Finanzierung zu Teilen aus Projektmitteln). Zur gezielten Anpassung der Prozessparameter und zum Verständnis der beteiligten Erwärmungsmechanismen trägt die zeitliche Auflösung der Wärmeentwicklung innerhalb der Probe entscheidend bei.

Die Erfassung der benötigten elektrischen Leistung sowie der gasförmigen Emissionen erfolgte im Labormaßstab. Diese Werte werden zur ökonomischen und ökologischen Bewertung des Verfahrens im Rahmen einer ganzheitlichen Bilanzierung ausgewertet.

4.2.2 Charakterisierung der separierten Carbonfasern

Die Variation der Soll-Temperatur an der Probenoberfläche (240°C, 260°C, 280°C und 320°C) und des Koppelabstandes (17 mm, 20 mm und 27 mm) und deren Einfluss auf das Induktionsverfahren wurden in mehreren Versuchsreihen betrachtet.

Abbildung 6 (a) zeigt den Einfluss der Soll-Temperatur und Abbildung 6 den Einfluss des Koppelabstandes auf den Verlust des Matrixmaterials. Der Verlust des Matrixmaterials wird durch einen Wiegeprozess vor und nach der induktiven Behandlung ermittelt, und errechnet sich in

Bezug auf die Masse der unbehandelten Probe. Die induktive Behandlung mit allen gezeigten Prozessparametern ermöglicht bei allen Testreihen eine Separation der Proben in alle Gewebelagen.

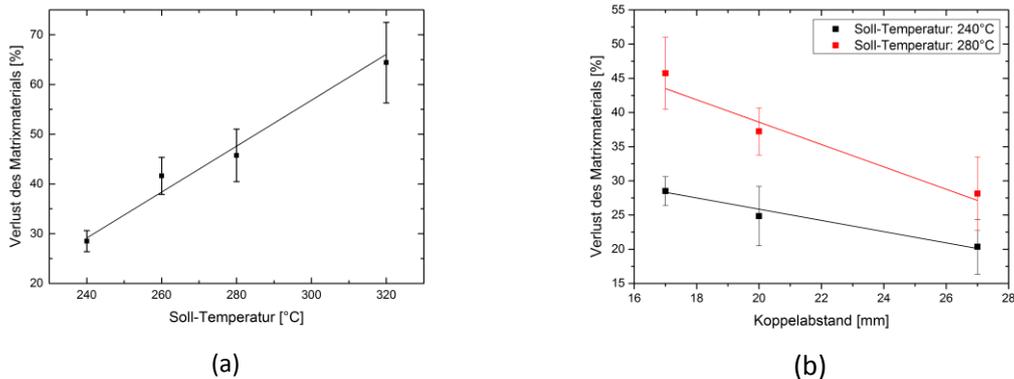


Abbildung 6: Untersuchung des Matrixverlustes während der induktiven Behandlung (a) Variation der Soll-Temperatur (b) Variation des Koppelabstandes bei den Soll-Temperaturen 240°C und 280°C.

Abbildung 6 (a) zeigt, dass mit höheren Soll-Temperaturen ein zunehmender Matrixverlust auftritt. Ein größerer Koppelabstand führt zu einem geringeren Verlust an Matrixmaterial wie aus Abbildung 6 (b) deutlich wird. Dies gilt auch bei unterschiedlichen Soll-Temperaturen. Größere Koppelabstände verringern die Intensität des Magnetfeldes am Ort der Probe, wodurch eine verminderte Stromdichte in den Proben induziert wird. Dies hat eine geringere Ist-Temperatur innerhalb der Probe zur Folge. Die vergleichsweise geringen Schwankungen bei wiederholten Durchführungen der Separationsversuche mit gleichen Prozessparametern zeigen, dass das Verfahren reproduzierbar ist, und potentiell gewünschte Matrixverluste bzw. der Erhalt von Matrixmaterial gezielt durch Variation der Prozessparameter eingestellt werden kann.

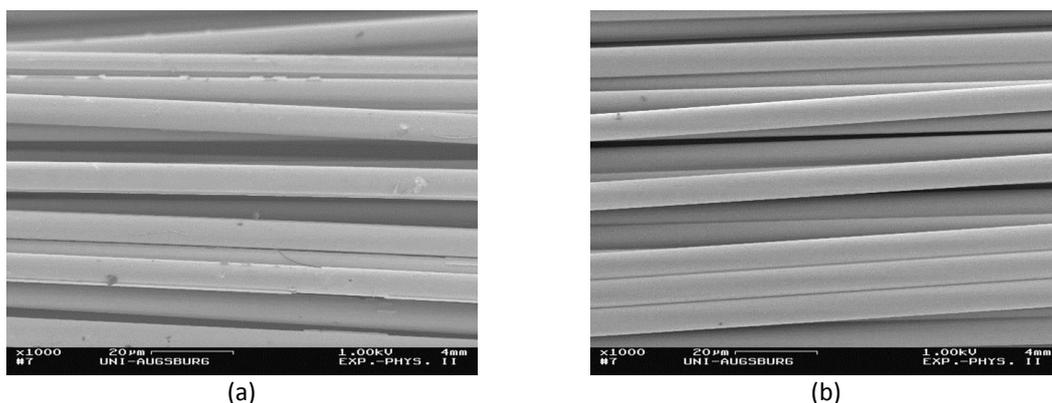


Abbildung 7: REM-Aufnahmen der rCF nach der induktiven Separation. Soll-Temperatur: (a) 240°C (b) 320°C

Zunächst wurden die Oberflächen der rezyklierten Carbonfasern mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) untersucht. Abbildung 7 (a) zeigt die Faserflächen der rCF welche bei einer

Soll-Temperatur von 240°C induktiv separiert wurden. Im Vergleich zu den in Abbildung 7 (b) gezeigten bei 320°C separierten rCF sieht man deutlich, dass die gemessene Reduktion von auf der Faseroberfläche zurückbleibendem Matrixmaterial auch durch die REM-Aufnahmen widergespiegelt wird. Es sind bei beiden Soll-Temperaturen weitestgehend matrixfreie Oberflächen vorhanden, wobei bei der niedrigeren Soll-Temperaturen zu einem geringen Anteil noch vorhandene Matrixpartikel identifiziert werden können.

Die Oberflächeneigenschaften der rCF spielen eine wichtige Rolle bei deren Weiterverarbeitung. Die verstärkenden Eigenschaften der CF können nur bei sehr guter Faser-Matrix-Anbindung vollständig genutzt werden. Die Wechselwirkung zwischen Carbonfasern und Matrixmaterial wird maßgeblich von der chemischen Oberflächenzusammensetzung der Carbonfasern beeinflusst. Die Elementzusammensetzung, gemessen durch Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) der rCF-Oberflächen in Abhängigkeit der gewählten Soll-Temperaturen ist im Vergleich zu einer thermisch entschlichteten vCF (1100°C, 60 min, N₂-Atmosphäre) in Abbildung 8 dargestellt.

Die Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff sind auf allen Faseroberflächen zu finden. Der auf der thermisch entschlichteten Neufaser detektierte Stickstoff stammt vermutlich vom Polyacrylnitril-Precursor. Alle rCF weisen einen höheren Gehalt an Stickstoff im Vergleich zur thermisch entschlichteten Neufaser auf, welcher auf Rückstände des Matrixmaterials zurückzuführen ist. Durch das gezielte Einstellen des Restmatrixmaterials auf den Faseroberflächen der rCF lässt sich somit die chemische Zusammensetzung beeinflussen. Das vorhandene Restmatrixmaterial kann zusätzlich noch durch mechanisches Verzahnen mit dem neuen Matrixmaterial bei einer Reinfiltration zu einer verbesserten Anbindung zwischen Faser und Matrix beitragen.

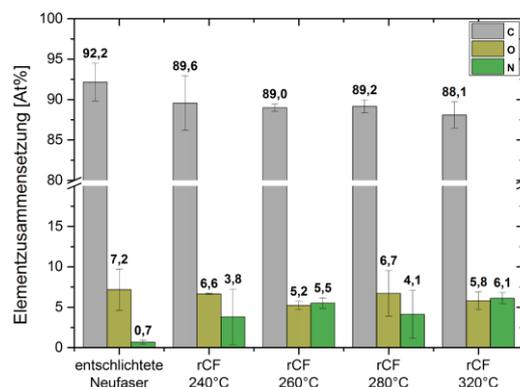


Abbildung 8: XPS-Analyse der Elementzusammensetzung der rCF-Oberflächen im Vergleich zu einer thermisch entschlichteten Neufaser.

Ein eigener Prozessschritt zur Reinigung der rCF-Oberflächen mit anschließender erneuter Aktivierung kann in diesem Verfahren basierend auf den vorliegenden Ergebnissen möglicher-

weise eingespart werden. Dies führt zu einem geringeren Energieeintrag, verkürzten Prozesszeiten und damit zu verringerten Kosten des Recyclingsverfahrens.

Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der rCF ist ein weiterer Indikator bei der Bewertung der unterschiedlichen Prozessparameter. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse der Einzelfaserzugversuche im Vergleich zur thermisch entschlichteten Neufaser.

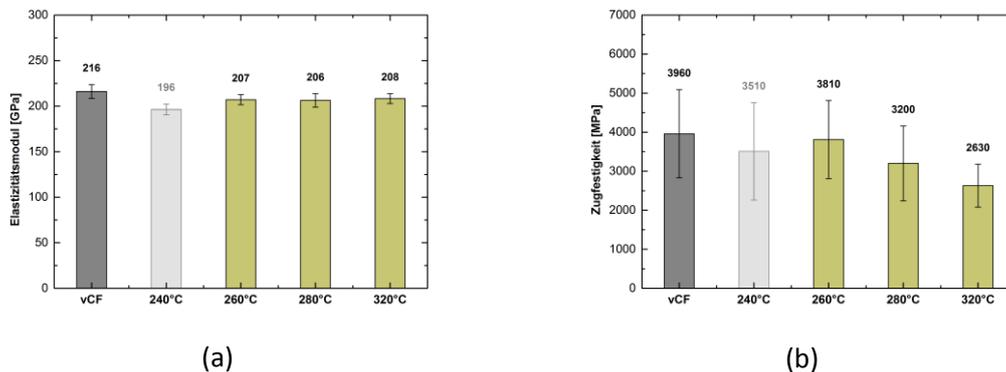


Abbildung 9: Ergebnisse des Einzelfaserzugversuches (a) Elastizitätsmodul (b) Zugfestigkeit.

Innerhalb des Fehlers ist das Elastizitätsmodul (E-Modul) für alle rCF und auch im Vergleich zur Neufaser gleich. Eine minimale Reduktion um höchstens 5% ist erkennbar. Eine fehlerbehaftete Bestimmung des Durchmessers der rCF-240°C führt zu einer nicht korrekten Bestimmung der mechanischen Eigenschaften dieser Probe. Die Ermittlung des Faserdurchmessers erfolgt durch eine Anregung der Faser auf ihre Eigenfrequenz, bei bekannter Dichte. Hierbei wird das auf der Faseroberfläche vorhandene Matrixmaterial nicht berücksichtigt, wodurch der Faserdurchmesser zu groß bestimmt wird. Dies führt bei der anschließenden Berechnung von E-Modul und Zugfestigkeit zu einer Ausgabe von zu geringen Werten. Würde der reale Durchmesser der rCF-240°C in die Berechnung einfließen würden E-Modul und Zugfestigkeit mit den Werten der Neufaser übereinstimmen.

Die Zugfestigkeiten der Neufaser, rCF-240°C und rCF-260°C sind innerhalb des Fehlers als gleich anzusehen. Eine Abnahme der Zugfestigkeit auf bis zu unter 70% des Ausgangswertes zeigen die Proben rCF-280°C und rCF-320°C. Die Temperatur der Fasern kann während des Verfahrens deutlich über der Solltemperatur der Probenoberfläche liegen, wodurch, im Zusammenspiel mit einer nicht hundertprozentig inerten Atmosphäre, eine Degradation auch bei im Vergleich zum Herstellungsprozess geringeren Soll-Temperaturen auftreten kann. Die Zugfestigkeit bleibt bei Behandlungen bis zu einer Solltemperatur von 260°C auf einem Niveau von mind. 95% der Festigkeit einer Neufaser erhalten. Die mechanischen Eigenschaften können während der induktiven Faser-Matrix-Separation also weitgehend erhalten bleiben.

Eine ausführliche Diskussion der angesprochenen Ergebnisse wurden in der Veröffentlichung [10] dargestellt.

4.3 Separation mittels Superkritischer Fluide

4.3.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Faser-Matrix-Separation erfolgt in einem halbkontinuierlichen Prozess. Es wird ein kontinuierlicher Lösemittelstrom benötigt um ein Rückkondensieren des gelösten Matrixmaterials auf die Faseroberflächen bei Erreichen der unterkritischen Bedingungen am Ende des Versuchs zu vermeiden. In Abbildung 10 ist eine Skizze zum Funktionsprinzip des Recyclings mittels superkritischer Fluide dargestellt. Der Separationsprozess erfolgt innerhalb des Reaktors unter Anlegen des benötigten Drucks und der Temperatur.



Abbildung 10: Skizze zum Funktionsprinzip des Recyclings von Carbonfasern mittels superkrit. Fluide

Innerhalb des Projektes wurden zur Untersuchung der Machbarkeit des Prozesses acht unterschiedliche Experimente mit verschiedenen Prozessparametern durchgeführt. Der Druck (25 MPa) war für alle Experimente gleich. Um Informationen über die Temperaturabhängigkeit des Prozesses zu gewinnen, wurden drei unterschiedliche Temperaturen (350°C, 375°C und 400°C) untersucht. Der Einfluss der Behandlungszeit wurde mit zwei unterschiedlichen Behandlungsdauern (60 min und 120 min) bei konstanten Temperaturen untersucht. Alle Untersuchungen wurden mit zwei unterschiedlichen Lösemitteln - Wasser (H₂O) und einem Wasser/Ethanol-Gemisch (H₂O/C₂H₆O 50vol%) – durchgeführt. In Abbildung 11 sind separierte Carbonfasern nach erfolgreicher Faser-Matrix-Separation dargestellt. Die textile Struktur des Leinwandgewebes kann, wie auch bei der induktiven Faser-Matrix-Separation, erhalten werden. Dies ist ein Unterschied zu den meisten etablierten Verfahren, bei welchen die Carbonfasern nach der Separation ungeordnet in Form eines Gewölles vorliegen.



Abbildung 11: Separierte Carbonfasern nach dem Recycling mittels superkritischer Fluide.

4.3.2 Charakterisierung der separierten Carbonfasern

Abbildung 12 a) – c) zeigt die REM-Aufnahmen der mittels Wasser und unterschiedlichen Soll-Temperaturen separierten rCF. Die Aufnahmen zeigen, dass der Großteil des Matrixmaterials bei den untersuchten Prozessparameter entfernt werden kann, aber auch bei den höchsten Temperaturen befindet sich noch eine geringe Anzahl an Matrixpartikel auf der Oberfläche.

Für die Behandlung mittels des Wasser/Ethanol-Gemisches (Abbildung 12 d) – f)) ist das ein ähnliches Ergebnis zu beobachten, obwohl eine verbesserte Matrixablösung für alle Temperaturen und Behandlungszeiten erkennbar ist.

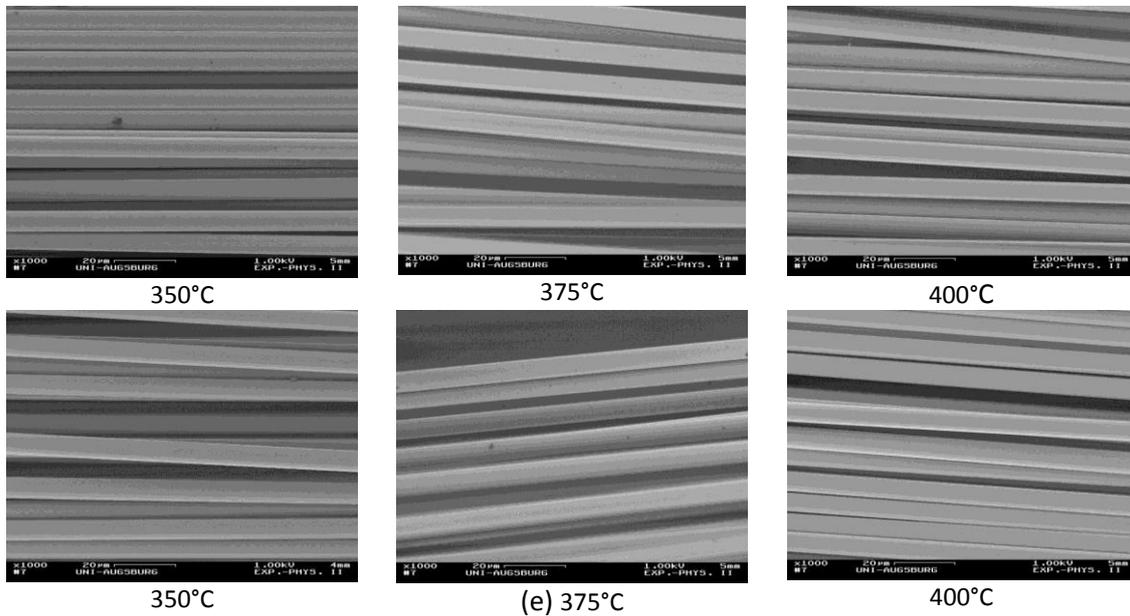


Abbildung 12: REM-Aufnahmen der rCF beim Einsatz von Wasser (a - c) und dem Wasser/Ethanol Gemisch (d - f) als Lösemittel bei unterschiedl. Temperaturen, Behandlungszeit 120 min.

Für beide Lösemittel gilt, dass eine Erhöhung der Soll-Temperatur und auch der Behandlungszeit zu einer vollständigeren Entfernung des Matrixmaterials führt.

Mögliche Oberflächendegradationen auf den rCF werden mittels Rasterkraftmikroskopie (AFM) Messungen untersucht. Abbildung 13 zeigt die Topographie der entschichteten Neufaser und jeweils einer mit Wasser bzw. dem Wasser/Ethanol Gemisch separierten rCF.

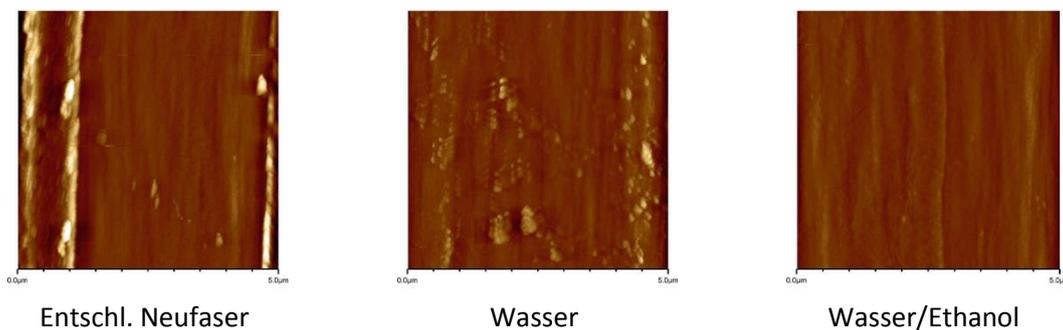


Abbildung 13: Topographie der entschichteten Neufaser im Vergleich zu rCF (375°C, 120 min).

Die gemessenen Rauheitswerte und die zugehörigen Standardabweichungen sind in Abbildung 14 dargestellt. Für beide Lösemittel ist die Oberflächenrauheit der rCF geringer als die der entschichteten vCF. Mit längerer Behandlungszeit und höherer Soll-Temperatur nimmt die Ober-

flächenrauheit, bis auf zwei Ausnahmen, der rCF ab. Die Abnahme der Oberflächenrauheit der rCF im Vergleich zur vCF wird einer Glättung der Oberfläche während des Prozesses zugeschrieben. Die Abnahme der Rauheit mit zunehmender Behandlungszeit und Temperatur resultiert wahrscheinlich aus einer vollständigeren Entfernung des Matrixmaterials, was in Übereinstimmung mit den REM-Aufnahmen ist.

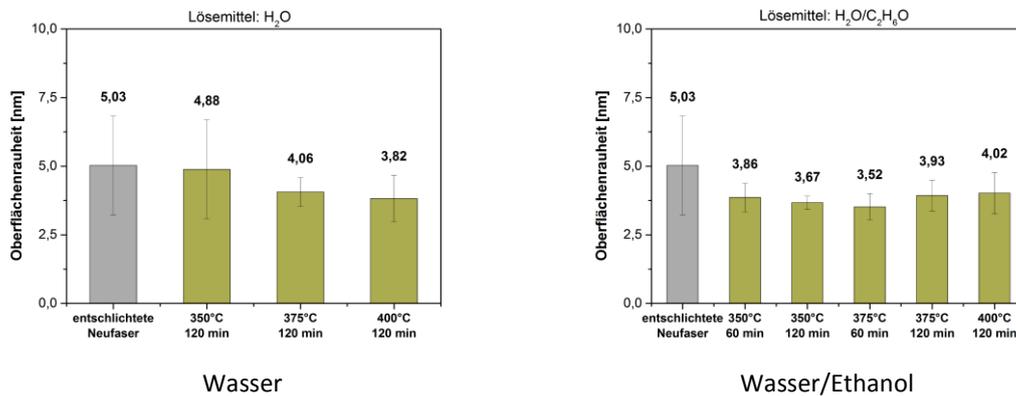


Abbildung 14: Oberflächenrauheit der rCF im Vergleich zur thermisch entschichteten Neufaser.

Die Effektivität der Entfernung des Matrixmaterials mittels der Wasser/Ethanol-Mischung ist vergleichbar mit der bei hohen Temperaturen und langen Behandlungszeiten von reinem Wasser. Die AFM-Messungen zeigen, dass die Separationsmethode eine Entfernung des Großteils des Matrixmaterials ermöglicht, und keine Oberflächendegradation auftritt.

Auch bei dieser Separationsmethode liegt ein Fokus der Untersuchungen auf der chemischen Oberflächenzusammensetzung der Fasern. Hierzu wurden XPS-Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 15 dargestellt sind. Kohlenstoff und Sauerstoff werden auf allen Faseroberflächen detektiert.

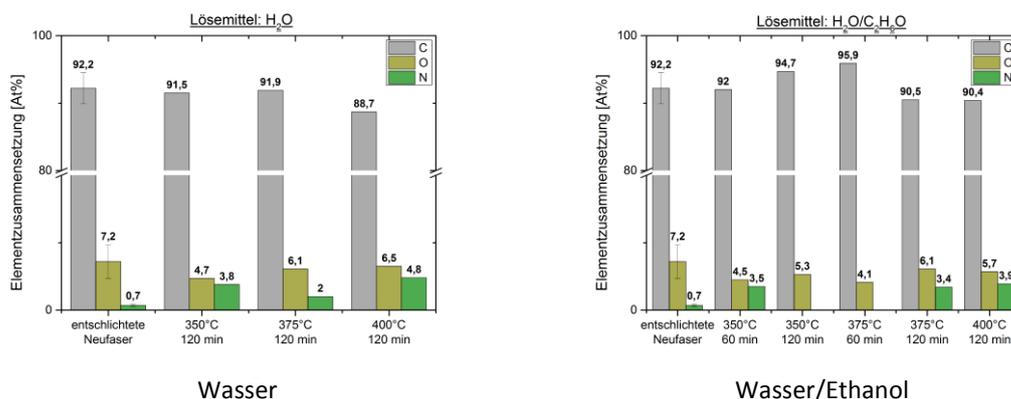


Abbildung 15 Elementzusammensetzung der rCF-Oberflächen i.V. zur entschichteten Neufaser.

Stickstoff wird auf allen Faseroberflächen mit Ausnahme der mit dem Wasser/Ethanol-Gemisch bei 350°C und 120 min sowie 375°C und 60 min behandelten Faseroberflächen ge-

messen. Der Sauerstoffgehalt aller rCF ist geringer als der der entschlichteten vCF. Die rCF weisen einen höheren Stickstoffgehalt im Vergleich zur entschlichteten vCF mit Ausnahme von zwei Behandlungszyklen auf. Der erhöhte Stickstoffgehalt kann auch hier, wie bei der induktiven Faser-Matrix-Separation, vermutlich dem Restmatrixgehalt auf der Faseroberfläche zugeordnet werden. Diese Interpretation wird von den REM- und auch den AFM-Untersuchungen gestützt. Aufgrund der hohen Stickstoffanteile an der Oberfläche scheint auch hier keine weitere Oberflächenbehandlung vor einer Re-Infiltration notwendig zu sein.

Tabelle 2 Durchmesser, E-Modul und Zugfestigkeit der rCF im Vergleich zur entschlichteten vCF.

Exp.	Durchmesser [μm]		Elastizitätsmodul [GPa]		Zugfestigkeit [GPa]	
	H ₂ O	H ₂ O/C ₂ H ₆ O	H ₂ O	H ₂ O/C ₂ H ₆ O	H ₂ O	H ₂ O/C ₂ H ₆ O
entschl. vCF	6,59 \pm 0,25		220 \pm 6		3,95 \pm 1,29	
350°C, 1h	X	6,68 \pm 0,19	X	216 \pm 5	X	4,55 \pm 1,06
350°C, 2h	6,95 \pm 0,40	6,79 \pm 0,25	206 \pm 10	213 \pm 6	3,14 \pm 0,54	4,31 \pm 1,57
375°C, 1h	X	6,80 \pm 0,29	X	209 \pm 6	X	4,71 \pm 1,05
375°C, 2h	6,63 \pm 0,16	7,02 \pm 0,32	215 \pm 4	207 \pm 7	5,16 \pm 1,09	4,66 \pm 1,22
400°C, 2h	6,77 \pm 0,39	6,73 \pm 0,25	210 \pm 9	209 \pm 5	3,64 \pm 1,02	4,05 \pm 0,88

Ein weiterer sehr wichtiger Aspekt bei der Bewertung des Separationsverfahrens sind die mechanischen Eigenschaften der rCF. Tabelle 2 zeigt den Durchmesser, das Elastizitätsmodul sowie die Zugfestigkeit der mittels unterschiedlicher Prozessparameter rezyklierten Carbonfasern im Vergleich zur Neufaser. Innerhalb der Standardabweichung ist, unabhängig von den gewählten Prozessparametern, kein Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften im Vergleich zur Neufaser identifizierbar. Geringe Schwankungen mit unterschiedlichen Prozessparametern sind bei der Zugfestigkeit erkennbar. Es ist nicht eindeutig, ob dies ein realer Effekt ist oder den Schwankungen der Einzelfaserzugversuche zuzuschreiben ist. Abschließend wird deutlich, dass die mechanischen Eigenschaften auch bei diesem Prozess weitgehend erhalten bleiben.

Die vorgestellten Ergebnisse der Untersuchungen zur Faser-Matrix-Separation wurden innerhalb des Papers [11] ausführlich diskutiert, und im Juni 2016 auf der ECCM17 (17th European Conference on Composite Materials) in München vorgetragen. Zudem ist in der Zusammenarbeit mit der Universität 1 in Bordeaux ein Paper [12] entstanden, welches einen noch tieferen Einblick in die Untersuchung des Prozesses gibt, da hier auch das Lösemittel während des Prozesses untersucht wird. So konnten Erkenntnisse gewonnen werden, die eine weitere Optimierung des Prozesses erlauben.

5 Textile Verarbeitung

Neben der eigentlichen Trennung der Werkstoff-Komponenten – der Fasern und der Matrix – besteht eine wesentliche Herausforderung darin, aus den zuvor rückgewonnenen Fasern erneut Halbzeuge herzustellen, die in serientauglichen Verarbeitungsverfahren zum Einsatz kommen können.

5.1 Trocken- und Nassvliese im Vergleich

Die aus dem Separationsprozess gewonnenen Kurzfasern werden auf Textilmaschinen zu unterschiedlichen textilen Gebilden weiterverarbeitet. Wie beispielsweise zu Trockenvliesen mittels Krempel oder Airlaid, zu 3D-Bauteilen mittels Fiber Injection Moulding (FIM) Fasereinblas-technologie oder zu Nassvliesen mittels Nassvlies-technologie. Die Faserlänge spielt dabei eine entscheidende Rolle, wie in Abbildung 16 zu sehen ist.

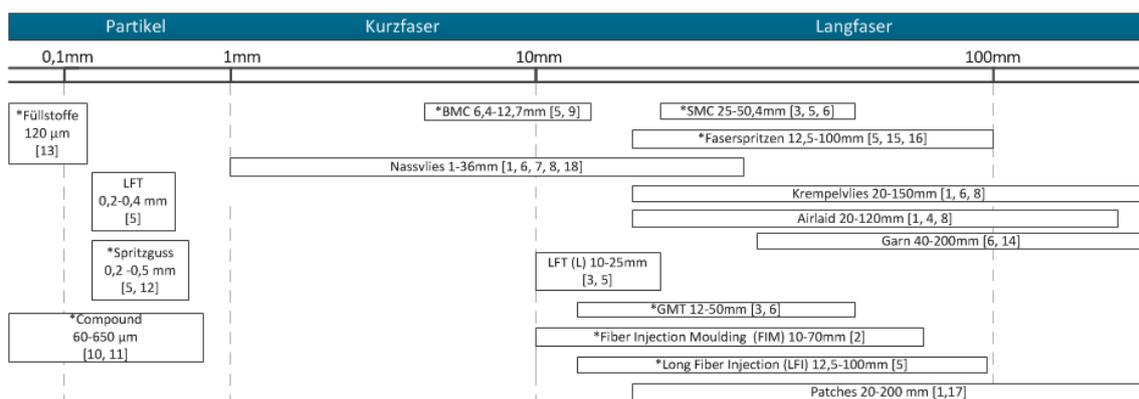
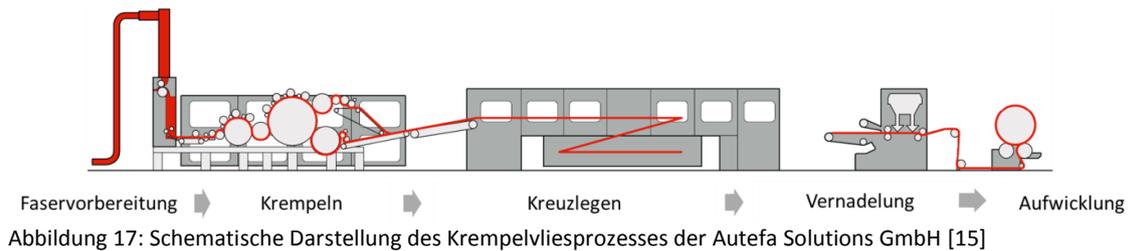
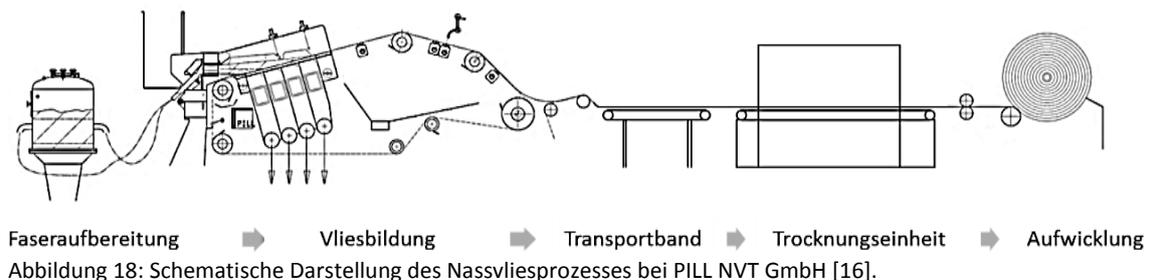


Abbildung 16: Wiedereinsatz der recycelten Kohlenstofffasern bezogen auf die Faserlänge [13].

Mithilfe der Krempelvlies-technologie (KVT) können rezyklierte Fasern und trockener Faserabfall (Verschnittreste) mit einer Länge von ca. 20-150 mm [14] verarbeitet werden. Das zerkleinerte Fasermaterial wird in der Faservorbereitung geöffnet, gemischt und gleichmäßig der Krempel zugeführt. Im Kardierprozess der Krempel werden die zugeführten Faserflocken bis zur Einzelfaser aufgelöst, parallelisiert und zu einem Faserflor zusammengefügt. Der Kreuzleger doubliert das Faserflor zu einem homogenen Vlies mit höherem Flächengewicht und Vliesbreite sowie einer definierten Faserausrichtung. Anschließend findet die mechanische Verfestigung (Vernadelung / Thermofixierung) statt, siehe Abbildung 17. Die Verwendung von Kohlenstofffasern erfordert aufgrund des hohen Faserflugs und der elektrischen Leitfähigkeit der Faser spezielle Schutzvorkehrungen.



Die Nassvlies-Technologie (NVT) bietet die Möglichkeit, das Spektrum verarbeitbarer Faserlängen zu erweitern. Es können vor allem sehr kurze Faserlängen verarbeitet werden, welche bei vielen Weiterverarbeitungen aus dem Prozess fallen. Die zugeschnittenen Fasern werden in Wasser dispergiert. Insbesondere bei Kohlenstofffasern ist die Dispergierung der Fasern von Vorteil, da der Faserflug und die Staubentwicklung unterbunden werden. Durch Filtration findet eine kontinuierliche Vliesbildung auf einem Siebband statt. Anschließend wird das Vlies verfestigt, getrocknet und aufgewickelt, siehe Abbildung 18.



Für das Nassvliesverfahren ist das Dispergierverhalten von Fasern in Flüssigkeit bedeutend. Die Faserbündel sollen möglichst homogen bis zur Einzelfaser zerlegt werden und bis zur Vliesbildung gleichmäßig vereinzelt bleiben. Anderenfalls entstehen ungleichmäßige Faserverteilungen und Stippen im Vlies. Bei der Faserlänge kommt es auf den Schlankheitsgrad an, welcher durch die Faserlänge bezogen auf die Faserfeinheit errechnet wird. Die Dispergieigenschaften verschlechtern sich mit zunehmendem Schlankheitsgrad und abnehmender Steifigkeit der Fasern in flüssigem Medium [16], [17]. Die bisher maximal verarbeitbare Faserlänge liegt für Kohlenstofffasern bei ca. 36 mm [18]. [20]

5.2 Vlies-Herstellung im Nasslegeverfahren

Für das ForCycle-Teilprojekt fand die Herstellung Kohlenstofffaser-basierter Vliesblätter im Labor der Firma Neenah-Gessner statt. Dabei wurden folgende Prozessstufen durchlaufen, die ihren Ursprung in der Herstellung von Papier und Kartonage haben:

1. Die Dispergierung der rCF in Wasser fand im Aufschlaggerät statt (vgl. Abbildung 19). Die Bedingungen wurden mit 3000U/min für 10 min. empirisch an die Fasern angepasst.



Abbildung 19: Aufschlaggerät (links), Detail: Propeller mit abgerundeten Kanten (rechts).

2. In der Laborbütte wurden geeignete Zusatzstoffe hinzugegeben (z.B. die Bindefasern), die Dispersion wurde anschließend mit Leitungswasser verdünnt und schonend weitergerührt (Abbildung 20).



Abbildung 20: Laborbütte (links), Detail: Skala für Füllstand und Propeller (rechts).

3. Im Blattbildner wurde die so hergestellte Suspension auf ein Siebblatt abgelegt und das Wasser mit Unterdruck abgesaugt (Abbildung 21).



Abbildung 21: Blattbildner (links), Detail: Sieb auf dem Blattbildner (rechts).

4. Die Vliesblätter wurden schließlich auf einem Phototrockner getrocknet.



Abbildung 22: Phototrockner

Hierbei ist anzumerken, dass die Herstellung der Vliesblätter unter Laborbedingungen schwieriger ist im Vergleich zur Vliesherstellung auf Industrieanlagen, wo sich bei Normalgeschwindigkeit eine prozessinhärente Dynamik einstellt, die der Gleichmäßigkeit und Homogenität der hergestellten Vliese zugutekommt. Die Parameter wurden im Labor so gewählt, dass eine Übertragung der Erkenntnisse auf eine Großanlage möglich ist. Es wurden mehrere Parameter variiert, um deren Einfluss auf den Herstellungsprozess zu untersuchen.

5.2.1 Einfluss der Bindefasern

Die Bindefasern verleihen den hergestellten Vliesen die notwendige Stabilität um sie weiterverarbeiten zu können. Es wurden mehrere Bindefasern getestet bevor die Entscheidung für die Verwendung eines davon gefallen sei.

Tabelle 3: Übersicht Festigkeitskennwerte in Abhängigkeit untersch. Nasslege-Prozessparameter

Festigkeitsversuche mit verschiedenen Bindern (PVOH, Lyocell, Advansa)						
PVOH 3%			PVOH 5%			
Berstdruck (kPa)	Bruchkraft (N)	Bruchdehnung (%)	Berstdruck (kPa)	Bruchkraft (N)	Bruchdehnung (%)	
69,9	3,16	0,4	88			
79,5	4,38	0,4	85,6	28,2	0,6	
87,3	7,91	0,4	70,3	26,7	0,7	
81,6	6,77	0,3	73,7	21,7	0,6	
77,5	2,25	0,3	84,1	25,3	0,8	
79,16	4,89	0,36	Mittelwerte	80,34	25,48	0,68
Viskose 15%						
Berstdruck (kPa)	Bruchkraft (N)	Bruchdehnung (%)				
104,2	8,43	0,7				
131,1	5,89	0,5				
73,3	7,65	0,5				
83,9	8,11	0,5				
86,4	10	0,4				
95,78	8,02	0,52	Mittelwerte			
BiCo 5%			BiCo 10% (130°C im PD)			
Berstdruck (kPa)	Bruchkraft (N)	Bruchdehnung (%)	Berstdruck (kPa)	Bruchkraft (N)	Bruchdehnung (%)	
43			54,8	0,852	1,6	
45,7			56,7	0,871	1	
46,2			55,5	0,793	1,6	
46,2			53,8			
45,4			56,7	0,78	1,3	
45,30	Nicht messbar		Mittelwerte	55,50	0,82	1,38

Die 3% PVOH erlaubten den größten Anteil an CF mit einer ausreichenden Stabilität für die Weiterverarbeitung.

5.2.2 Einfluss der Faserlänge

Die Versuche wurden mit CF der Längen 6, 12 und 18 mm durchgeführt. Dabei hat sich herausgestellt, dass mit Zunahme der Faserlänge der Dispergierprozess der CF, der für die ganze Durchführung eine entscheidende Rolle spielt, zunehmend schwieriger wurde und die Produkte an Homogenität einbüßten.

Dieses Phänomen konnte sowohl bei den Neufasern (vCF), als auch bei den thermisch behandelten Fasern (oxCF und pyCF) beobachtet werden. Dies führte zu der Entscheidung die weiteren Versuche mit 6 mm CF durchzuführen.

Die rezyklierten Fasern, die kommerziell erworben wurden, brachten zusätzlich Schwierigkeiten in der Bearbeitung der Fasern, hauptsächlich durch die große Streuung der Faserlängen. Wie aus Abbildung 23 deutlich ersichtlich, hatten sich die längeren Fasern verklumpt und um den Rührer gewickelt, was dazu führte, dass keine Weiterverarbeitung möglich war, bevor diese Verklumpungen nicht entfernt wurden. Dem musste durch Anpassungen in der Rezeptur Rechnung getragen werden.



Abbildung 23: Rotor mit Faserumschlingungen

5.2.3 Übertragbarkeit auf kontinuierlichen Prozess

Kohlenstofffasern lassen sich in Wasser nur schlecht dispergieren. Als Dispergierhilfe wurde Carboxymethylcellulose (CMC) hinzugegeben - dadurch werden die Scherkräfte erhöht und es findet eine bessere Vermischung der Fasern statt. Zusätzliche Strömungsbrecher in den Faser-mischungsaggregaten führen zu einer noch besseren Durchmischung der Fasersuspension. Je kürzer die Faser desto besser und homogener lassen sich die Fasern dispergieren und an-

schließlich im Nassvliesprozess verarbeiten. Vliese mit kurzen Fasern zeigen im Vergleich zu den längeren Fasern ein homogeneres Vliesbild (siehe Abbildung 24). Die Orientierung der Fasern im Nassvlies ist über die Siebgeschwindigkeit und das Fördervolumen der Stoffkonzentration steuerbar. Es wurden Nassvliese mit Flächengewichten von 100, 150 und 250 g/m² auf den Nassvliesanlagen von Fa. Pill und Neenah Gessner hergestellt.



Abbildung 24: Nassvliese aus CF mit 12 mm (links), 18 mm (mittig) und 36 mm (rechts) Faserlänge [19]

Um ein Zusammenhalt der Fasern im Nassvlies von Neenah Gessner zu gewährleisten, war ein geringer Binderanteil im Vlies notwendig. Dieser wurde durch eine Zumischung von Bindefasern wie z.B. 3% PVOH realisiert, welche direkt nach der Vliesherstellung im Trockner aufgeschmolzen wurden. Durch die Verwendung des Dispergiermittels CMC im PILL Nassvliesprozess findet eine Verklebung der Fasern statt, sodass auf eine zusätzliche Bindefaser verzichtet werden kann.

5.3 Vlies-Herstellung im Trockenlegeverfahren^[20]

Die Homogenität der Trockenvliese wird durch eine gleichmäßige Auflösung und Durchmischung der Fasern sowie eine gleichmäßige Zuführung der Fasern zur Krempel beeinflusst. Das aus der Krempel kommende gerichtete Faserflor wird mithilfe des Kreuzlegers zu einem Vlies dubliziert und vergleichmäßigt. Der Kreuzleger steuert das Flächengewichts und orientiert die Fasern quer zur Produktionsrichtung. Anschließend wird das Vlies mit einer Nadelmaschine verdichtet und verfestigt (siehe Abbildung 25).



Abbildung 25: Trockenvlies - Kreuzlegung (links) mit anschließender Vernadelung (rechts) [20]

In der Faservorbereitung und im Trockenvliesprozess werden die Fasern mehrfach von einer Walze auf eine andere übergeben. Durch schonende Garnituren auf den Walzen und geringe

Geschwindigkeiten wird die mechanische Beanspruchung gering gehalten. Es findet dennoch eine Einkürzung der Faserlänge auf ca. 70 mm statt und zu kurze Fasern, welche nicht übergeben werden können, fallen aus dem Prozess.

Im Projekt wurden Trockenvliese mit Flächengewichten von 100, 150, 200 und 250 g/m² der Fa. SGL ACF und der Fa. Autefa verglichen.

6 Mechanische Auswertung

Ein Teil der hergestellten Vliese bestand aus 100% CF Fasern zur Infiltration mit Epoxidmatrix (Duomer), der andere Teil der Vliese (Mischvliese) bestand aus 25-30% CF mit 70-75% Polypropylenfasern als thermoplastische Matrix.

6.1 Vergleich der CFK Herstellungsverfahren mit unterschiedlichen Matrixsystemen^{[19], [20]}

Die Weiterverarbeitung der im Nasslege- und Trockenlegeverfahren hergestellten Vliese erfolgte in unterschiedlichen CFK Herstellungsprozessen (siehe Abbildung 26). Bei dem VARI (Vacuum assisted resin infusion) Verfahren wurde das Vlies mithilfe eines Vakuumaufbaus mit Epoxidharz infiltriert und anschließend ausgehärtet, dabei wurden geringe FVG von 10% bis 20% erreicht. Das RTM (Resin transfer moulding) Verfahren ermöglicht die Herstellung von CFK aus Epoxidharz mit 30% FVG. Das Vlies wurde hierbei in einem RTM-Werkzeug in der Heizpresse infiltriert und anschließend ausgehärtet. Durch das Verpressen von Mischvliesen aus CF und Polypropylenfasern (PP-Matrix) in einer Heizpresse können FVG von 25-30% erzielt werden. Sowohl Trockenvliese als auch Nassvliese ließen sich gut zu CFK Bauteilen weiterverarbeiten.



Abbildung 26: Weiterverarbeitung CF-Vliese zu CFK – VARI-Prozess mit Epoxidmatrix (links), RTM-Prozess mit Epoxidmatrix (mittig), Heizpressverfahren mit Polypropylenmatrix (rechts) [19], [20]

Bei Betrachtung der mechanischen Kennwerte werden die Einflüsse der jeweiligen CFK-Herstellungsprozesse, der verwendeten Matrixsysteme, der Faservolumengehalt und die unterschiedlichen Legeverfahren deutlich (siehe Abbildung 27). Mithilfe des RTM Prozesses konnten 65% höhere mechanische Eigenschaften als mit der Heizpresse erzeugt werden. Die Fasermatrixhaftung und die daraus resultierenden höheren mechanischen Eigenschaften werden

bei den Trockenvliesen durch ein Epoxidsizing, welches auf den im Vlies verarbeiteten Verschnittfasern haftet, begünstigt. Die Verarbeitung von industriell rezyklierten (thermisch behandelten) und dadurch unbeschichteten CF in Nassvliesen führt zu etwas geringeren mechanischen Eigenschaften. Die mechanischen Kennwerte der PP-Vliese können jedoch mithilfe von Haftvermittlern verbessert werden.

Um eine Erhöhung des FVG im VARI-Verfahren zu erzeugen, muss das VARI-Verfahren unter definierter Drucklast (Pressverfahren) untersucht werden. Vermutlich lassen sich hier deutlich erhöhte Faservolumenanteile erzielen, wodurch die gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften optimiert werden könnten.

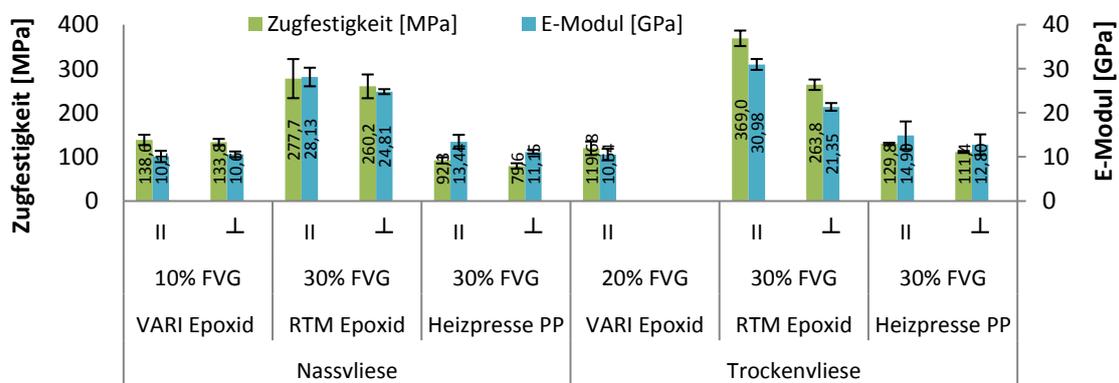


Abbildung 27: mechanische Eigenschaften der Nass- und Trockenvliese aus verschiedenen CFK Herstellungsprozessen (|| = Faserrichtung MD; ⊥ = Querrichtung CD). [19], [20]

6.1.1 VARI Herstellungsverfahren

Im ersten Schritt wurden Nassvliese der Fa. PILL aus Neufasern mit den rezyklierten Fasern mit 12, 18 und 36 mm Faserlänge und einem FVG von 10% verglichen. Sowohl die Neufasern #1, als auch die rezyklierten Fasern #2 weisen bei kurzen Faserlängen höhere Zugfestigkeiten und E-Moduln auf als bei langen Faserlängen. Die gemittelte Zugfestigkeit aus MD und CD der vCF mit 18 mm Faserlänge ist um 36% geringer und mit 36 mm Faserlänge um 46% geringer als das gleiche Neufasermaterial mit 12 mm Faserlänge. Bei den rezyklierten Materialien ist die Abweichung der Zugfestigkeit etwas geringer, die gemittelte Zugfestigkeit der Materialien mit Faserlängen von 18 und 36 mm ist um 20 und 25% geringer als die Materialien mit 12 mm Faserlänge. Die kurzen Fasern lassen sich im Nassvliesprozess am besten dispergieren, das Material bildet eine homogene Mischung und lässt sich am gleichmäßigsten verarbeiten, die Festigkeiten sind dadurch am höchsten. Je länger die Fasern, desto schwieriger wird die homogene Verarbeitung der Fasern im Nassvliesprozess, es bilden sich Faseransammlungen und während der Verarbeitung findet möglicherweise eine Einkürzung der Faserlänge statt. Die Fasern mit 18 und 36 mm Faserlänge weisen bereits als Neufasern niedrige Eigenschaften auf.

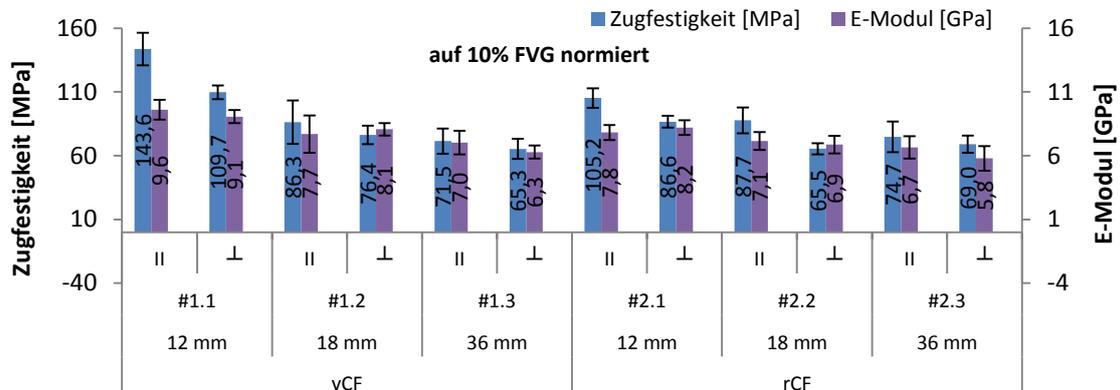


Abbildung 28: Zugfestigkeit und E-Modul der vCF und rCF mit Betrachtung der unterschiedlichen Faserlängen (|| = Faserrichtung MD; ⊥ = Querrichtung CD). - Pill Nassvliese im VARI-Prozess (EP-Matrix) [19]

Ein Einfluss der Faserlänge ist in den Biege- und Charpyeigenschaften nicht eindeutig erkennbar (siehe Abbildung 29).

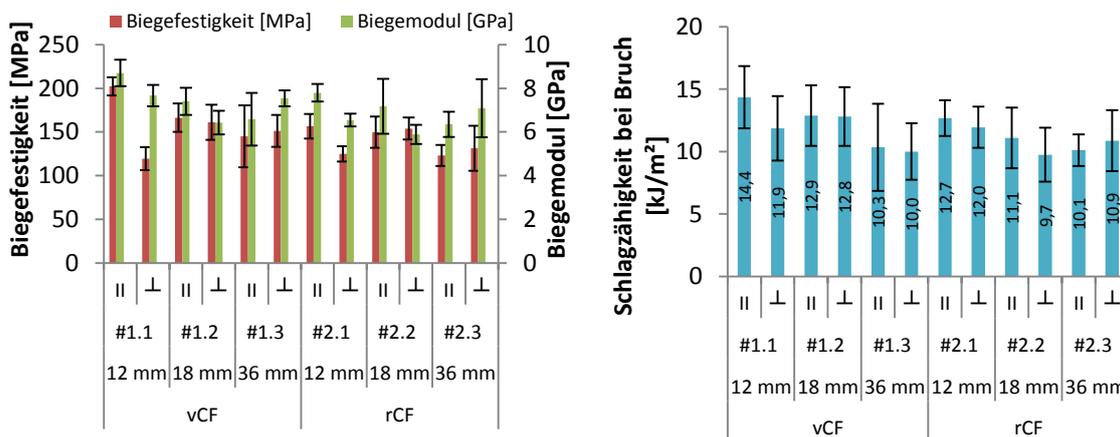


Abbildung 29: Biegefestigkeit und Biegemodul (links) und Charpy Schlagzähigkeit (rechts) der vCF und rCF mit Betrachtung der unterschiedlichen Faserlängen (|| = Faserrichtung MD; ⊥ = Querrichtung CD). - Pill Nassvliese im VARI-Prozess (EP-Matrix) [19]

Beim Vergleich der Neufasern, rezyklierten und industriell rezyklierten Fasern mit jeweils 12 mm Faserlänge und einem FVG von 10% können ähnliche Zugeigenschaften erkannt werden, wie in Abbildung 30 ersichtlich ist. Die Neufasermaterialien #0 und #1.1 weisen ähnliche gemittelte Zugfestigkeiten bei gleicher Faserlänge auf. Das industrielle rCF Material #3.1 ist mit dem thermisch behandelten Material #2.1 vergleichbar bei vermutlich gleicher Faserlänge. Stichproben der Einzelfaserlängenmessung mithilfe der IST AG haben gezeigt, dass die Faserlängenverteilung bei 1 bis 16 mm liegt, was zu besseren Eigenschaften des Materials führen sollte. Das Fasermaterial liegt dennoch auf dem Niveau des thermisch behandelten Materials #2.1. Die Schädigung der Faser durch die thermische Behandlung wird gegenüber dem Neufasermaterial sichtbar. Grund dafür kann eine fehlende Faser-Matrix-Anbindung sein, welche durch die thermische Behandlung verloren geht.

Das industriell thermisch behandelte rCF Material #4.1 mit einer Faserlängenverteilung von 10-30 mm zeigt sehr gute gemittelte Zugfestigkeiten und erreicht dabei das Neufaserniveau. Diese guten Eigenschaften des thermisch behandelten Materials sind auf die Faserlängenverteilung zurückzuführen. Die sehr kurzen Fasern legen sich in die Hohlräume, die durch die längeren Fasern entstehen, und bilden somit ein sehr homogenes Nassvlies. Zudem haben Stichproben der Einzelfaserlängenmessung mithilfe der IST AG ergeben, dass das Material eine noch größere Bandbreite der Faserlänge von 1 bis 50 mm aufweist. Des Weiteren könnte es sich bei dem industriell rezyklierten Material um einen anderen Fasertypen oder auch um rezyklierte trockene Neufasern handeln.

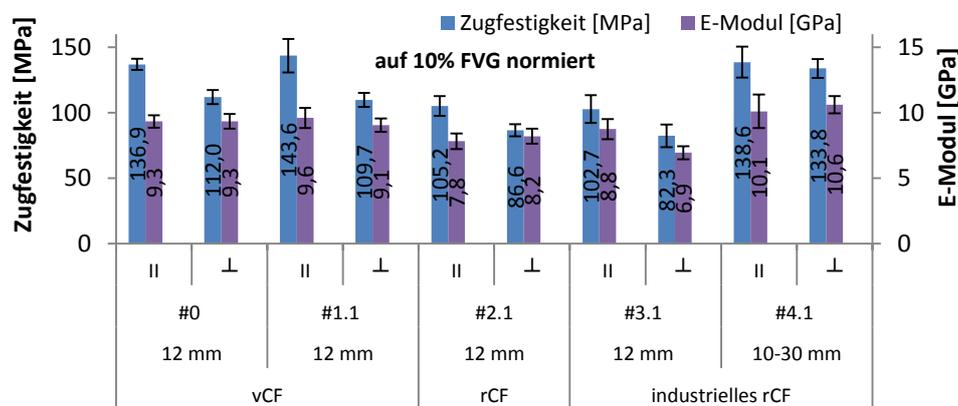


Abbildung 30: Zugfestigkeit und E-Modul vCF, rCF und industrielle rCF (|| = Faserrichtung MD; ⊥ = Querrichtung CD). - Pill Nassvliese im VARI-Prozess (EP-Matrix). [19]

Die Biegefestigkeit zeigt ausschließlich bei allen kurzen Fasern mit 12 mm Länge einen großen Unterschied mit durchschnittlichen 30,7% höheren Biegefestigkeiten in Längsrichtung. Die Charpy-Schlagzähigkeitsprüfung zeigt keinen eindeutigen Einfluss von Faserlänge und thermischer Behandlung. Dennoch zeigt sich in den hohen Werten der Materialien #0, #1.1 und #4.1, dass das Messverfahren durchaus zur Bewertung von unterschiedlichen Schlagzähigkeiten an Vliesen herangezogen werden kann.

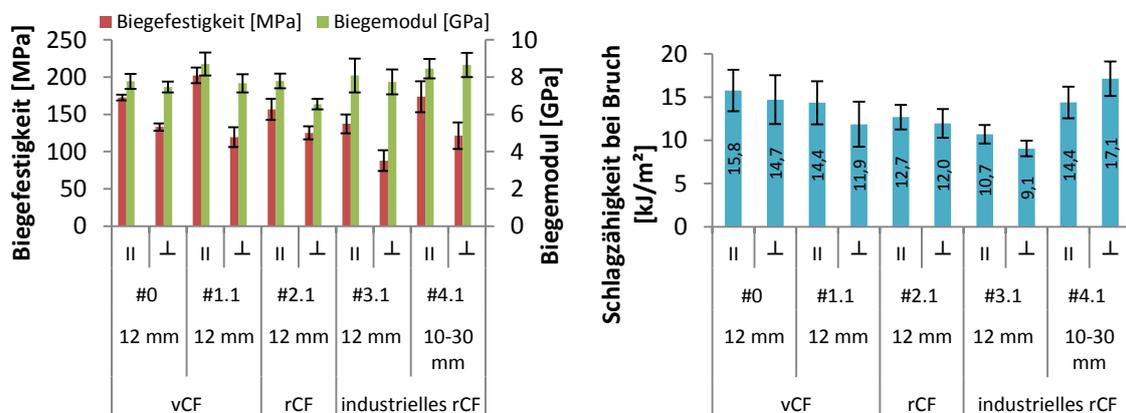


Abbildung 31: Biegefestigkeit & -modul (links) und Charpy Schlagzähigkeit (rechts) vCF, rCF und industrielle rCF (|| = Faserrichtung MD; ⊥ = Querrichtung CD). - Pill Nassvliese im VARI-Prozess (EP-Matrix). [19]

6.1.2 RTM Verfahren

Der RTM-Herstellungsprozess ermöglicht es, Faservolumenanteile von 30% zu erzeugen. Um eine 2 mm dicke CFK-Platte aus einem 150 g/m² Vlies zu erzeugen, werden beispielsweise 7 Vlieslagen für einen FVG von 30% und 10 Vlieslagen für einen FVG von 40% benötigt.

Die mechanischen Kennwerte des RTM-Vlies-Epoxid CFK sind durch den höheren FVG ebenfalls höher als die des VARI-Vlies-Epoxid CFK mit 10% FVG. Vergleicht man die mechanische Festigkeit der Trockenvliese mit den Nassvliesen in Faserrichtung ist eine um 100 MPa höhere Festigkeit in den Trockenvliesen verzeichnet.

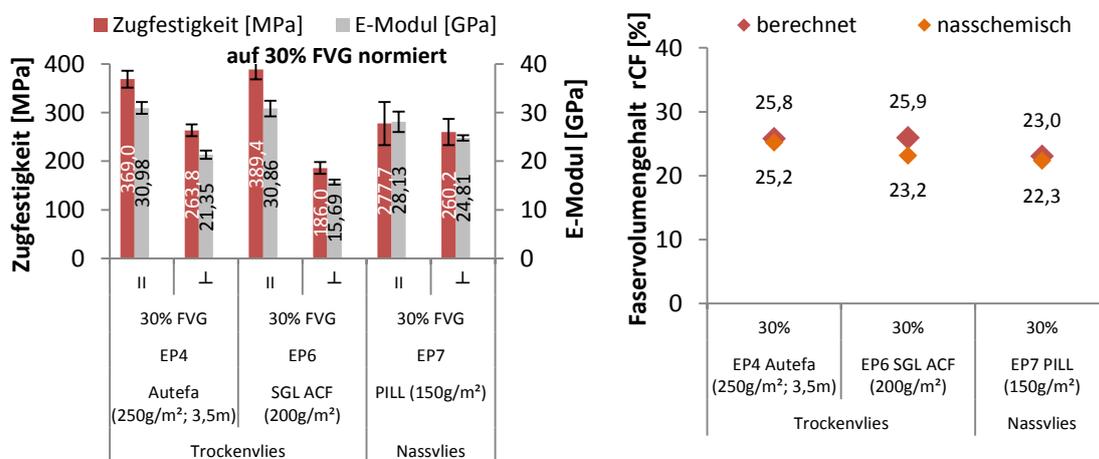


Abbildung 32: Vliese im RTM Verfahren (EP-Matrix) - Zugfestigkeit und E-Modul (links) und Faservolumengehalt (rechts) - (II = Faserrichtung MD; ⊥ = Querrichtung CD). [20]

Bei Überprüfung des Faservolumenanteils der CFK-Proben durch eine nasschemische Faservolumenanteilsbestimmung wird deutlich, dass diese unter 30% liegen. Grund dafür sind etwas zu geringe Pressdrücke an der RTM-Pressen. Durch einen höheren Pressdruck der RTM-Pressen kann der Faservolumenanteil erhöht werden (siehe Abbildung 33). Für einen FVG von 30% wird ein Pressdruck von rund 60 bar benötigt.

Bei einer zu hohen Kompaktierung der Fasern besteht allerdings die Gefahr der Fasereinkürzung. Die in dem Vlies vorliegenden Einzelfasern werden durch zu hohe Drücke querbelastet und brechen möglicherweise ab. Die Auswirkung der hohen Kompaktierungsdrücke auf die Faserlänge muss in weiteren Studien überprüft werden. Bei gleichem Kompaktierungsdruck können mit Trockenvlies höhere FVG erzeugt werden als mit Nassvlies.

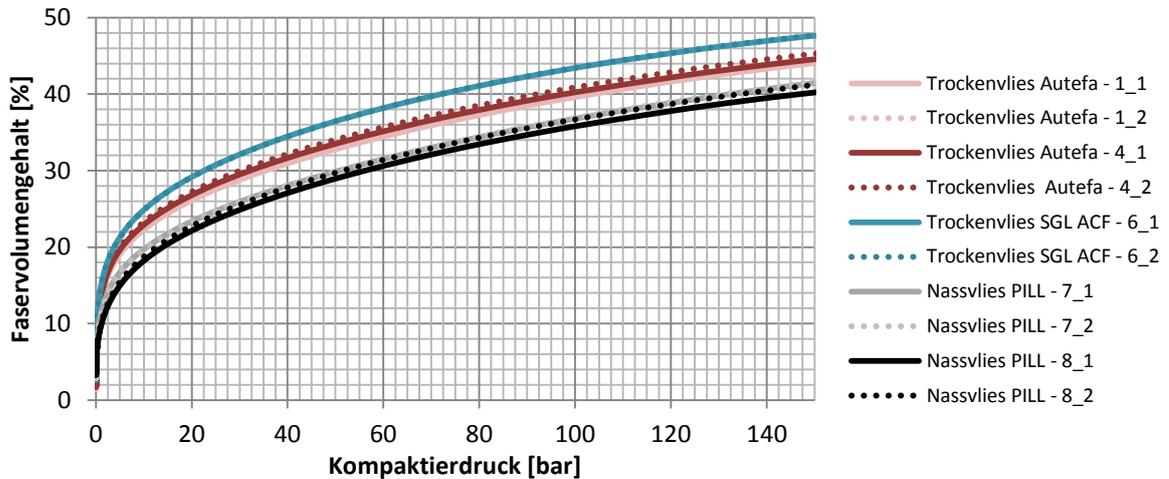


Abbildung 33: Kompaktierbarkeit der Vliese zur Bestimmung des Faservolumengehalts [20]

6.1.3 Heizpress- Verfahren

Mischvliese aus C-Fasern- und Thermoplast Fasern können durch das Heizpressverfahren direkt zu einem CFK weiterverarbeitet werden. Die Thermoplast-Fasern (Polypropylen) dienen dabei als CFK-Matrix, aus diesem Grund ist kein weiterer Infiltrationsschritt notwendig.

Die mechanischen Kennwerte der in der Heizpresse konsolidierten Mischvliese aus CF und PP mit 25-30% FVG sind im Vergleich zu den im RTM-Prozess hergestellten Vliese deutlich geringer (siehe Abbildung 34).

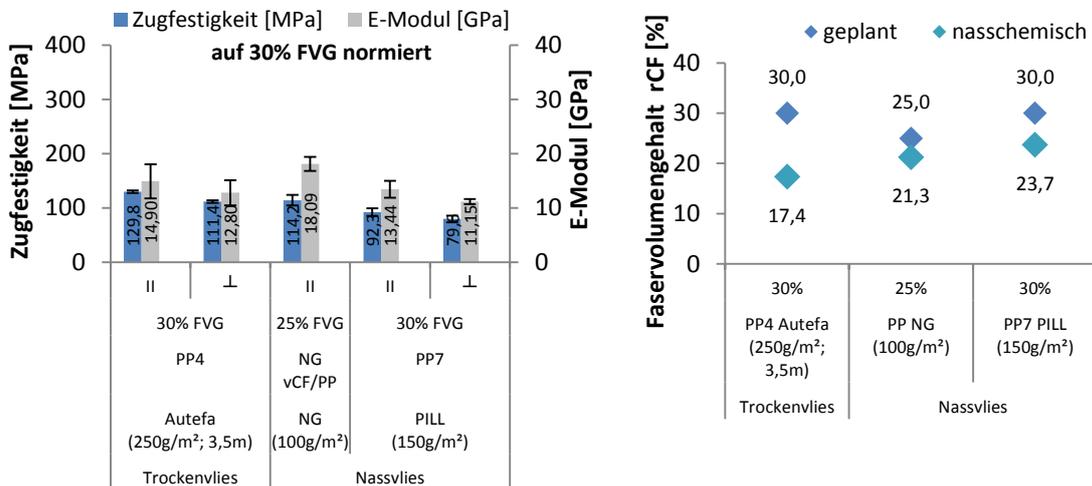


Abbildung 34: Mischvliese im Heizpressverfahren (PP-Matrix) - Zugfestigkeit und E-Modul (links) und Faservolumengehalt (rechts) - (II = Faserrichtung MD; ⊥ = Querrichtung CD). [20]

Der Faservolumengehalt der Mischvliese wird bereits vor der Vliesherstellung durch die Faser- vorlage und anschließende Mischung bestimmt. Der nasschemisch bestimmte FVG weicht von dem geplanten deutlich ab (siehe Abbildung 34). Diese Abweichung ist mit aus dem Prozess fallenden Fasern während der Vliesherstellung und in den Vermischungsaggregaten zurück-

bleibenden Fasern zu begründen. Der geplante Faservolumengehalt weicht möglicherweise bereits im Vlies von der zuvor eingewogenen Fasermischung ab.

Eine Grundvoraussetzung für hohe mechanische Kennwerte ist eine gute Fasermatrixanhaftung. Die verwendeten CF der Trockenvliese weisen ein Epoxidsizing auf, welche die Fasermatrixanhaftung zu Epoxid und nicht zu PP begünstigt. Die CF der Nassvliese sind durch eine vorherige thermische Behandlung unbeschichtet. Die Verwendung von Polypropylenfasern mit integriertem Haftvermittler z.B. Maleinsäureanhydrid würde zu einem positiven Effekt der CF-PP Haftung und den damit verbundenen höheren mechanischen Eigenschaften führen.

Die mechanischen Kennwerte der von Neenah Gessner hergestellten Nassvliese aus Neufasern und rezyklierten Fasern werden in Abbildung 35 gegenübergestellt. Durch die thermische Behandlung der Fasern findet eine Reduzierung der Zugfestigkeit um 20% im Vergleich zum Neufaserniveau statt. Der Faservolumengehalt ist geringer als zuvor in Mischung vorgegeben. Die Fasermischung besitzt aufgrund der in den Vermischungsaggregaten zurückbleibenden Fasern, sowie den zu langen aus dem Prozess genommenen Fasern nicht mehr exakt 25% FVG.

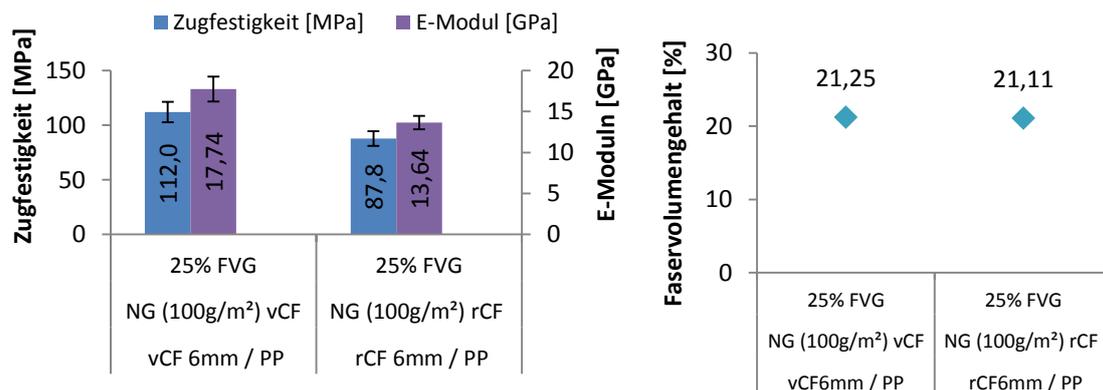


Abbildung 35: - Neenah Gessner Nassvliese im Heizpressverfahren (PP-Matrix) - Zugfestigkeit und E-Modul (links) und Faservolumengehalt (rechts) der Neufasern und rezyklierten Fasern [20]

6.2 Drapierverhalten

Vliese weisen bereits im nicht erwärmten Zustand ein gutes Drapierverhalten auf. Die Mischvliese werden bei der Bauteilherstellung direkt in ein Umformwerkzeug gelegt und verpresst. Im Vergleich zu Geweben oder Gelegestrukturen zeigen Vliese durch die begrenzte Stapelfaserlänge ihre Vorteile. Auch bei hohen Umformgraden werden durch Verschiebungen der Verstärkungsfasern Löcher und Falten verhindert (siehe Abbildung 36).

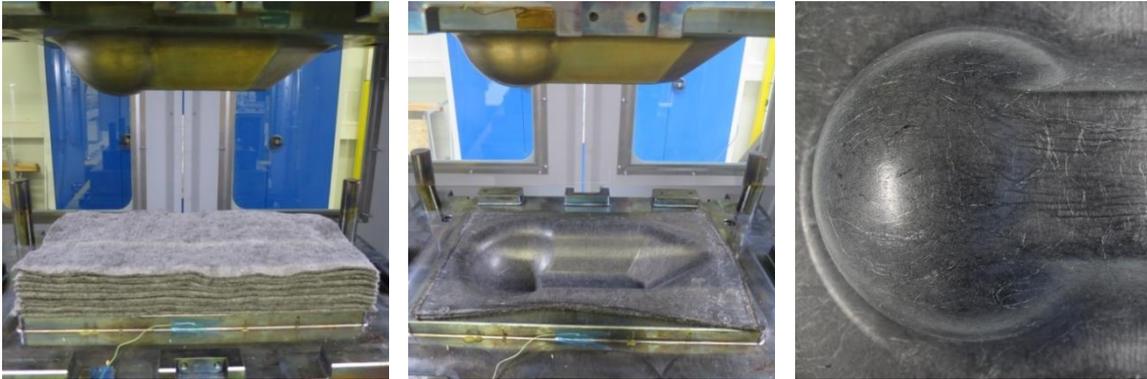


Abbildung 36: Umformungsverhalten des Mischvlieses aus 12 Lagen [0°/90°] (links); Schikanebauteil umgeformt im Werkzeug (mittig) und 3D-Kontur mit hohen Umformgraden (rechts). [20]

7 Ökologische Betrachtung / LCA-Studie zum CFK-Recycling

Gemäß Gesetzgebung ist das Recycling von Stoffen sonstigen Verwertungsmethoden vorzuziehen (Abfallhierarchie [21]). Das Recycling von Produktionsabfällen bzw. End of Life (EoL) - Bauteilen ist aus umwelttechnischer Sicht allerdings nur dann sinnvoll, wenn sich ein ökologischer Nutzen daraus ergibt. Um einen solchen umweltrelevanten Vorteil aus dem Recycling von Carbonfaserstrukturen zu erhalten, muss der Recyclingprozess bei gleicher Funktionalität der Recyclatfasern (rCF) gegenüber den Neufasern geringere Umweltwirkungen aufweisen als der Herstellungsprozess von Neufasern.

Eine gängige Methodik zur vollständigen ökologischen Charakterisierung von Prozessen bzw. Produkten stellt die Ökobilanzierung (LCA - Life Cycle Assessment) dar. Im Rahmen der DIN EN 14040ff. wird eine Vereinheitlichung des Vorgehens bei der ganzheitlichen Bilanzierung angestrebt. Dabei werden alle In- und Outputflüsse des zu betrachtenden Systems quantitativ erfasst und die daraus resultierenden Umweltwirkungen berechnet. Als Hilfestellung werden verschiedene Softwarelösungen angeboten, mit welchen das zu bewertende System simuliert und anschließend die resultierenden Umweltwirkungen berechnet werden können.

Eine ganzheitliche Bilanzierung ist nur dann möglich, wenn alle Prozessdaten vollständig ermittelt werden können. In diesem Zusammenhang werden Daten aus Messungen, Berechnungen, Literatur oder Abschätzungen durch Experten genutzt. CFK-Recyclingprozesse sind zum größten Teil noch nicht tiefgehend erforscht. Aufgrund der geringen Menge an verfügbaren Daten stellt die Erstellung einer LCA-Studie zum CFK-Recycling eine besondere Herausforderung dar. Bei der Ökobilanzierung von CFK-Recyclingverfahren müssen zunächst die Input- und Outputflüsse erfasst und quantifiziert werden, um bei der Bilanzerstellung deren Einfluss auf die Umwelt ermitteln zu können.

Durch die Ergebnisse einer solchen Studie kann eine Abschätzung der Umweltwirkungen des Recyclingprozesses und der daraus resultierende ökologische Nutzen vorgenommen werden.

Weiterhin können mittels einer Sensitivitätsanalyse mögliche Stellgrößen und Prozessparameter für eine Reduktion der Umweltwirkungen identifiziert werden.

7.1 Modellierung der Herstellungs- und Recyclingprozesse

Ein Ziel von ForCycle war es, die Umweltwirkungen mindestens eines Recyclingverfahrens ökobilanziell in Anlehnung an die DIN EN 14040ff. zu erfassen. Aufgrund des Bestrebens, Neufasern (vF) durch rCF zu ersetzen, wurde ein Vergleich der Umweltwirkungen von rCF mit den Umwelteinflüssen bei der Herstellung von vF durchgeführt. Studienergebnisse [22] weisen darauf hin, dass aufgrund ähnlicher mechanischer Kennwerte von rCF und Glasfasern (vGF¹) ein Ersatz von vGF durch rCF in ausgewählten Bereichen angedacht ist. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden LCA-Studie neben einem ökologischen Vergleich von rCF zu Carbonfasern (vCF²) ebenfalls ein Vergleich von rCF zu vGF angestrebt.

Zur Modellierung der Prozesse in ForCycle wurde die am Fraunhofer IGCV verfügbare Software GaBi (Ganzheitliche Bilanzierung) der Firma Thinkstep verwendet. Zur Quantifizierung von Umweltwirkungen wurde die im „Center of Environmental Science“ der Universität Leiden, Niederlande entwickelte CML-Methode genutzt. Dabei werden für jede Wirkungskategorie (WK) entsprechend, umweltwirksame Äquivalente (Äqv.) berechnet³. Bei der Modellierung wurde für jeden relevanten Prozess ein Modell verwendet, in welchem alle dem Prozess zu- und abgeführten Stoffe berücksichtigt werden. Dabei wurden Daten aus der GaBi-Datenbank, am Fraunhofer IGCV bereits vorhandene Daten und die im Laufe des Projektes neu generierten Daten genutzt. In folgenden Unterkapiteln wird die Modellierung der einzelnen, für ForCycle relevanten Prozesse beschrieben.

7.1.1 Modell zur Carbonfaserherstellung

Für die Simulation der Carbonfaserherstellung (CF-Herstellung) wurde ein bereits vorhandenes auf Literaturdaten basierendes Modell des Fraunhofer IGCV verwendet. Da sich die Umwelteinflüsse des Herstellungsprozess je nach Produktionsstandort und angewandter Technik unterscheidet, können anhand des Modells zwei Szenarien untersucht werden. Diese Szenarien unterscheiden sich hauptsächlich durch das Verhältnis von verbrauchter thermischer zu verbrauchter elektrischer Energie, sowie durch die Art der Stromerzeugung:

- Szenario 1: Thermische Energie (aus Erdgas) dominierend, Strom aus Strommix;
- Szenario 2: Elektrische Energie dominierend, Strom aus Wasserkraft;

Die verwendete elektrische Energie aus „Szenario 1“ wurde als Strommix der länderspezifischen Stromzusammensetzungen der Hauptproduktionsstandorte von Carbonfasern (Japan,

¹ virgin Glas Fiber

² virgin Carbon Fiber

³ Nähere Informationen zur CML-Methode unter [23]

USA sowie EU) angenommen. Aufgrund der Bemühungen einzelner Carbonfaserhersteller die Umwelteinflüsse der CF-Herstellung durch Verwendung erneuerbarer Energien zu reduzieren, wurde das entsprechende „Szenario 2“ erstellt.

7.1.2 Modell zur Glasfaserherstellung

In der GaBi-Datenbank ist ein aggregierter Prozess zur Produktion von Glasfasern bereits verfügbar. Dieser Datensatz bezieht sich auf in Deutschland angewandte Technologien und Importstatistiken. Anhand des Prozesses kann die Herstellung von Endlosfasern aus E-Glas, welche beispielsweise anschließend zu GFK-Produkten weiterverarbeitet werden, bilanziert werden.

7.1.3 Pyrolysemodell

Im Rahmen von ForCycle wurde ein Modell zur Bilanzierung des Pyrolyseprozesses am Fraunhofer IGCV erstellt. Folgende Kriterien wurden bei der Modellentwicklung berücksichtigt.

7.1.3.1 Festlegung der Modellierungsmethodik

Grundsätzlich wird bei der Bilanzierung von Recyclingprozessen zwischen zwei Modellierungsmethoden unterschieden.

- Bei der *Avoided Burden* Methode besitzt der Input-Abfallstrom eine Vorkette (Produktionsphase und Nutzungsphase) und beinhaltet somit eine gewisse Wertigkeit. Diese Wertigkeit wird bei der Verwertung bzw. beim Recycling in Form einer Gutschrift in das Gesamtsystem zurückgeführt (z.B. Rückführung von rCF).
- Beim *Recycled content* Ansatz wird der Prozess der Verwertung bzw. des Recyclings vom vorhergehenden Produkt separiert betrachtet. Der Abfallstrom wird ohne Vorkette dem System zugeführt. Dabei können die Umwelteinflüsse verschiedener Herstellungs-, Recycling- und Verwertungsprozesse direkt miteinander verglichen werden.

Ziel von ForCycle ist ein reiner Vergleich von Faserherstellungs- und Faserrecyclingprozessen. Es sollen keine Vorketten der Produktsysteme betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde der Recycled Content Ansatz zur Modellierung des Pyrolyseprozesses gewählt.

7.1.3.2 Datenerhebung

Zu Beginn des Projektes lagen keine Daten zu den Einzelverbräuchen des Pyrolyseprozesses vor. Um eine ganzheitliche Bilanzierung durchführen zu können, mussten zunächst alle In- und Outputflüsse des Prozesses erfasst und quantifiziert werden. In Tabelle 4 sind alle in das Pyrolysemodell zu integrierenden Prozesse zusammengefasst.

Tabelle 4: Modelldaten des Pyrolyseprozesses

Pyrolyseprozess	
Input	Output
CFK-Abfallmenge	rCF (Recyclatfasermenge)
Trägergasherstellung und -verbrauch (Stickstoff)	Emissionen
Stromherstellung und -verbrauch	ggf. Strom
Kühlwasseraufbereitung und -verbrauch	ggf. thermische Energie
Verbrennungsgasherstellung und -verbrauch ⁴	

Die Ermittlung und Quantifizierung der Prozessdaten wurde durch Vermessung von Stoffströmen beim Pyrolyseprozess am Fraunhofer IGCV durchgeführt. Außerdem wurden als Datenquelle Berechnungen, Literaturdaten oder Abschätzungen gemäß Tabelle 5 (Anhang) verwendet.

7.1.3.3 Basisprozess

Beim Pyrolyseofen am Fraunhofer IGCV kann sowohl die Gaszusammensetzung (Trägergas) als auch die Pyrolysetemperatur und -zeit variiert werden, was neben dem Impact auf ökologische Kennzahlen auch eine Auswirkung auf die Performance der rCF haben kann. Bei der Bilanzierung wurde der Pyrolyse-Standardprozess als Basisprozess berücksichtigt. Dabei wurden folgende Prozessparameter eingestellt:

- Trägergas: Stickstoff 600 l/h
- Pyrolysetemperatur: 550 °C
- Heizrate: ca. 5 K/min

Die Dauer des Standardprozesses beträgt ca. 4 h. Als Material für den Basisprozess wurde CFK mit einer Epoxidharzmatrix und einem FVG von ca. 55 % verwendet.

7.2 Bilanzierungsergebnisse der Laboranlage am Fraunhofer IGCV

Bei der Auswertung wurden zwölf relevante WK (siehe Abbildung 37) betrachtet. Neben den WK der CML-Methode wurde der Primärenergiebedarf (aus regenerativen und nicht regenerativen Energiequellen (unterer Heizwert)) berücksichtigt.

Abbildung 37 zeigt den Vergleich des Recyclingprozesses zur thermisch dominierten Carbonfaserherstellung unter Verwendung des länderspezifischen Strommix. Dabei ist das Verhältnis der Umweltwirkungen von rCF/vCF logarithmisch über der Performanceänderung der rCF aufgetragen. Je nach Weiterverarbeitung der rCF und Art des betrachteten mech. Kennwertes, können die Angaben zum Performanceverlust von rCF gegenüber vCF variieren. Beispielsweise

⁴ Beim Verbrennungsgas handelt es sich grundsätzlich um Propangas in welchem ein Anteil an Propan enthalten ist.

wurden bei Einzelfaserzugprüfungen von rCF i.d.R. bessere Kennwerte erreicht, als bei rCF im Verbund mit Epoxidharz [22]. Aus diesem Grund wird in Abbildung 37 eine mögliche Performanceänderung im Bereich von 0 % - 70% der rCF im Vergleich zur vCF berücksichtigt⁵. Durch die Darstellung des Verhältnisses der Umweltwirkungen von rCF/vCF können alle Werte >1, als für den Pyrolyseprozess kritisch gewertet werden d.h., dass in diesem Fall die Pyrolyse höhere Umweltwirkungen aufweist als die CF-Herstellung.

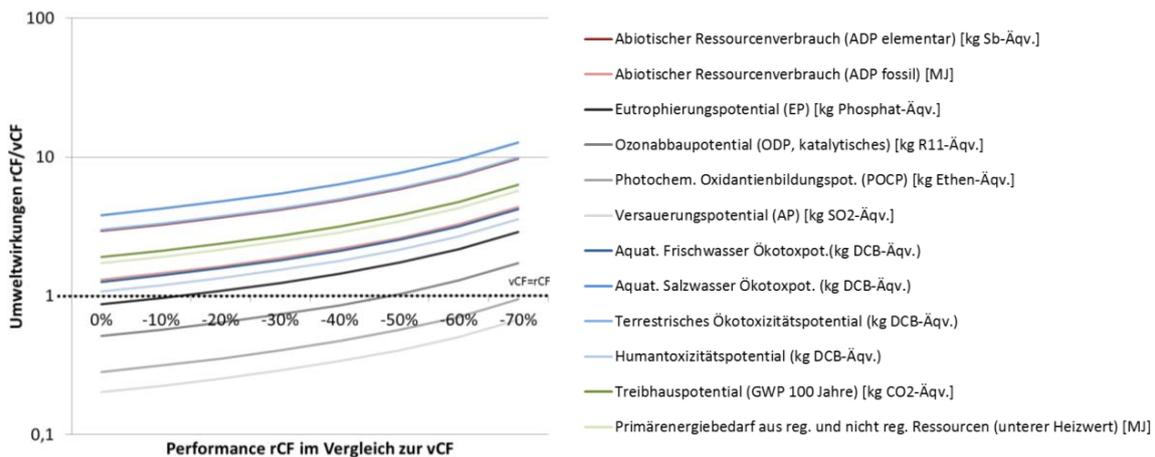


Abbildung 37: Laborprozess im Vgl. zum th. dom. Carbonfaserherstellungsprozess

In den meisten WK weist der Pyrolyseprozess höher Umweltwirkungen auf als der vCF-Herstellungprozess. Als kritischste Wirkungskategorie ist das Aquat. Salzwasser Ökotoxizitätspotential zu erkennen. Bei zunächst geringen Werten der Pyrolyse (geringer Performanceverlust) weist bei steigender Performanceminderung, der Pyrolyseprozess in den WK EP und ODP schlechtere Werte auf als der Carbonfaserherstellungsprozess. Die Werte der Pyrolyse sind beim AP und POCP über alle betrachteten Performanceverluste geringer als die Äqv.-Werte der vCF-Herstellung. Beim Vergleich der Pyrolyse mit dem elektrisch dominierten vCF-Herstellungprozess ist ein ähnliches Verhalten der Umweltwirkungen zu erkennen (Anhang, Abbildung 57).

Die mech. Kennwerte von vCF sind in der Regel deutlich besser als die Kennwerte von vGF. Aus diesem Grund wurde beim Vergleich von rCF und vGF (Abbildung 38) mit der Möglichkeit einer erhöhten Performance von rCF im Vergleich zu vGF kalkuliert. Studien [22] weisen darauf hin, dass nach dem aktuellen Stand der Technik von einer ähnlichen Performance von rCF und vGF auszugehen ist.

⁵ Berücksichtigung eines massebezogenen Performanceverlustes, d.h. bei verringerter Performance muss zum Ausgleich der Performanceminderung eine größere Menge an rCF eingesetzt werden.

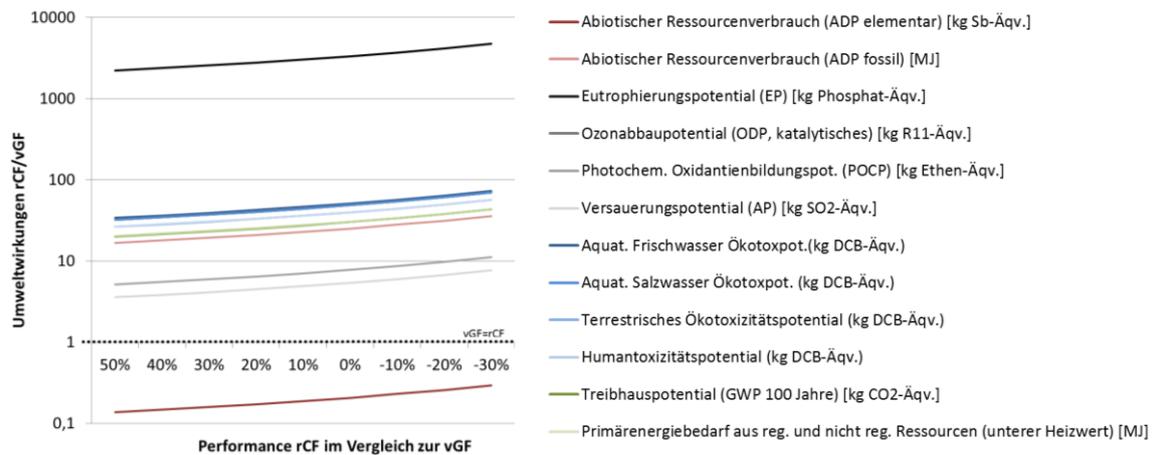


Abbildung 38: Wirkungskategorien des Laborprozesses im Vgl. zur Glasfaserherstellung

Es ist zu erkennen, dass der ADP (elementar) als einzige Wirkungskategorie über alle Performanceänderungen unterhalb der Basislinie verläuft. Dies ist auf den Verbrauch nicht regenerierbarer, stofflicher/elementarer Ressourcen (bspw. Quarzsand und Zirkon) [24] bei der Herstellung von Glasfasern zurückzuführen. In allen weiteren WK weisen die rCF deutlich höhere Umweltwirkungen im Vgl. zu den vGF auf. Als besonders kritisch ist in diesem Zusammenhang das Eutrophierungspotential des Pyrolyseprozesses zu bewerten.

Beim ökologischen Vergleich der rCF mit vF ist der Pyrolyseprozess am Fraunhofer IGCV in den meisten WK als nicht nachhaltig zu bewerten. Aus diesem Grund ist eine gezielte Prozessoptimierung notwendig, um einen ökologischen Nutzen durch das Recycling von CFK zu erreichen.

7.3 Diskussion des Energieverbrauchs

Um den Pyrolyseprozess als Recyclingverfahren von CFK-Produktionsabfällen und EoL-Bauteilen in möglichst vielen WK ökologisch nachhaltig zu gestalten, wurde der Recyclingprozess auf Optimierungsmöglichkeiten hin geprüft. Dazu wurden zunächst die Einflüsse der einzelnen Input- und Outputflüsse aus Tabelle 4 auf den Gesamtprozess untersucht.

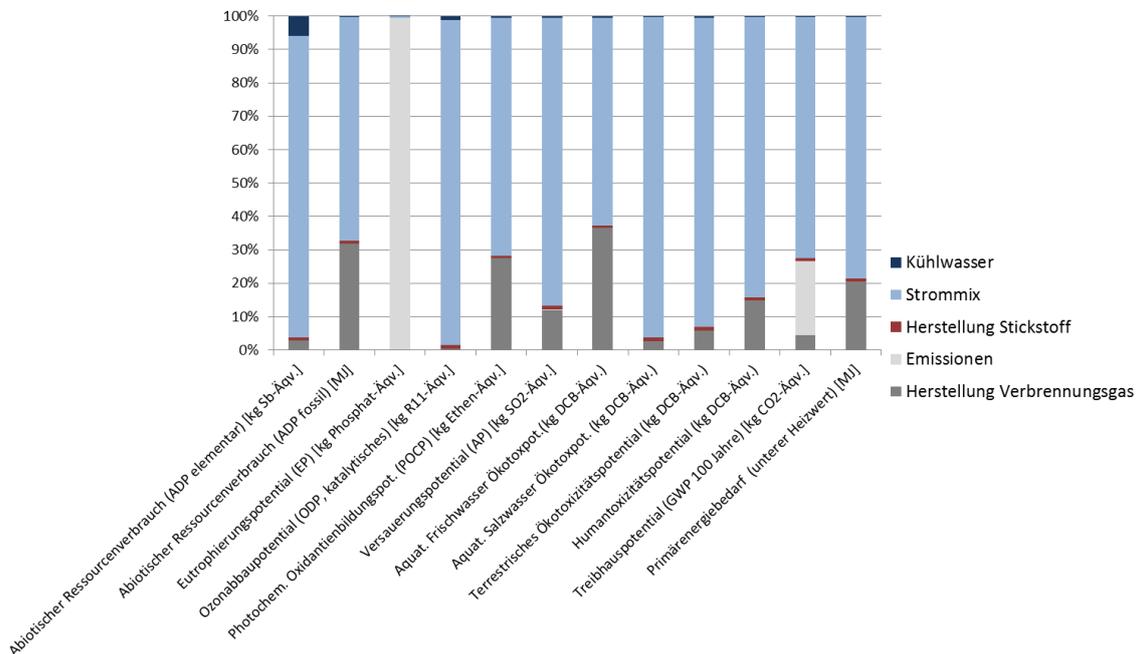


Abbildung 39: Einflussgrößen auf die Wirkungskategorien des Laborprozesses

In Abbildung 39 ist der Einfluss der jeweiligen In- und Outputflüsse auf die einzelnen WK dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass die elektrische Energie in allen WK den höchsten Einfluss aufweist und damit durch dessen Reduktion die größte Optimierung des Prozesses möglich ist. Weiter kann ein deutlicher Impact des Verbrennungsgases auf nahezu alle Wirkungskategorien festgestellt werden. Ein hoher Einfluss der Emissionen ist beim GWP und dem EP zu erkennen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die dargestellten Emissionen nicht lediglich aus der thermischen Zersetzung des Matrixmaterials und der Verbrennung von Propangas entstehen sondern, dass auch das Trägergas (Stickstoff) als Emission den Pyrolyseofen verlässt. Der Einfluss von Kühlwasser und Stickstoffherstellung auf die einzelnen Wirkungskategorien erweist sich als sehr gering (Maximalwerte ca. 1 %). Lediglich beim ADP (elementar) ist ein Einfluss von ca. 6 % durch den Verbrauch von Kühlwasser zu vermerken.

Der Literatur können deutlich geringere Energieverbrauchswerte von Pyrolyseprozessen entnommen werden als die an der Anlage des Fraunhofer IGCV gemessenen Werte [25]. Es ist also davon auszugehen, dass ein energieeffizienterer Pyrolyseprozess als der Laborprozess am Fraunhofer IGCV möglich ist. In diesem Zusammenhang wurde der Laborprozess auf Optimierungspotentiale im Bereich des Energieverbrauchs geprüft.

7.3.1 Optimierung des Energieverbrauchs

Um den Energieverbrauch des Pyrolyseprozesses gezielt senken zu können, wurde eine entsprechende Energiestudie durchgeführt.

7.3.1.1 Energieverbrauch des Laborprozesses

In Abbildung 40 ist der Verbrauch an elektrischer Energie für die jeweilige Prozessphase dargestellt. Untersuchungen zeigen, dass unterhalb einer Temperatur von 200 °C keine thermische Zersetzung der Matrix stattfindet. Aus diesem Grund wird die Nachverbrennung erst gestartet, wenn die Heizzonen des Ofens eine Temperatur von 200 °C erreicht haben (Heizphase 1). Von 200 °C bis zur Zieltemperatur von 550 °C befindet sich der Ofen in Heizphase 2. Die Gesamtdauer der beiden Heizphasen beträgt ca. 2 h. In der Haltephase wird die Zieltemperatur über einen Zeitraum von 30 min konstant gehalten. Die darauffolgende Kühlung des Ofens wird wiederum in zwei Phasen unterteilt. Während der ersten Kühlphase findet weiterhin eine Nachverbrennung der entstehenden Pyrolyseemissionen statt. In Kühlphase 2 wird die Nachverbrennung abgeschaltet. Die Gesamtdauer der Kühlung beträgt ca. 1,5 h.

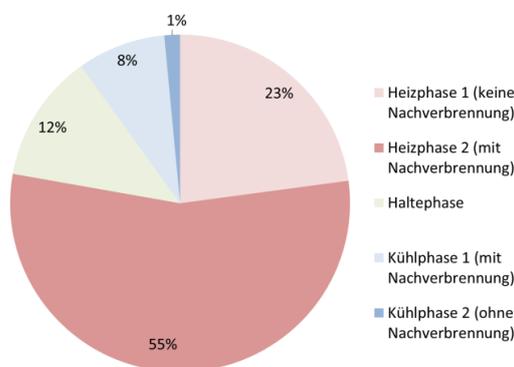


Abbildung 40: Phasenabhängiger Energieverbrauch

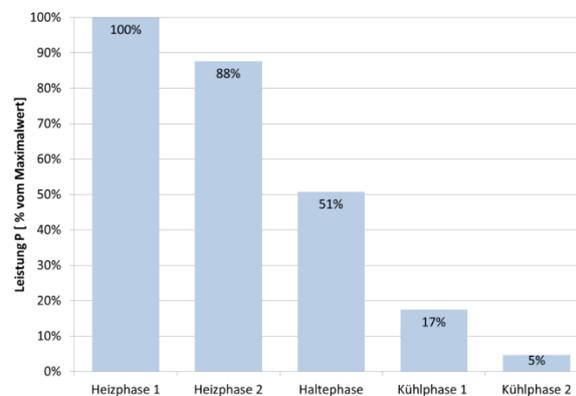


Abbildung 41: Phasenabhängiger Leistungsbedarf

Abbildung 40 zeigt einen signifikanten Einfluss der Heizphasen auf den Gesamtenergieverbrauch (78 %) des Basisprozesses. Dieser hohe Verbrauch ist sowohl auf den erhöhten Leistungsbedarf (Abbildung 41) des Ofens während dieser Phasen als auch auf die Dauer des Prozesses bis zum Erreichen der Zieltemperatur zurückzuführen.

7.3.1.2 Kontinuierlicher Pyrolyseprozess

Aufgrund der Ergebnisse aus Abbildung 40 wurde im ersten Schritt eine Optimierung im Bereich der Heizphasen durchgeführt. Ein mögliches Optimierungsszenario stellt in diesem Zusammenhang eine kontinuierliche Prozessgestaltung dar. In diesem Szenario durchläuft der Abfall, bis zur vollständigen Zersetzung der Matrix, mehrere isotherme Temperaturzonen.

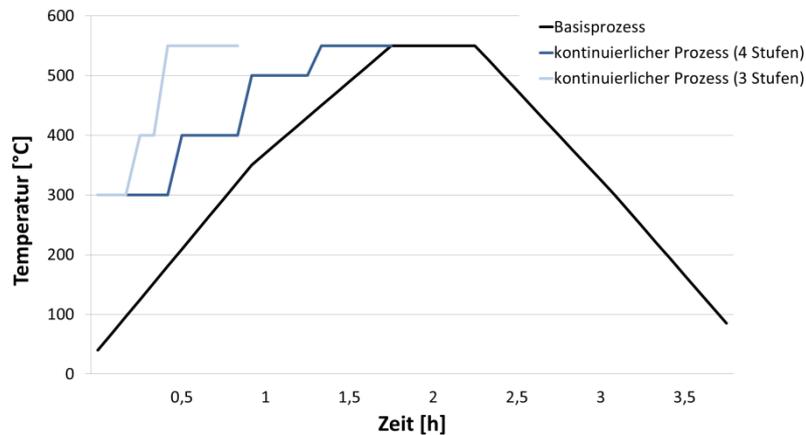


Abbildung 42: Temperaturverlauf Basisprozess und kontinuierliche Prozesse

Abbildung 42 zeigt zwei mögliche kontinuierliche Prozesse im Vergleich zum Basisprozess. Beim kontinuierlichen Prozess mit vier Temperaturstufen wurde die Verweildauer des CFK-Abfalls im jeweiligen Temperaturbereich entsprechend der Heizdauer der Laboranlage gewählt (z.B. Heizdauer von 300 °C - 400 °C, ca. 25 min). Die Starttemperatur des kontinuierlichen Prozesses entspricht der Starttemperatur der therm. Zersetzung des Epoxidharzes (ca. 300 °C). Die Verweildauer von 30 min bei der Zieltemperatur von 550 °C wurde entsprechend dem Basisszenario belassen.

Beim dreistufigen kontinuierlichen Prozess wurde davon ausgegangen, dass der Massenverlust des CFK-Abfalls größtenteils während der Haltephase bei 550 °C stattfindet. Um die Heizphase weiter zu verkürzen wurden lediglich zwei Zwischenstufen zum Erreichen der Zieltemperatur von 550 °C eingefügt. Die Haltezeit der Zwischenstufen wurde auf 10 min verkürzt. Die Verweildauer bei 550 °C wurde gemäß dem Basisszenario bei 30 min belassen.

Durch eine kontinuierliche Prozessgestaltung kann eine signifikante Reduktion des Verbrauchs an el. Energie erzielt werden. Der vierstufige Pyrolyseprozess bewirkt eine Reduktion des Gesamtenergiebedarfs um ca. 67 %. Durch den dreistufigen, kontinuierlichen Prozess kann eine Energieeinsparung von ca. 84 % im Vergleich zum Basisszenario erreicht werden.

7.3.2 Nutzung der Nachverbrennung zur Energierückführung

In den Pyrolyseemissionen ist chemische Energie in Form des Brennwertes gespeichert. Diese Energie wird bei der Nachverbrennung durch Propangas zu thermischer Energie umgesetzt. In einem Optimierungsszenario wurde der Einfluss einer solchen Energierückführung auf die Umweltwirkungen des Pyrolyseprozesses untersucht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass neben der thermischen Energie bei der Verbrennung der Pyrolyseemissionen ebenfalls Energie bei der Verbrennung des Propangases freigesetzt wird. In diesem Zusammenhang wurde lediglich ein Best Case und ein Worst Case Szenario berücksichtigt. Im Worst Case Szenario wird keine Energie rückgeführt (Basisszenario). Beim Best Case Szenario wird ein thermischer und elektri-

scher Wirkungsgrad der Nachverbrennung gemäß BVT (Best verfügbare Technik)⁶ angenommen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten, dass in allen Wirkungskategorien (mit Ausnahme des EP) durch Energierückführung bei der Nachverbrennung eine Reduktion des jeweiligen Äqv.-Wertes um bis zu 46 % erreicht werden kann. Aufgrund des geringen Einflusses der zugeführten elektrischen Energie auf das EP ist durch eine energetische Optimierung des Pyrolyseprozesses keine signifikante Reduktion des Wertes dieser WK möglich.

7.3.3 Nutzung erneuerbarer Energien

Ähnlich wie bei der Bilanzierung der Carbonfaserherstellung wurde für die Bilanzierung des Pyrolyseprozesses ein Szenario erstellt, in welchem statt der Verwendung des länderspezifischen Strommixes, erneuerbare Energien (EE) in den Prozess einfließen. Das deutsche Stromnetz beinhaltet aktuell einen Anteil von ca. 30 % EE, wovon ca. 42 % auf die Stromgenerierung durch On- und Offshore Windkraftanlagen zurückzuführen sind. Aufgrund dieses hohen Anteils ist davon auszugehen, dass bei der Installation einer autarken Stromversorgung einer Pyrolyseanlage mit EE in Deutschland, Windkraft gewählt werden würde. Aus diesem Grund wurde im folgenden Szenario die Nutzung von Windenergie zur Versorgung des Pyrolyseprozesses mit el. Energie untersucht (Abbildung 43).

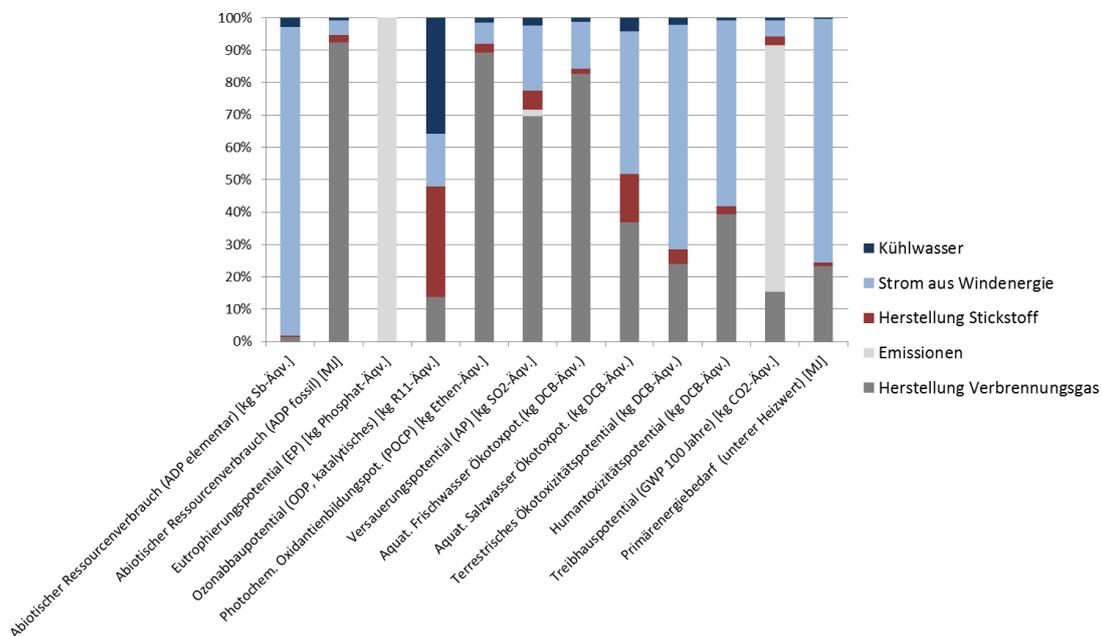


Abbildung 43: Einfluss der Energiequelle

⁶ Aktuell wird durch GuD-Technik gemäß [29], [31], [32] über KWK (Kraft-Wärme-Kopplung) ein Gesamtwirkungsgrad von bis zu 85 % erreicht.

In den meisten WK ist ein signifikanter Abfall des Einflusses der elektrischen Energie im Vgl. zu Abbildung 39 erkennbar. Der Herstellungsprozess des Verbrennungsgases stellt hier einen dominierenden Einflussfaktor dar. Je nach WK kann allerdings auch ein deutlicher Anstieg aller anderen Einflussgrößen festgestellt werden. Durch das bei der Nachverbrennung entstehende Kohlendioxid ist ein hoher Einfluss der Emissionen auf das GWP zu erkennen. Beim ODP steigt der Einfluss der Stickstoffherstellung und Kühlwasseraufbereitung, durch die Verringerung des Einflusses der el. Energie, deutlich an. Aufgrund des bereits geringen Einflusses der el. Energie in Abbildung 37 bleibt das EP in Abbildung 43 nahezu unverändert. Beim Bau von Windkraftanlagen werden (insbesondere bei großen wartungsarmen Anlagen im Offshore-Bereich) nicht regenerierbare, stoffliche Ressourcen wie Neodym und Praseodym als Bestandteile von Permanentmagneten für Generatoren eingesetzt [26]. In Abbildung 43 ist dieser Verbrauch an z.T. kritischen Rohstoffen anhand des starken Einflusses der Windenergie in der WK ADP elementar zu erkennen. Der betrachtete Primärenergiebedarf beinhaltet sowohl regenerative als auch nicht regenerative Energiequellen. Daher bleiben die Werte für diese WK in diesem Szenario unverändert.

7.3.4 Erhöhung der Anlagenauslastung

Bei entsprechenden Untersuchungen konnte kein messbarer Einfluss der Auslastung des Pyrolyseofens auf den Energieverbrauch festgestellt werden. Um die maximale Auslastung des Abluftsystems durch die entstehenden Emissionen nicht zu überschreiten, darf aus Gründen der Arbeitssicherheit der Pyrolyseofen am Fraunhofer IGCV lediglich mit max. 1 kg CFK beladen werden. Bei einem Volumen von 166 L wäre theoretisch eine deutlich höhere Auslastung möglich. Im folgenden Szenario wurde die Auswirkung der Auslastung des Pyrolyseofens auf die jeweiligen WK untersucht.

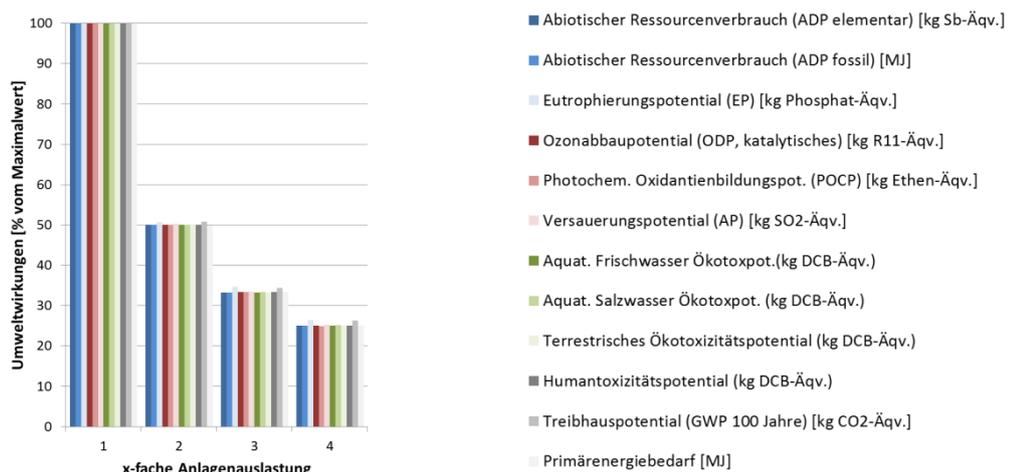


Abbildung 44: Einfluss der Anlagenauslastung

Abbildung 44 zeigt einen signifikanten Einfluss der Auslastung auf die umweltrelevanten Äquivalente der jeweiligen WK. Bei vierfacher Auslastung ist in den meisten WK eine Verringerung

der Werte um ca. 75 % zu erkennen. Es ist festzustellen, dass der Einfluss der Auslastung auf Wirkungskategorien mit einem relativ hohen Einfluss der Emissionen (z.B. EP und GWP) (siehe Abbildung 37) geringer ist als bei anderen WK. Bei steigender Auslastung verringert sich der Energie-, Stickstoff- und Kühlwasserverbrauch pro kg rCF. Die Auslastung hat lediglich einen Einfluss auf die Emissionen des Trägergases (N₂) sowie die durch die Verbrennung von Propan- gas entstehenden Emissionen. Die durch die Zersetzung der Matrix entstehenden Emissionen (Pyrolyseemissionen) können durch eine Erhöhung der Auslastung nicht beeinflusst werden.

7.3.5 Zusammenfassung zu den Ergebnissen der energetischen Optimierung

In Abbildung 45 sind die Optimierungsmöglichkeiten des Basisszenarios am Beispiel des GWP zusammengefasst dargestellt. Demnach kann alleine durch Entwicklung eines dreistufigen kontinuierlichen Prozesses eine Reduktion der CO₂-Äqv. von nahezu 80 % erreicht werden. Durch die Nutzung von EE und Erhöhung der Anlagenauslastung kann das Treibhauspotential des Pyrolyseprozesses um mehr als 70 % reduziert werden. Das Optimierungsszenario mit dem geringsten Reduktionspotential auf das GWP stellt die Energierückführung mit nahezu 40 % dar.

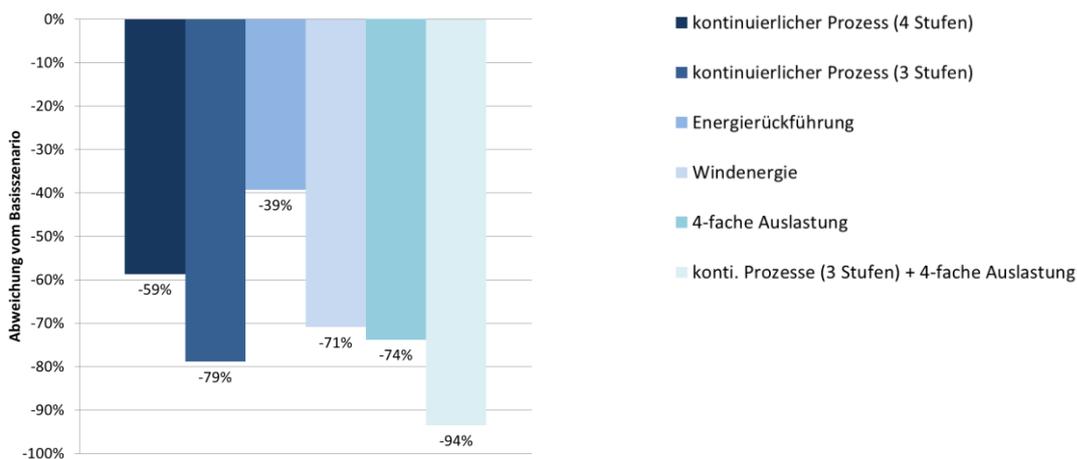


Abbildung 45: Zusammenfassung der Optimierungsmöglichkeiten am Beispiel des GWP

Durch Optimierung des Prozesses, insbesondere durch Kombination verschiedener Optimierungsszenarien, ist es somit möglich, eine signifikante Reduktion der schädlichen Umwelteinflüsse zu erzielen (94 % Reduktion des GWP bei Kombination der Szenarien dreistufiger kontinuierlicher Prozess und vierfache Auslastung).

In Abbildung 46 ist das Verhältnis der Umweltwirkungen der Recyclatfaserherstellung mit einem kontinuierlichem dreistufigen Prozess unter vierfacher Auslastung im Verhältnis zur Carbonfaserherstellung (thermisch dominierter Prozess) dargestellt.

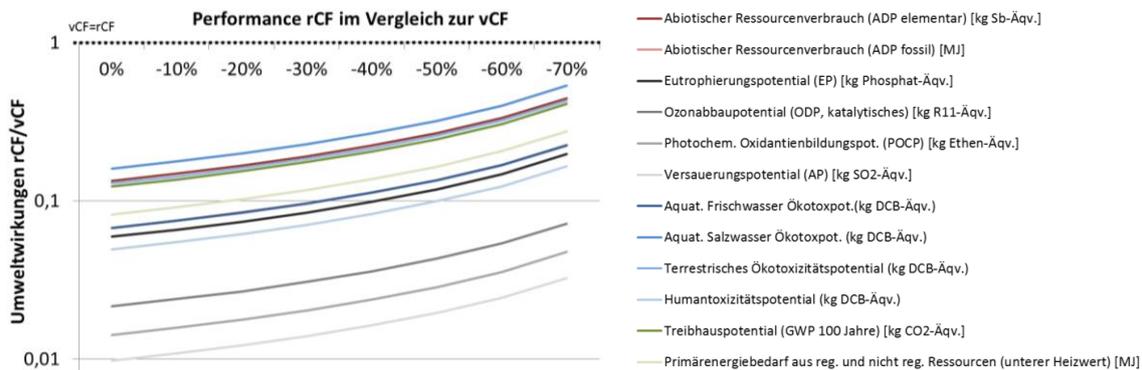


Abbildung 46: Optimierter Pyrolyseprozess im Vgl. zum therm. dom. C-Faserherstellungsprozess

Im Vergleich zum Laborprozess (Abbildung 37) ist eine signifikante Verbesserung der Umweltwirkungen zu erkennen. Die Äqv.-Werte des Pyrolyseprozesses sind über alle Performanceänderungen bei allen WK geringer als die Werte der Carbonfaserherstellung. Durch Nutzung EE und Installation einer Energierückführung ist eine weitere Reduktion der Umweltwirkungen des Recyclingprozesses möglich. Durch energetische Optimierung kann somit ein ökologisch nachhaltiger Pyrolyseprozess generiert werden.

Beim Vergleich mit der Glasfaserherstellung ist trotz Energieoptimierung eine ökologisch nachhaltige Prozessgestaltung für die meisten WK nur schwer bzw. nicht erreichbar (Anhang, Abbildung 58).

7.4 Diskussion der Emissionen

Bei den Ergebnissen aus Abbildung 39 kann ein hoher Einfluss der Emissionen auf einzelne WK (EP und GWP) festgestellt werden. Abhängig von der Datenquelle können verschiedene Emissionen mit mögl. abweichenden Umweltwirkungen in der Ökobilanz berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen zum Einfluss der Datenauswahl im Bereich der Emissionen durchgeführt. In diesem Zusammenhang ist zwischen verschiedenen Arten von Emissionen zu unterscheiden:

- Pyrolyseemissionen (Emissionen durch die thermische Zersetzung der Matrix)
- Verbrennungsemissionen (Emissionen nach der Nachverbrennung mit Propangas)
- Inertgas-Emissionen (Trärgas-N₂)
- Kühlwasserverdampfung

Je nach Art der Emissionen wurden unterschiedliche Mess- und Quantifizierungsmethoden genutzt (Tabelle 5). Die Kühlwasseremissionen konnten über Messung des Kühlwasserdurchflusses und Berechnung der Verlustmenge nach [27] ermittelt werden. Die in den Prozess durchlaufende Trärgasmenge (N₂) kann an der Anlage am Fraunhofer IGCV voreingestellt werden und wurde während der Versuche nicht variiert. Im Rahmen von ForCycle konnte lediglich eine Abschätzung der Pyrolyse- und Verbrennungsemissionen durchgeführt. Zur Ermitt-

lung der Pyrolyseemissionen wurden die entstehenden Emissionen bei der Matrixersetzung über TG-GC-MS⁷-Messungen qualitativ erfasst und durch einen Abgleich mit Literaturdaten⁸ quantifiziert.

Es ist zu berücksichtigen, dass sowohl bei den qualitativen TG-GC-MS-Messungen als auch in den verwendeten Literaturquellen keine Nachverbrennung der Emissionen berücksichtigt wurde. Um den realen Prozess mit Nachverbrennung in der Bilanzierung berücksichtigen zu können, wurden die bei der Matrixersetzung und Propangasverbrennung entstehenden Emissionen (Verbrennungsemissionen) anhand einer theoretischen Verbrennungsrechnung ermittelt.

Um den Einfluss der Datenauswahl zu den Pyrolyse- bzw. Verbrennungsemissionen auf die Ergebnisse der Bilanzierung einschätzen zu können, wurde ein Vergleich aller zur Verfügung stehender Daten durchgeführt. Bei diesem Vergleich wurden zwei Wirkungskategorien betrachtet:

- EP als WK mit dem höchsten Emissionseinfluss und kritischste WK im Vergleich zur vGF (Abbildung 39, Abbildung 38)
- Salzwasserökotoxizität als kritischste WK des Pyrolyseprozesses im Vgl. zur Carbonfaserherstellung (Abbildung 37)

Die Ergebnisse des Vergleichs der Emissionsdaten sind in Abbildung 47 für das Eutrophiepotential und für das Aquat. Salzwasser Ökotoxizitätspotential dargestellt. Im Basisszenario wurden die Ergebnisse der Verbrennungsrechnung, der über GC-MS-Messung und Literatur abgeschätzten Emissionen, berücksichtigt.

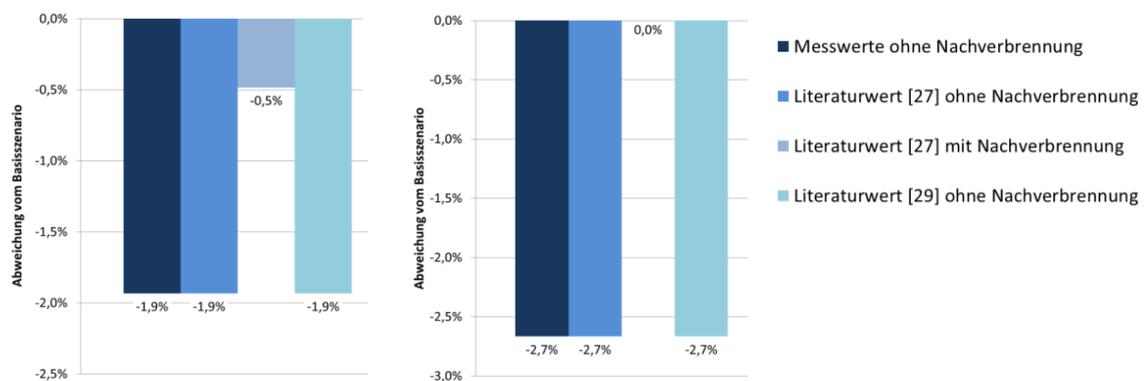


Abbildung 47: Einfluss Emissionsdaten auf EP (links), auf Aquat. Salzwasser Ökotoxpot. (rechts)

In beiden betrachteten WK ist bei allen Vergleichsszenarien eine geringfügige Abnahme der jeweiligen Äquivalente zu erkennen. Lediglich die Daten der theoretischen Verbrennungsrechnung der Emissionen aus [28] zeigen gleichbleibende Werte gegenüber dem Basisszenario

⁷ TG: Thermogravimetrie, GC: Gaschromatographie; MS: Massenspektrometrie

⁸ Es konnten zwei Literaturquellen ermittelt werden, welche über eine quantitative Bestimmung von Pyrolyseemissionen berichten. [28] schreibt über einen katalytischen Pyrolyseprozess von CFK mit Epoxidharzmatrix. In [30] werden Untersuchungen zur thermischen Zersetzung der Matrixkomponenten (u.a. Epoxidharz) bei 350 °C - 800 °C beschrieben.

beim Salzwasser Ökotoxizitätspotential. Auch bei Betrachtung des EP ist bei diesen Vergleichsdaten die geringste Abweichung vom Basisszenario zu erkennen.

Weiterhin ist in Abbildung 47 zu erkennen, dass durch eine Nachverbrennung die Umweltwirkungen des Pyrolyseprozesses negativ beeinflusst werden können. Ein Grund dafür ist u.a., dass bei der Nachverbrennung umweltrelevante Gase wie (CO_2 und N_2) entstehen. Außerdem wird bei Betrachtung der Emissionen vor der Nachverbrennung, im Gegensatz zu den Emissionen nach der Nachverbrennung, kein Propangas verbraucht. Hier müssen also die Umweltwirkungen der Propangasherstellung und Verbrennung nicht berücksichtigt werden.

Die Nachverbrennung wird vorrangig aus Arbeitssicherheitsgründen eingesetzt. Bei der Matrixzersetzung können toxische, organische Substanzen entstehen. Diese sollen bei der Nachverbrennung zu anorganischen Substanzen umgesetzt werden, um die schädlichen Auswirkungen auf den menschlichen Organismus zu reduzieren. In Abbildung 48 ist der Einfluss der Nachverbrennung auf das Humantoxizitätspotential dargestellt. Dabei wurden sowohl die Messwerte als auch die Werte aus [28] gegenübergestellt.

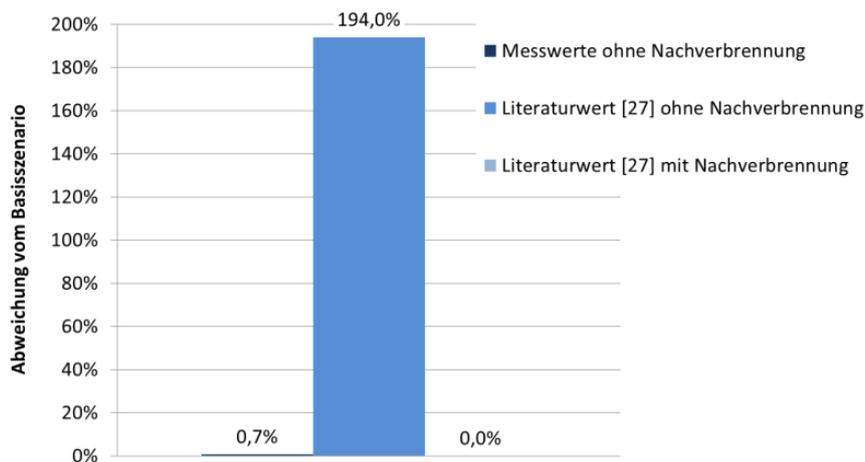


Abbildung 48: Einfluss Emissionsdaten auf das Humantoxizitätspotential

Aufgrund unterschiedlicher Versuchsbedingungen (z.B. Pyrolysetemperatur) und Unterscheidungen in der elementaren Zusammensetzung des Epoxidharzes stimmen die Ergebnisse aus den Literaturquellen und der Emissionsmessung anhand TG-GC-MS nicht immer vollständig überein. Beispielsweise werden in [28] toxische Substanzen wie Butadien oder Cyanide berichtet, welche bei den TG-GC-MS-Messungen nicht festgestellt werden konnten. In Abbildung 48 ist aus diesem Grund das Humantoxizitätspotential der Emissionen aus [28] deutlich höher als bei den Messwerten. Durch Nachverbrennung wird bei den Messwerten die Humantoxizität geringfügig verbessert. Bei Betrachtung der Daten aus [28] kann eine deutliche Verbesserung der Werte durch eine Nachverbrennung der Emissionen erreicht werden.

7.5 Ergebnisse der Optimierung und Datenauswahl

Alle in Kap. 7.3 und Kap. 7.4 untersuchten Szenarien wurden in den Bereichsdiagrammen (Abbildung 49 - Abbildung 53 & Anhang, Abbildung 59 - Abbildung 64) zusammengefasst. Dabei wurde der Pyrolyseprozess unter Berücksichtigung der Kombination aller Datenauswahl- und Optimierungsmöglichkeiten über die Performanceänderung der rCF aufgetragen (grau markierte Fläche). Es ist außerdem der Bereich der Umweltwirkungen der beiden Carbonfaserherstellungsprozesse (Kap. 7.1.1) als schwarz markierte Fläche dargestellt.

In den meisten WK sind die Szenarien mit hohem Energieverbrauch (z.B. Laborprozess), geringer Anlagenauslastung und Nutzung des länderspezifischen Strommixes die Szenarien mit dem höchsten Umweltwirkungspotential. In den Bereichsdiagrammen sind diese i.d.R. in den oberen Bereich der grau markierten Flächen einzuordnen. Als besonders ökologisch nachhaltig sind im Gegensatz dazu meist Szenarien mit geringem Verbrauch an el. Energie (z.B. kontinuierlicher Pyrolyseprozess), hoher Auslastung, Energierückführung sowie Szenarien mit Nutzung von EE (entsprechend Abbildung 45) zu bewerten. Diese Szenarien bilden in der Regel den unteren Bereich der grau markierten Flächen in den Bereichsdiagrammen.

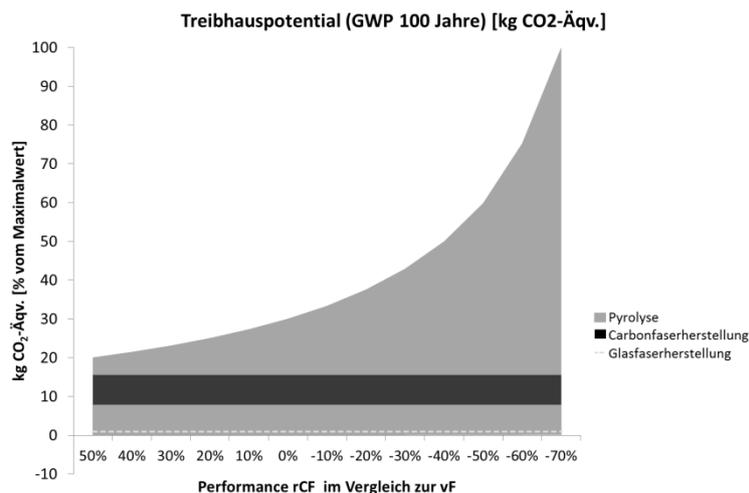


Abbildung 49 zeigt das Bereichsdiagramm des Pyrolyseprozesses im Hinblick auf das GWP. Die WK ADP fossil, Aquat. Frischwasser und Salzwasser Ökotoxpot., Terrestrisches Ökotoxpot., Humantoxpot. und PE (Anhang, Abbildung 59 - Abbildung 64) verhalten sich ähnlich wie das GWP. Durch Prozessoptimierung erreichen die rCF geringere Umweltwirkung als die vCF. Bei hohem Energieverbrauch und geringer Anlagenauslastung mit relativ hohem Ausstoß an umweltwirksamen Emissionen weist der Pyrolyseprozess, insbesondere bei großen Performanceverlusten der rCF, höhere Äquivalenzwerte auf als der Carbonfaserherstellungsprozess. Durch den Pyrolyseprozess geringere umweltrelevante Äqv. zu erzeugen als bei der GF-Herstellung ist bei diesen Wirkungskategorien nur sehr schwer bzw. nicht zu realisieren.

Das ADP elementar (Abbildung 50) stellt die einzige WK dar, in welcher bei der Glasfaserherstellung über alle Szenarien, bis zu großen Performanceverlusten, mehr umweltrelevanten Äquivalente entstehen als bei der Pyrolyse und dem CF-Herstellungsprozess.

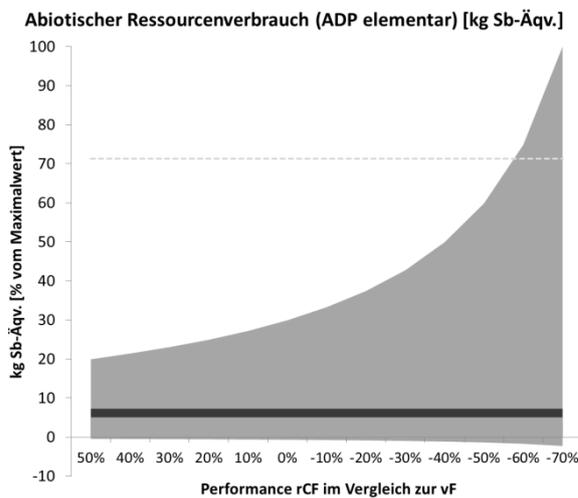


Abbildung 50: Zusammenfassung der Ergebnisse ADP elementar

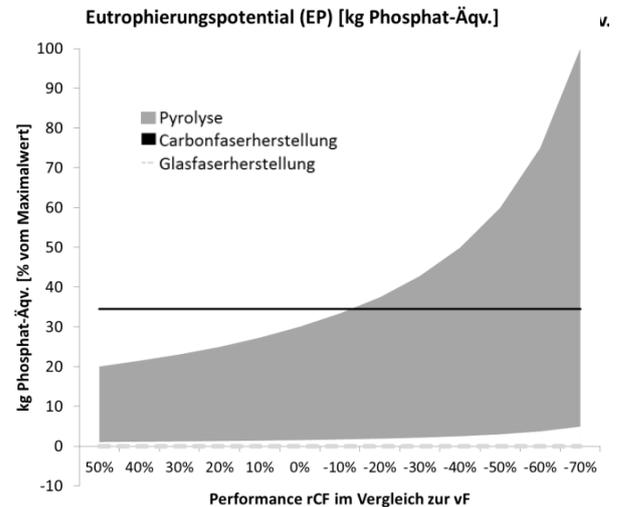


Abbildung 51: Zusammenfassung der Ergebnisse EP

Es ist ein ähnliches Verhalten der Vergleichsprozesse (Herstellung von vCF, vGF und Pyrolyse) in den WK EP (Abbildung 51) und POCP (Anhang, Abbildung 65) zu erkennen. Bei geringen Performanceverlusten sind die schädlichen Umwelteinflüsse des Pyrolyseprozesses für alle Szenarien geringer als die der Carbonfaserherstellung. Im Gegensatz zum POCP kann durch Prozessoptimierung keine Verbesserung der Umweltauswirkungen durch Nutzung von rCF als Ersatz von vGF in der WK EP erreicht werden.

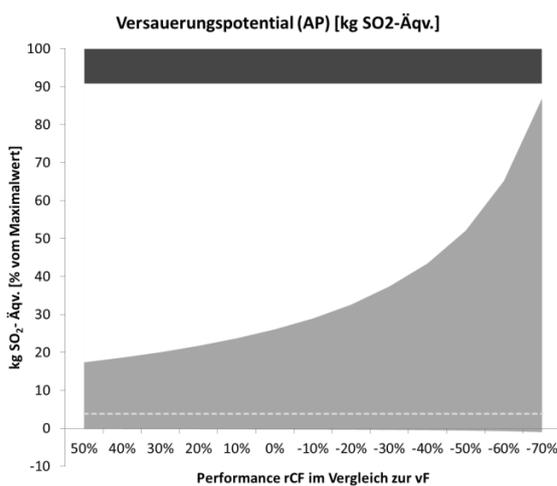


Abbildung 52: Zusammenfassung der Ergebnisse AP

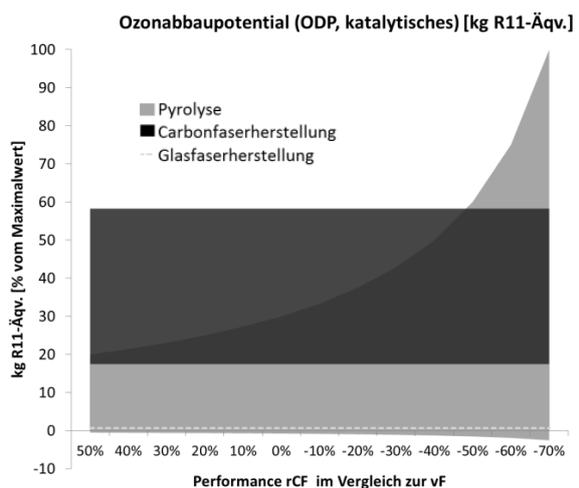


Abbildung 53: Zusammenfassung der Ergebnisse ODP

Im Vgl. zur Carbonfaserherstellung stellt das AP (Abbildung 52) die ökologisch nachhaltigste WK des Pyrolyseprozesses dar. Hier sind die Umweltwirkungen der vCF über alle Performanceänderung höher als die der rCF. Die SO₂-Äqv. der Glasfaserherstellung können abhängig vom Pyrolyseszenario sowohl höher als auch geringer sein als die des Pyrolyseprozesses.

Beim ODP (Abbildung 53) ist die hohe Differenz der beiden Carbonfaserherstellungsprozesse auffällig. Eine Aussage zur ökologischen Nachhaltigkeit ist in diesem Zusammenhang neben dem Pyrolyseszenario und der Performanceänderung auch stark von der Auswahl des Vergleichsszenarien (therm. dom bzw. elektr. dom. C-Faser Herstellungsprozess) abhängig. In manchen WK sind Umweltauswirkungen mit negativen Äquivalenzwerten zu finden. Dies ist i.d.R. auf einen starken Einfluss der Energierückführung zurückzuführen (Kap. 7.3.2). In Szenarien mit geringem Energieverbrauch kann die Energierückführung aufgrund der Annahme von hohen Wirkungsgraden (Kap. 7.3.2) einen höheren Einfluss auf die jeweilige WK haben als der Energieverbrauch beim Pyrolyseprozess.

7.6 Vergleich von Induktion und Pyrolyse

Neben der Pyrolyse wurde auch die Induktion als mögliches CFK-Recyclingverfahren im Rahmen des Projektes ForCycle betrachtet. Die Daten zur ökologischen Charakterisierung wurden an der Induktionsanlage der Universität Augsburg ermittelt. Dabei konnten keine quantitativen Emissionsdaten des Induktionsprozesses gemessen oder abgeschätzt werden. Aus diesem Grund war keine ganzheitliche Bilanzierung des Prozesses möglich. Es konnte lediglich ein Vergleich von Stoffströmen, welche den beiden Recyclingverfahren zugeführt werden durchgeführt werden. Dabei wurden vier verschiedene Pyrolyseszenarien berücksichtigt:

- Pyrolyse-Laborprozess am Fraunhofer IGCV (Basisszenario Kap.7.1.3.3)
- Kontinuierlicher vierstufiger Pyrolyseprozess (Kap.7.3.1.2)
- Kontinuierlicher dreistufiger Pyrolyseprozess (Kap.7.3.1.2)
- Kontinuierlicher dreistufiger Pyrolyseprozess mit erhöhter Auslastung (Kap.7.3.4)

Die Induktion bietet den Vorteil, dass keine langen Aufheiz- und Abkühlzeiten zur Matrixzersetzung notwendig sind und dadurch verhältnismäßig kurze Prozesszeiten erreicht werden können. Bei der Zyklusführung wurden an der Universität Augsburg zwei unterschiedliche Szenarien betrachtet:

- Prozesstemperatur 320 °C mit einem Harzverlust von 60 %
- Prozesstemperatur 240 °C mit einem Harzverlust von 30 %

Abbildung 54 bis Abbildung 56 zeigt den Vergleich der Inputgrößen Energie, Stickstoff und Kühlwasser der beiden Recyclingprozesse. Es ist darauf hinzuweisen, dass bei dieser Gegenüberstellung Einflussfaktoren wie beispielsweise die Performance der rCF bei veränderten Prozessparametern sowie Auslastungsgrad der Induktionsanlage nicht berücksichtigt wurden. Eine Aussage zu den tatsächlichen Umwelteinflüssen der Prozesse kann anhand dieses Vergleichs somit nicht getroffen werden.

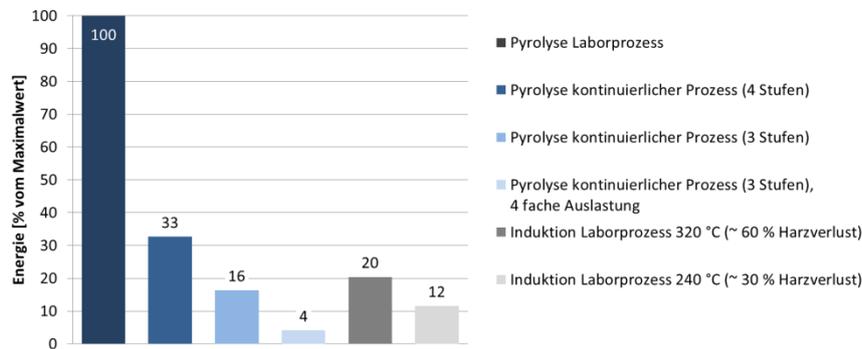


Abbildung 54: Vergleich Energieverbrauch Pyrolyseszenarien/Induktionsszenarien

Wie der Abbildung 54 zu entnehmen ist, sind die Werte des Pyrolyse-Laborprozesses deutlich höher als die Werte aller anderen Szenarien. Durch eine kontinuierliche Prozessgestaltung und Erhöhung der Anlagenauslastung kann eine Reduktion von bis zu 96 % erreicht werden. Der Induktionsprozess bei 320 °C benötigt 20 % der beim Pyrolyse-Laborprozess verbrauchten elektrischen Energie. Bei einer Reduzierung der Prozesstemperatur kann dieser Verbrauch um weitere 8 % verringert werden.

In Abbildung 55 ist eine Gegenüberstellung der Stickstoffverbräuche der Recyclingprozesse dargestellt. Als Maximalwert ist erneut das Basisszenario des Pyrolyseprozesses am Fraunhofer IGCV zu erkennen. Durch eine Optimierung der Pyrolyse durch einen dreistufigen Prozess und zusätzlicher Erhöhung der Anlagenauslastung kann eine Reduktion des Stickstoffverbrauchs um 95 % im Vergleich zum Basisszenario erreicht werden. Der Stickstoffverbrauch des Induktionsprozesses beträgt 69 % des Verbrauchs beim Pyrolyse-Laborprozess.

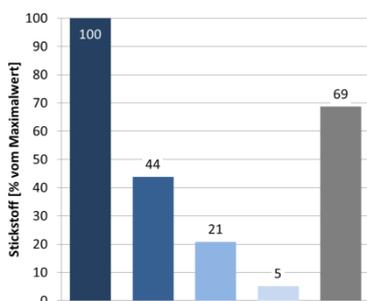


Abbildung 55: Vergleich Stickstoffverbrauch Pyrolyseszenarien/Induktion

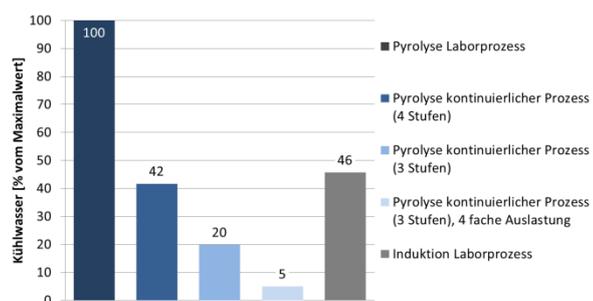


Abbildung 56: Vergleich Kühlwasserverbrauch Pyrolyseszenarien/Induktion

Abbildung 56 zeigt den Kühlwasserverbrauch der Recycling-Prozesse. Ähnlich wie in Abbildung 55 ist ein deutlich höherer Verbrauch des Pyrolyse-Laborprozesses im Vgl. zu den optimierten Pyrolyseprozessen erkennbar. Bei der Induktion ist ein Kühlwasserverbrauch von 46 % gegenüber dem Pyrolyse-Referenzprozess festzustellen.

8 Zusammenfassung

Die Untersuchung der induktiven Faser-Matrix-Separation hat gezeigt, dass der konzipierte und aufgebaute Versuchsaufbau die Separation einer CFK-Platte in die 12 Gewebelagen ermöglicht. Die Gewebestruktur kann hierbei erhalten werden. Die selektive Erwärmung der Carbonfasern durch die Induktion ermöglicht die Erwärmung der direkten Faser-Matrix-Grenzfläche, wodurch die Separation der einzelnen Gewebelagen ermöglicht wird. Es konnten passende Prozessparameter entwickelt werden, welche zur Realisierung eines geschlossenen Stoffkreislaufes der Carbonfaser beitragen können. Der Erhalt der Faserarchitektur in Form der Gewebelagen generiert rCF-Strukturen, welche bessere mechanische Eigenschaften aufweisen als Kurzfaserprodukte aus anderen Prozessen. Zusätzlich verspricht die vergleichsweise sehr kurze und selektive Erwärmung der Carbonfasern Energieeinsparungen gegenüber etablierten Recyclingprozessen. Die innerhalb des Projektes durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die induktive Faser-Matrix-Separation das Potential hat zu einem ökonomischen und qualitativ hochwertigen Recyclingprozess beizutragen.

Die Faser-Matrix-Separation mittels superkritischer Fluide ermöglicht es rezyklierte Carbonfasern mit nahezu matrixfreien Oberflächen und ohne signifikante Oberflächendegradation zu generieren. Vielmehr verspricht die chemische Elementzusammensetzung mit einem vergleichsweise hohen Stickstoffanteil auf den rezyklierten Carbonfaseroberflächen, dass eine weitere Oberflächenreinigung und -aktivierung nicht zwingend erforderlich ist. Dies kann, neben dem Einsatz von Wasser als kostengünstiges und ungefährliches Lösemittel, als ökonomischer und ökologischer Vorteil dieses Prozesses betrachtet werden. Zudem können die mechanischen Eigenschaften sowie die textile Struktur während des Prozesses erhalten bleiben. Dies bildet die Basis für einen effektiveren Einsatz der rCF in CFK-Strukturen mit guten mechanischen Eigenschaften der zweiten Generation.

Die beiden in diesem Projekt entwickelten Separationsverfahren für Carbonfasern aus dem Matrixmaterial zeigen anhand der Untersuchungen der rezyklierten Carbonfasern und deren Eigenschaften, dass sie das Potential haben, einen wichtigen Beitrag zur Schließung des Stoffkreislaufes der Carbonfaser zu leisten. Zudem können mittels beider Verfahren die textilen Strukturen erhalten werden, welche eine an die Separation anschließende textile Weiterverarbeitung erleichtern können.

Die Ergebnisse der ökologischen Charakterisierung der Recyclingverfahren zeigen, dass eine Aussage zur ökologischen Nachhaltigkeit nur in Abhängigkeit der betrachtenden Wirkungskategorien und Prozessparameter möglich ist. Als durchschnittlich größter Einflussfaktor bewirkt die elektrische Energie beim Pyrolyseprozess am Fraunhofer IGCV relative hohe Umweltwirkungen. Bei einem Vergleich sind dabei in vielen Wirkungskategorien höhere Umwelteinflüsse als bei der Carbonfaserherstellung festzustellen. In nahezu alle WK kann der Laborprozess im Rahmen einer Prozessoptimierung und in Abhängigkeit der Performanceänderung der rCF geringe Umweltwirkungen aufweisen als der Carbonfaserherstellungsprozess. Das Erreichen von

geringeren Umwelteinflüssen des Pyrolyseprozesses im Vgl. zur Glasfaserherstellung ist für die meisten WK nur schwer bzw. nicht realisierbar. Somit kann aus ökologischer Sicht, bei energieoptimierter Prozessführung, der Ersatz von vCF durch rCF als nachhaltig betrachtet werden. Eine ökologische Nachhaltigkeit durch Ersatz von vGF durch rCF ist für die meisten WK kaum zu erreichen.

Neben einer ökologischen Charakterisierung wurde ein Vergleich von Inputgrößen der Recyclingprozesse Induktion und Pyrolyse durchgeführt. Bei allen betrachteten Verbrauchsgrößen (Energie, Stickstoff und Kühlwasser) stellt der Pyrolyse-Laborprozess den Maximalverbraucher dar. Durch Optimierung des Pyrolyseprozesses können die Verbräuche signifikant reduziert werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass alleine anhand dieser Vergleichsergebnisse keine Abschätzung der Umwelteinflüsse der Recyclingverfahren gemacht werden kann. Um eine Aussage zur ökologischen Nachhaltigkeit des Induktionsprozesses treffen zu können, müssen weitere Daten generiert und ökobilanziell erfasst werden.

9 Ausblick

Für eine Nachhaltigkeitsbewertung unterschiedlicher Recyclingstrategien ist es sinnvoll, eine quantitative Emissionsmessung von entsprechend akkreditierten Unternehmen durchführen zu lassen. Anhand solcher Daten kann eine exaktere Ökobilanzstudie des Pyrolyseprozesses sowie eine Ökobilanzierung des Induktionsprozesses, unter Betrachtung möglicher Optimierungsmöglichkeiten, durchgeführt werden.

In den bisherigen Untersuchungen zum Pyrolyseprozess wurde vorrangig eine Reduktion der Umweltwirkungen durch energetische Prozessoptimierung angestrebt. Durch eine Optimierung weiterer relevanter Verbraucher (z.B. Verbrennungsgas) kann möglicherweise eine höhere Reduktion der Umweltwirkungen der rCF erreicht werden. Aus diesem Grund sind weitere Untersuchungen im Bereich der Prozessoptimierung des Pyrolyseverfahrens notwendig. Weiterhin ist festzuhalten, dass die bisherigen Untersuchungen nur mit einer Materialkomponente durchgeführt wurden. Um ein breiteres Spektrum der Pyrolyse durch die Ökobilanz abzudecken, muss, insbesondere bei der Emissionsbetrachtung, eine Vermessung der Anlage unter Verwendung verschiedener Materialien (z.B. unterschiedlicher Epoxidharze oder thermoplastische Matrixsysteme bzw. unterschiedliche FVG) vorgenommen werden. In diesem Zusammenhang ist auch der Einfluss einer Variation des Trägergases sinnvoll, da z.B. durch Zugabe von Sauerstoff in den Pyrolyseprozess oder Verwendung von Argon als Ersatz von Stickstoff, variierende Emissions- und Performancewerte zu erwarten sind.

Um möglichst geringe Umweltwirkungen der Recyclatfasern zu erreichen ist ein Vergleich verschiedener Recyclingverfahren notwendig. Zu diesem Zweck sind fortführende Untersuchungen von weiteren Prozessen zur Faser-Matrix-Separation (z.B. Solvolyse) im Anschluss an das Projekt ForCycle notwendig. Aufgrund des hohen Einflusses der Performance auf die Umweltwirkungen der rCF ist eine LCA-Studie zu Techniken der Performanceverbesserung (beispielsweise Plasmabehandlung) von Recyclatfasern sinnvoll.

Im aktuellen Projekt konnten Recycling-Laboranlagen vermessen und mögliche kontinuierliche Szenarien generiert werden. Durch Kontakt zu industriellen Anlagenbetreibern (z.B. ELG Carbon Fibre Ltd.) wäre eine Vermessung von Industrieanlagen (evtl. reale kontinuierliche Prozesse) denkbar.

In der aktuellen Studie wurden Prozesse zur Faser-Matrix-Separation im Rahmen des CFK-Recyclings betrachtet. Um das Recycling von CFK-Abfällen in einer vollständigen Lebenszyklusanalyse bewerten zu können sind fortführend LCA-Studien weiterer Prozesse, wie bspw. textile Verarbeitung der rCF, notwendig.

Anhang

A 1. Daten der Bilanzierung

Tabelle 5: Prozesse bzw. Flüsse des Pyrolysemodells

Prozess	Input/ Output	Verwendeter Datensatz	Gültigkeit (Jahr)	Quantifizierung
<i>Energie</i>				
Deutscher Strommix	Input	Thinkstep	2018	Messung
	Output	Thinkstep	2018	Berechnung
Windkraft	Input	Thinkstep	2018	Messung
	Output	Thinkstep	2018	Berechnung
Thermische Energie aus Erdgas	Output	Thinkstep	2018	Berechnung
<i>Kühlwasser</i>				
Wasser (entionisiert)	Input	Thinkstep	2018	Messung und Berechnung nach [27]
<i>Verbrennungsgas</i>				
Propan	Input	Thinkstep	2018	Messung
Propen	Input	Thinkstep	2018	
<i>CFK-Abfall</i>				
CFK-Abfall	Input	Fraunhofer IGCV	-	Berechnung
<i>rCF</i>				
Recyclatfaser	Output	Fraunhofer IGCV	-	Funktionelle Einheit ⁹ (1 kg rCF)
<i>Emissionen</i>				
Diverse Emissionen aus - thermischer Zersetzung der Matrix - Verbrennung Propan/Propen - Austritt des Trägergases (Stickstoff) - Verdampfung Kühlwasser	Output	Thinkstep	2018	Messungen, Literaturwerte und Berechnungen

⁹ Bezugsgröße des Modells

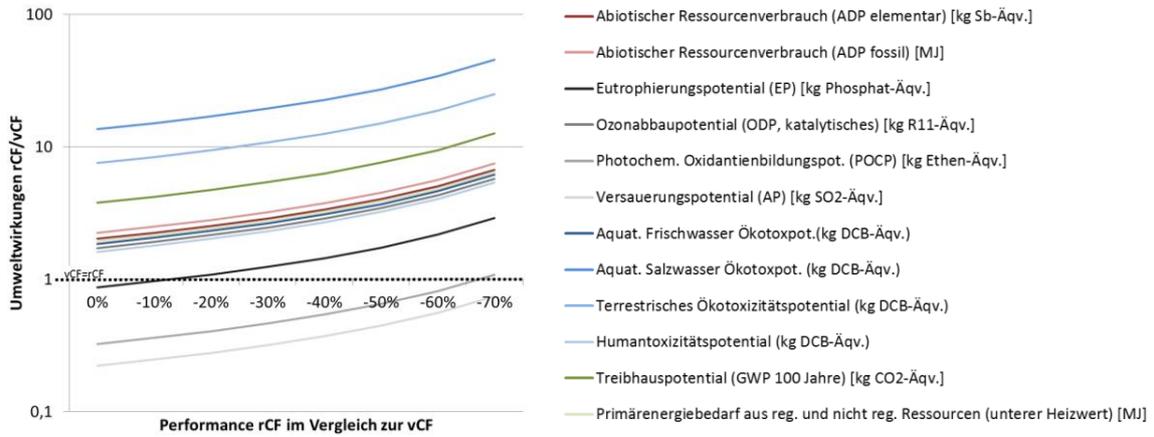


Abbildung 57: Laborprozess im vgl. zum el. dom. Carbonfaserherstellungsprozess

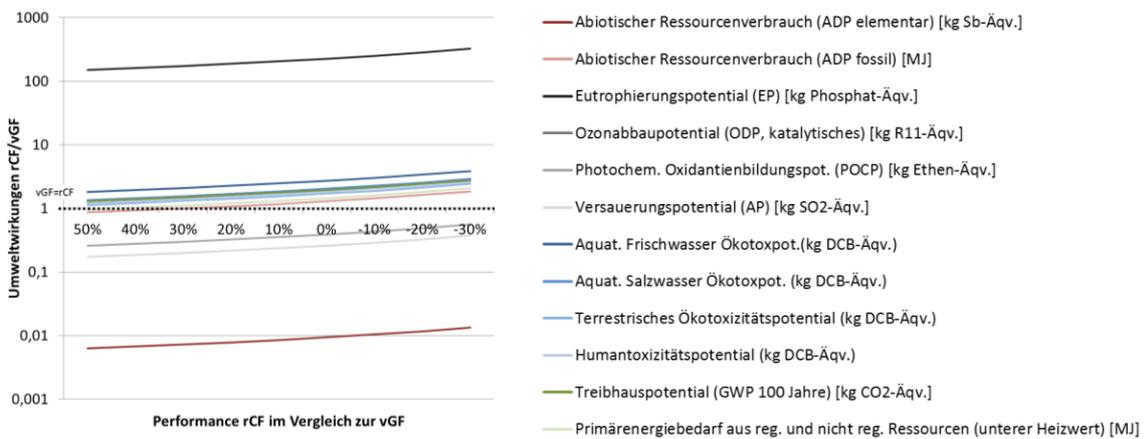


Abbildung 58: Energieoptimierter Prozess (3-stufiger kontinuierlicher Pyrolyseprozess mit 4-facher Auslastung) im Vgl. zum Glasfaserherstellungsprozess

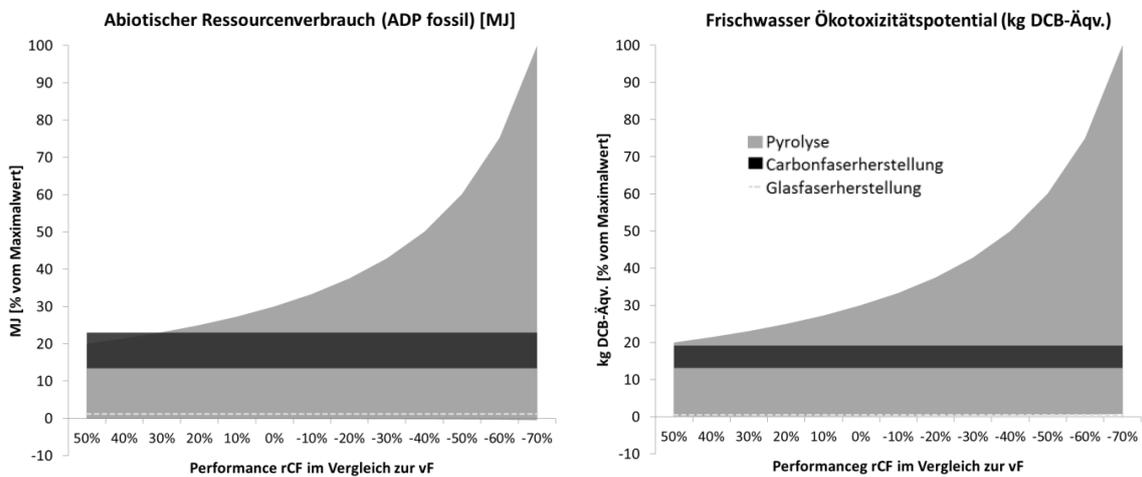


Abbildung 59: Zusammenfassung der Ergebnisse ADP fossil

Abbildung 60: Zusammenfassung der Ergebnisse Aquat. Frischwasser Ökotoxpot.

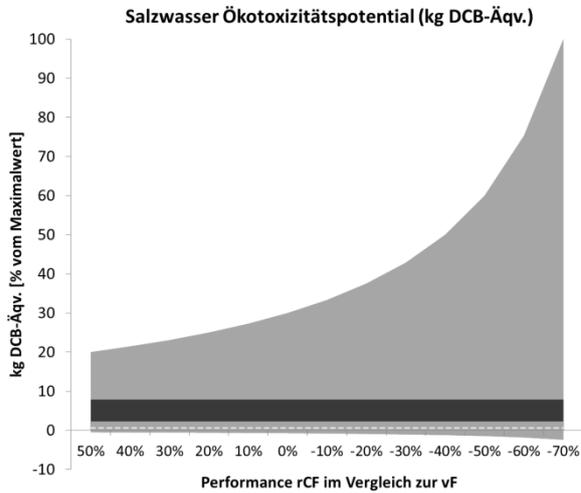


Abbildung 61: Zusammenfassung der Ergebnisse Aquat. Salzwasser Ökotoxpot.

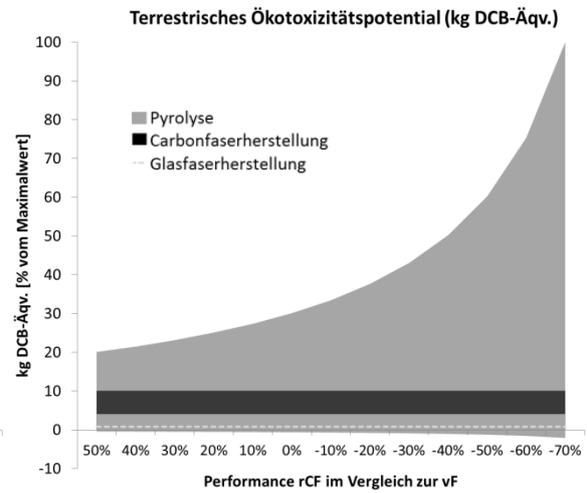


Abbildung 62: Zusammenfassung der Ergebnisse Terrestrisches Ökotoxpot.

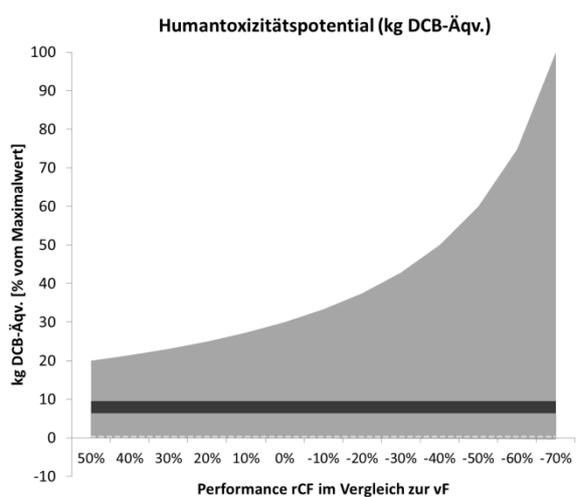


Abbildung 63: Zusammenfassung der Ergebnisse Humantoxpot.

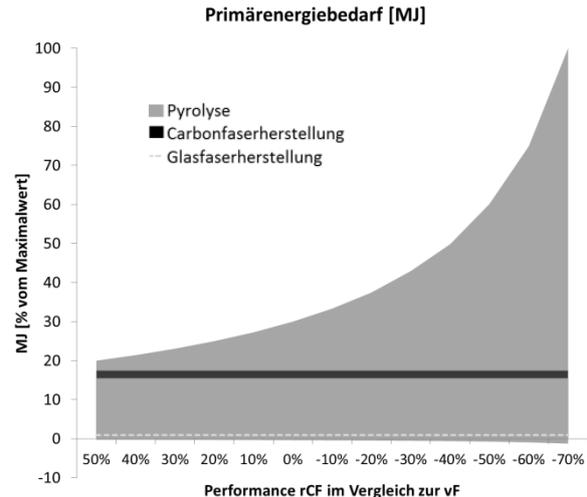


Abbildung 64: Zusammenfassung der Ergebnisse PE

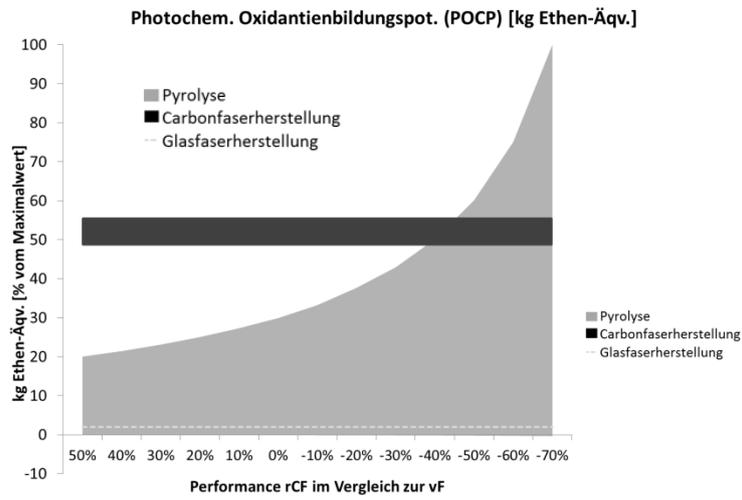


Abbildung 65: Zusammenfassung der Ergebnisse POCP

A 2. Literaturverzeichnis

- [1] **Yang Y. et al.:** Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2012, 51, S. 53-68.
- [2] **Pimenta S., Pinho S.T.:** Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management*. 2011, 31, S. 378-392.
- [3] **KIT:** Fragmentierung und Auftrennung von Verbundwerkstoffen und Mineralien mittels gepulster elektrischer Entladungen. <http://www.ihm.kit.edu/141.php> : s.n.
- [4] **Pickering S.J.:** Alignment of Recycled Carbon Fibre for High Volume Fraction Composites. *Global Outlook for Carbon Fibre*. 29.-30. 9 2010.
- [5] **Palmer J. et al.:** Successful closed-loop recycling of thermoset composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. April 2009, Bd. 4, 40, S. 490-498.
- [6] **Palmer J. et al.:** Sheet moulding compound (SMC) from carbon fibre recycle. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010, Bd. 9, 41, S. 1232-1237.
- [7] **Manis F., Betz T., Wölling J., Drechsler K.:** Bewertung der mechanischen und ökologischen Aspekte des thermischen Recyclings. 4. Symposium Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen, Tutzingen 2016.
- [8] **Manis F., Wölling J.:** Damage behaviour of fibre reinforced materials induced by high temperature oxidation for optimisation of thermal recycling routes. 20. DGM-Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Wien, 01.-03.07.2015.
- [9] **Betz T.:** Systematische Untersuchung von Kohlenstofffasern bei thermischen Pyrolyse- und Oxidationsprozessen hinsichtlich des Recyclings von CFK-Strukturen, Masterarbeit KIT, 2016.
- [10] **Schneller A. et al.:** Recycling of woven carbon fiber patches from laminated CFRP by means of induction heating. *ICCM20 - 20th International Conference On Composite Materials*. 2015.
- [11] **Schneller A. et al.:** Recycling of carbon fibers from carbon fiber reinforced thermoset polymers by use of sub- and supercritical fluids. *ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials*, Munich. 2016.
- [12] **Henry L. et al.:** Semi-continuous flow recycling method for carbon fibre reinforced thermoset polymers by near-and supercritical solvolysis. *Polymer Degradation and Stability*. 2016, 133, S. 264-274.
- [13] **Fraunhofer IGCV:** Internetauftritt Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV. Online im Internet: <https://www.igcv.fraunhofer.de/>.
- [14] **Cherif Ch.:** *Textile Werkstoffe für den Leichtbau - Techniken, Verfahren, Materialien, Eigenschaften*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2011.
- [15] **Autefa Solutions GmbH:** Internetauftritt. Online im Internet: <http://www.autefa.com>.
- [16] **Fuchs H., Albrecht W.:** *Vliesstoffe - Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2012.
- [17] **PILL Nassvliestechnik GmbH.** Internetauftritt. Online im Internet: <http://www.pill-nvt.de>.
- [18] **Jehle V.:** *Vliesstoffe Grundlagen*. HS Reutlingen : s.n., WS 2014.
- [19] **Schmieg M.:** Systematische Untersuchung der Recyclingparameter auf die Herstellung von Nassvliesen, Forschungsarbeit Hochschule Reutlingen, 2016.
- [20] **Schmieg M.:** Vergleich von Trocken- und Nassvlieslegeverfahren vor dem Hintergrund des Recycling von Kohlenstofffasern, Masterarbeit Hochschule Reutlingen, Work in Progress, 2017.
- [21] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). 24.02.2012.

-
- [22] **Herrmann A., Witte T.:** Entwicklung von CFK-Recyclinghalbzeugen. Lightweight Design. 5/2014.
- [23] **Universtiät Leiden:** Institut of Environmental Sciences (CML). Online im Internet: <http://cml.leiden.edu/research/industrialecology/researchprojects/finished/new-dutch-lca-guide.html>.
- [24] **Thinkstep:** GaBi databases. Prozess DE: Glasfaser. 28.11.2016.
- [25] **Witik R.A. et al.:** Carbon fibre reinforced composite waste - An environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2013.
- [26] **Deutsche Rohstoffagentur (DERA)** in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Commodity Top News 50 (2016): Mineralische Rohstoffe für die Energiewende. Online im Internet: http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/50_rohstoffe-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- [27] **Baitz M., Makishi C., Kupfer T.:** GaBi Database & Modelling Principles 2014. 2014.
- [28] **Pickering S.J.:** Recycling technologies for thermoset composite materials-current status. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2006.
- [29] **Wilson Ch.S.:** E-Mail-Anfrage zu GuD-BVT. 18.07.2016.
- [30] **Cunliffe A.M., Jones N., Williams P.T.:** Recycling of fibre-reinforced polymeric waste by pyrolysis - Thermo-gravimetric and bench-scale investigations. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2003.
- [31] **Siemens:** Siemens erreicht Weltrekorde in Düsseldorfer Kraftwerk "Fortuna". Online im Internet: <http://www.siemens.com/press/de/feature/2014/corporate/2014-02-lausward.php> (28.01.2016).
- [32] **Umweltbundesamt:** Merkblatt über beste verfügbare Techniken für Großfeuerungsanlagen. Online im Internet: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/bvt_grossfeuerungsanlagen_vv.pdf.

A 3. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Carbonfaser-Recyclingprozesskette im Rahmen des ForCycle-Teilprojektes	4
Abbildung 2: Zunehmende Porosität der Faseroberfläche mit steigendem Sauerstoffgehalt: REM-Bilder (links), BET-Messung (rechts) [9]	5
Abbildung 3: Einfluss des Separationsprozesses auf Pyrolysekoks-Rückstände: pyrolysiert (links), oxidiert (rechts).	5
Abbildung 4: Einfluss von Sauerstoffgehalt auf den Faserdurchmesser nach der Pyrolyse	6
Abbildung 5: Skizze zum Versuchsaufbau zur Faser-Matrix-Separation mittels Induktion	7
Abbildung 6: Untersuchung des Matrixverlustes während der induktiven Behandlung (a) Variation der Soll-Temperatur (b) Variation des Koppelabstandes bei den Soll-Temperaturen 240°C und 280°C.	8
Abbildung 7: REM-Aufnahmen der rCF nach der induktiven Separation. Soll-Temperatur: (a) 240°C (b) 320°C	8
Abbildung 8: XPS-Analyse der Elementzusammensetzung der rCF-Oberflächen im Vergleich zu einer thermisch entschlichteten Neufaser.	9
Abbildung 9: Ergebnisse des Einzelfaserzugversuches (a) Elastizitätsmodul (b) Zugfestigkeit.	10
Abbildung 10: Skizze zum Funktionsprinzip des Recyclings von Carbonfasern mittels superkrit. Fluide	11
Abbildung 11: Separierte Carbonfasern nach dem Recycling mittels superkritischer Fluide.	11
Abbildung 12: REM-Aufnahmen der rCF beim Einsatz von Wasser (a - c) und dem Wasser/Ethanol Gemisch (d - f) als Lösemittel bei unterschiedl. Temperaturen, Behandlungszeit 120 min.	12
Abbildung 13: Topographie der entschlichteten Neufaser im Vergleich zu rCF (375°C, 120 min).	12
Abbildung 14: Oberflächenrauheit der rCF im Vergleich zur thermisch entschlichteten Neufaser.	13
Abbildung 15: Elementzusammensetzung der rCF-Oberflächen i.V. zur entschlichteten Neufaser.	13
Abbildung 16: Wiedereinsatz der recycelten Kohlenstofffasern bezogen auf die Faserlänge [13].	15
Abbildung 17: Schematische Darstellung des Krempelvliesprozesses der Autefa Solutions GmbH [15]	16
Abbildung 18: Schematische Darstellung des Nassvliesprozesses bei PILL NVT GmbH [16].	16
Abbildung 19: Aufschlaggerät (links), Detail: Propeller mit abgerundeten Kanten (rechts).	17
Abbildung 20: Laborbütte (links), Detail: Skala für Füllstand und Propeller (rechts).	17
Abbildung 21: Blattbildner (links), Detail: Sieb auf dem Blattbildner (rechts).	17
Abbildung 22: Phototrockner	18
Abbildung 23: Rotor mit Faserumschlingungen	19
Abbildung 24: Nassvliese aus CF mit 12 mm (links), 18 mm (mittig) und 36 mm (rechts) Faserlänge [19]	20
Abbildung 25: Trockenvlies - Kreuzlegung (links) mit anschließender Vernadelung (rechts) [20]	20
Abbildung 26: Weiterverarbeitung CF-Vliese zu CFK – VARI-Prozess mit Epoxidmatrix (links), RTM-Prozess mit Epoxidmatrix (mittig), Heizpressverfahren mit Polypropylenmatrix (rechts) [19], [20]	21
Abbildung 27: mechanische Eigenschaften der Nass- und Trockenvliese aus verschiedenen CFK Herstellungsprozessen (II = Faserrichtung MD; \perp = Querrichtung CD). [19], [20]	22
Abbildung 28: Zugfestigkeit und E-Modul der vCF und rCF mit Betrachtung der unterschiedlichen Faserlängen (II = Faserrichtung MD; \perp = Querrichtung CD). - Pill Nassvliese im VARI-Prozess (EP-Matrix) [19]	23
Abbildung 29: Biegefestigkeit und Biegemodul (links) und Charpy Schlagzähigkeit (rechts) der vCF und rCF mit Betrachtung der unterschiedlichen Faserlängen (II = Faserrichtung MD; \perp = Querrichtung CD). - Pill Nassvliese im VARI-Prozess (EP-Matrix) [19]	23
Abbildung 30: Zugfestigkeit und E-Modul vCF, rCF und industrielle rCF (II = Faserrichtung MD; \perp = Querrichtung CD). - Pill Nassvliese im VARI-Prozess (EP-Matrix). [19]	24
Abbildung 31: Biegefestigkeit & -modul (links) und Charpy Schlagzähigkeit (rechts) vCF, rCF und industrielle rCF (II = Faserrichtung MD; \perp = Querrichtung CD). - Pill Nassvliese im VARI-Prozess (EP-Matrix). [19]	24

Abbildung 32: Vliese im RTM Verfahren (EP-Matrix) - Zugfestigkeit und E-Modul (links) und Faservolumengehalt (rechts) - (II = Faserrichtung MD; \perp = Querrichtung CD). [20]	25
Abbildung 33: Kompaktierbarkeit der Vliese zur Bestimmung des Faservolumengehalts [20]	26
Abbildung 34: Mischvliese im Heizpressverfahren (PP-Matrix) - Zugfestigkeit und E-Modul (links) und Faservolumengehalt (rechts) - (II = Faserrichtung MD; \perp = Querrichtung CD). [20]	26
Abbildung 35: - Nennah Gessner Nassvliese im Heizpressverfahren (PP-Matrix) - Zugfestigkeit und E-Modul (links) und Faservolumengehalt (rechts) der Neufasern und rezyklierten Fasern [20]	27
Abbildung 36: Umformungsverhalten d es Mischvlieses aus 12 Lagen [0°/90°] (links); Schikanebauteil umgeformt im Werkzeug (mittig) und 3D-Kontur mit hohen Umformgraden (rechts). [20]	28
Abbildung 37: Laborprozess im Vgl. zum th. dom. Carbonfaserherstellungsprozess	32
Abbildung 38: Wirkungskategorien des Laborprozesses im Vgl. zur Glasfaserherstellung	33
Abbildung 39: Einflussgrößen auf die Wirkungskategorien des Laborprozesses	34
Abbildung 40: Phasenabhängiger Energieverbrauch	35
Abbildung 41: Phasenabhängiger Leistungsbedarf	35
Abbildung 42: Temperaturverlauf Basisprozess und kontinuierliche Prozesse	36
Abbildung 43: Einfluss der Energiequelle	37
Abbildung 44: Einfluss der Anlagenauslastung	38
Abbildung 45: Zusammenfassung der Optimierungsmöglichkeiten am Beispiel des GWP	39
Abbildung 46: Optimierter Pyrolyseprozess im Vgl. zum therm. dom. C-Faserherstellungsprozess	40
Abbildung 47: Einfluss Emissionsdaten auf EP (links), auf Aquat. Salzwasser Ökotoxpot. (rechts)	41
Abbildung 48: Einfluss Emissionsdaten auf das Humantoxizitätspotential	42
Abbildung 49: Zusammenfassung der Ergebnisse GWP	43
Abbildung 50: Zusammenfassung der Ergebnisse ADP elementar	44
Abbildung 51: Zusammenfassung der Ergebnisse EP	44
Abbildung 52: Zusammenfassung der Ergebnisse AP	44
Abbildung 53: Zusammenfassung der Ergebnisse ODP	44
Abbildung 54: Vergleich Energieverbrauch Pyrolyseszenarien/Induktionsszenarien	46
Abbildung 55: Vergleich Stickstoffverbrauch Pyrolyseszenarien/Induktion	46
Abbildung 56: Vergleich Kühlwasserverbrauch Pyrolyseszenarien/Induktion	46
Abbildung 57: Laborprozess im vgl. zum el. dom. Carbonfaserherstellungsprozess	51
Abbildung 58: Energieoptimierter Prozess (3-stufiger kontinuierlicher Pyrolyseprozess mit 4-facher Auslastung) im Vgl. zum Glasfaserherstellungsprozess	51
Abbildung 59: Zusammenfassung der Ergebnisse ADP fossil	52
Abbildung 60: Zusammenfassung der Ergebnisse Aquat. Frischwasser Ökotoxpot.	52
Abbildung 61: Zusammenfassung der Ergebnisse Aquat. Salzwasser Ökotoxpot.	52
Abbildung 62: Zusammenfassung der Ergebnisse Terrestrisches Ökotoxpot.	52
Abbildung 63: Zusammenfassung der Ergebnisse Humantoxpot.	52
Abbildung 64: Zusammenfassung der Ergebnisse PE	52
Abbildung 65: Zusammenfassung der Ergebnisse POCP	53

A 4. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick der Methoden der Faser-Matrix-Separation.	2
Tabelle 2 Durchmesser, E-Modul und Zugfestigkeit der rCF im Vergleich zur entschlichteten vCF.	14
Tabelle 3: Übersicht Festigkeitskennwerte in Abhängigkeit untersch. Nasslege-Prozessparameter	18
Tabelle 4: Modelldaten des Pyrolyseprozesses	31
Tabelle 5: Prozesse bzw. Flüsse des Pyrolysemodells	50

A 5. Projekt-Kontakte

Universität Augsburg

Institut für Physik
Lehrstuhl für Experimentalphysik II

Anschrift:
Universitätsstraße 1
86159 Augsburg

Prof. Dr. Siegfried Horn
Telefon +49 (0)821 / 598-3438
horn@physik.uni-augsburg.de

Dr. Wolfgang Müller
Telefon +49 (0)821 / 598-3453
wolfgang.mueller@physik.uni-augsburg.de

Anna Schneller
Telefon +49 (0)821 / 598-3422
anna.schneller@physik.uni-augsburg.de

Fraunhofer Gesellschaft

Institut für Chemische Technologie ICT
Projektgruppe „Funktionsintegrierter Leichtbau“

Anschrift:
Am Technologiezentrum 2
86159 Augsburg

Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler
Telefon +49 (0)821 / 90678-200
klaus.drechsler@ict.fraunhofer.de

Jakob Wölling
Telefon +49 (0)821 / 90678-231
jakob.woelling@ict.fraunhofer.de

Franz Baumann
Telefon +49 (0)821 / 90678-224
franz.baumann@ict.fraunhofer.de

Frank Manis
Telefon +49 (0)821 / 90678-229
frank.manis@ict.fraunhofer.de

A 6. Unternehmenskontakte

Neenah Gessner GmbH

Otto-von-Steinbeis-Str. 14 b
83052 Bruckmühl

Telefon:
+49 (0)8062 / 703470

Mobil:
+49 (0)172 8387940

Tenowo GmbH

Fabrikzeile 21
95028 Hof

Telefon:
+49 (0)9281 / 49-0

Telefax:
+49 (0)9281 / 49-188

Internet:
www.tenowo.com

Pill Nassvliestechnik GmbH

Heilbronner Str. 274
72760 Reutlingen

Telefon:
+49 (0)7121 / 62 22 83

Telefax:
+49 (0)7121 / 62 22 84

Internet:
www.pill-nassvliestechnik.de/