

RESEARCH ARTICLE OPEN ACCESS

Vergleichende Untersuchung der Eigenschaften recycelter Kohlenstofffasern

Comparative investigation of the properties of recycled carbon fibers

Philipp Karsten Niebel¹  | Violetta Schumm² | Mareen Zöllner¹ | Thomas Krampitz¹ | Holger Lieberwith¹  | Marcel Zeisberg³ | Enrico Baumgärtel⁴ | Jens Bachmann⁵

¹TU Bergakademie Freiberg, Institut Für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingsystemtechnik (IART), Lampadiusstraße 4, Freiberg | ²Fraunhofer-Institut Für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV), Am Technologiezentrum 2, Augsburg | ³Zeisberg Carbon GmbH, Voltmerstr. 65, Hannover | ⁴TU Dresden, Institut Für Massivbau (IMB), George-Bähr-Str. 1, Dresden | ⁵Deutsches Zentrum für Luft Und Raumfahrt (DLR), Institut Für Systemleichtbau, Lilienthalplatz 7, Braunschweig

Correspondence: Philipp Karsten Niebel (philipp-karsten.niebel@iart.tu-freiberg.de)

Received: 6 Oktober 2025 | **Revised:** 9 Februar 2026 | **Accepted:** 12 Februar 2026

Schlagwörter: CFK | Faserqualität | Kohlenstofffasern | Recycling

Keywords: carbon fibers | CFRP | fiber quality | recycling

ABSTRAKT

Die Kohlenstofffasern (CF) verleihen den kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) trotz niedriger Dichte hervorragende Festigkeitseigenschaften. Aufgrund des hohen Energieaufwands bei der CF-Herstellung wird eine Substitution neu produzierter CF (vCF) mit recycelten CF (rCF) angestrebt. Der Einsatz von rCF in der Industrie erfordert eine gleichbleibende und standardisierte Faserqualität über Chargen hinaus. Vor diesem Hintergrund hat dieser Artikel das Ziel, anhand von verschiedenen Charakterisierungsmethoden beispielsweise die mechanischen Eigenschaften und den Zustand der Faseroberfläche von vCF sowie mittels unterschiedlicher Recyclingverfahren zurückgewonnenen rCF zu vergleichen. Es werden Potentiale für die Optimierung von CFK-Recyclingverfahren abgeleitet.

ABSTRACT

Carbon fibers (CF) give carbon fiber reinforced plastics (CFRP) its excellent strength properties despite its low density. In order to reduce the energy consumption and the greenhouse gas emissions caused by CF production, the substitution of the virgin CF (vCF) by recycled CF (rCF) recovered with a lower energy requirement is targeted. The application of rCF in industry requires a uniform and standardized fiber quality across batches. In this regard, this article's aim is to compare for example the mechanical properties and the state of the fiber surface of vCF and rCF recovered by different recycling methods based on different fiber characterization methods. Furthermore, potentials for the optimization of CFRP recycling processes are derived.

Abbreviations: BMC, Bulk-Molding-Compound; CF, Kohlenstofffasern; CFK, Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff; CFRP, Carbon Fiber Reinforced Polymer; EHZ, Elektrohydraulische Zerkleinerung; EoL, End-of-Life; FLV, Faserlängenverteilung; GFK, Glasfaserverstärkter Kunststoff; rCF, recycelte Kohlenstofffasern; REM, Rasterelektronenmikroskop; SMC, Sheet-Molding-Compound; TRL, Technology Readiness Level; vCF, neuwertige Kohlenstofffasern; WEA, Windenergieanlage.

This is an open access article under the terms of the [Creative Commons Attribution](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© 2026 The Author(s). *Chemie Ingenieur Technik* published by Wiley-VCH GmbH

1 | Einleitung

Leichtbau ist u. a. im Transportwesen eine verbreitete Konstruktionsmethode, um durch Gewichtseinsparungen den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen zu senken und damit dem Klimawandel und der Ressourcenknappheit entgegenzutreten. Bei kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK), dessen größte Einsatzgebiete mit einem Anteil von insgesamt etwa 60 % des weltweiten CFK-Bedarfs die Luft- und Raumfahrtbranche sowie die Automobilindustrie sind, handelt es sich um einen häufig eingesetzten Leichtbauwerkstoff [1]. Ein weiteres Anwendungsgebiet von CFK sind Rotorblätter von Windenergieanlagen (WEA), deren zunehmende Spannweite ein Verhältnis von Steifigkeit und Dichte erfordert, das glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) nicht erreichen [2, 3]. Die hervorragenden mechanischen Eigenschaften von CFK resultieren aus den enthaltenen Kohlenstofffasern (CF), die in eine Kunststoffmatrix eingebettet sind [4]. Neben thermoplastischen Matrixwerkstoffen kommen häufig duromere Matrixsysteme, etwa Epoxidharz mit einem Faservolumengehalt zwischen 50 % und 60 %, zum Einsatz [5]. Typisch für CFK ist eine niedrige Dichte von etwa $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ sowie hohe Zugfestigkeiten und Elastizitätsmodule im Bereich von 1100 MPa bzw. 110 GPa [6]. Nachteile dieses Verbundwerkstoffs sind hohe Kosten, die sich oft auf etwa 50 € kg^{-1} bis 100 € kg^{-1} belaufen sowie ein hoher ökologischer Fußabdruck von bis zu $26 \text{ kg CO}_2\text{-Äquivalent pro kg CF}$ [7, 8]. Da mit wachsendem CFK-Bedarf auch die Menge an CFK-Abfall ansteigt, gewinnt das CFK-Recycling an Bedeutung [9, 10]. Bei der CF- und CFK-Herstellung treten einerseits Produktionsabfälle wie unimprägnierte Faserabfälle, Prepreg-Verschnitt oder ausgehärteter CFK-Ausschuss auf. Andererseits erreichen zukünftig immer mehr CFK-haltige Produkte ihr Lebensende und fallen als End-of-Life-Abfall (EoL-Abfall) an [10]. In den kommenden Jahren werden beispielsweise allein aus Rotorblättern von WEA, die durchschnittlich eine Lebensdauer von etwa 20 bis 30 Jahren aufweisen, mit ansteigender Tendenz jährlich 5300 t a^{-1} CFK-Abfall erwartet [11, 12]. Aus diesem Grund sind aktuell verschiedene Methoden zum CFK-Recycling mit dem Ziel der Rückgewinnung recycelter Kohlenstofffasern (rCF) und deren Wiedereinsatz in neuen Verbundkomponenten Forschungsgegenstand [13].

Dieser Beitrag hat das Ziel, die Auswirkungen unterschiedlicher Verfahren zur Rückgewinnung langer rCF aus konsolidierten CFK-Abfällen auf deren Eigenschaften zu untersuchen. Die erzeugten rCF werden charakterisiert, untereinander sowie mit vCF verglichen und Literaturangaben gegenübergestellt, um die Degradation der Fasern zu beurteilen. Als Nebeneffekt werden Ansätze zur Erhöhung des Wertschöpfungspotentials von rCF ermittelt.

2 | CFK-Recycling

2.1 | Motivation

Die Verbrennung sowie die Deponierung sind keine geeigneten Optionen für den Umgang mit CFK-Abfall [14]. Da sich die Kunststoffmatrix zur energetischen Verwertung eignet, ist die Deponierung von CFK u. a. in der EU und in Großbritannien verboten [15, 16, 17]. Trotz des hohen Heizwertes von z. T. über $30.000 \text{ kJ kg}^{-1}$ ist jedoch die Verbrennung von CFK weder in

Haus- noch in Sondermüllverbrennungsanlagen empfehlenswert und wird von den Unternehmen üblicherweise verweigert. Ursache dafür ist die meist zu geringe Verweildauer der thermisch hoch belastbaren Fasern im Verbrennungsraum. Unverbrannte, elektrisch leitfähige Faserreste können Schäden an der Filteranlage verursachen oder über die Verbrennungsschlacke in die Umwelt gelangen [18]. An vielversprechenden thermischen oder energetischen Verwertungsoptionen in Hochtemperaturprozessen, wie beispielsweise der Calciumcarbid-, Zement- oder Stahlherstellung, wird derzeit geforscht [18–20].

Das Recycling von CFK mit der Rückgewinnung der Fasern stellt gemäß dem deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz die zu priorisierende Lösung dar. Mit dem Einsatz von Recyclingfasern lässt sich der ökologische Fußabdruck von CFK deutlich reduzieren. Die Herstellung von vCF ist mit einem hohen Energiebedarf von bis zu 600 MJ kg^{-1} verbunden [21, 22]. Das CFK-Recycling bzw. die Rückgewinnung von rCF aus CFK-Abfall benötigt je nach Verfahren nur einen Bruchteil der genannten Energiemenge. Beispielsweise werden für chemische und thermische Verfahren etwa zwischen 40 MJ kg^{-1} und 125 MJ kg^{-1} angegeben [22, 23].

2.2 | Recyclingverfahren für CFK

Beim CFK-Recycling werden grundsätzlich die in Abbildung 1 dargestellten mechanischen, thermischen und chemischen Verfahren unterschieden [24, 25]. Oft handelt es sich um Downcycling, weil die rCF sowie die daraus hergestellten Produkte minderwertiger als die ursprünglichen Qualitäten bzw. Anwendungen sind. Beim mechanischen Recycling erfolgt eine z. T. mehrstufige Zerkleinerung der CFK-Abfälle. Die elektrohydraulische Zerkleinerung (EHZ) ist dadurch gekennzeichnet, dass die CF und die Kunststoffmatrix durch einen aus einer Hochspannungsentladung resultierenden und sich im Wasser ausbreitenden Druckstoß aufgeschlossen werden [26]. Die erzeugten Fasereigenschaften sind mangelhaft, weil Restanhaftungen vorhanden sind und bereits geringe mechanische Beanspruchungen zum Bruch der rCF führen [26–29]. Die mittels mechanischen Recyclings erzeugten Partikel lassen sich zu faser- und matrixreichen Fraktionen sortieren und können anschließend als festigkeitssteigernde Füllstoffe eingesetzt werden [30]. CFK mit thermoplastischer, d. h. aufgrund der Molekülstruktur schmelzbarer Kunststoffmatrix, eignet sich besonders für das mechanische Recycling. Nach der Zerkleinerung und Aufbereitung des CFK-Abfalls kann das entstandene Granulat durch Spritzgießen zu neuen, kurzfaserverstärkten Bauteilen verarbeitet werden, wobei auch mehrere Lebenszyklen möglich sind [28, 31].

Das thermische Recycling für die Rückgewinnung von Fasern beinhaltet unter anderem die Pyrolyse, die Mikrowellenpyrolyse sowie den Fluidized-Bed-Process. Es gibt bereits Unternehmen, die die Pyrolyse im industriellen Maßstab betreiben und aus CFK-Abfällen gewonnene rCF-Produkte kommerziell anbieten [3]. Unter weitgehender Inertgasatmosphäre wird dabei die Kunststoffmatrix zwischen 450°C und 600°C thermisch degeneriert, wobei an der Faseroberfläche verbleibende Koksreste bei einer nachgelagerten Oxidation in Luftatmosphäre entfernt werden [32]. Die Pyrolysegase werden üblicherweise zur Bereitstellung der Prozesswärme verbrannt und senken den Energiebedarf der Anlage [33]. Die Mikrowellenpyrolyse hat die Besonderheit, dass

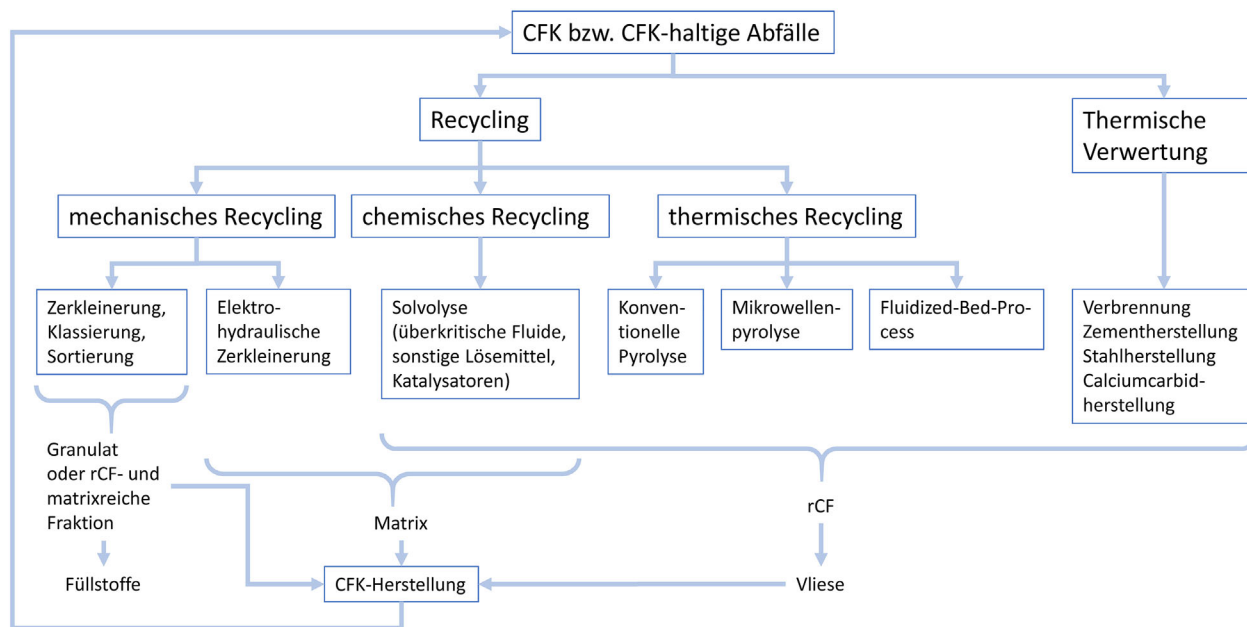


ABBILDUNG 1 | Übersicht über Recyclingverfahren für CFK sowie die entstehenden Rezyklate.

die Prozesswärme durch Mikrowellen aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit der CF direkt im Material erzeugt wird [34]. Somit ist der Prozess weniger abhängig von der thermisch zu beaufschlagenden Oberfläche und der Permeabilität des Aufgabeguts. Beim Fluidized-Bed-Process wird die Kunststoffmatrix vorzerkleinerter CFK-Stücke in einer von Heißgas durchströmten mineralischen Wirbelschicht thermisch zersetzt [35]. Das rohstoffliche Recycling der Matrixbestandteile, bei dem beispielsweise Monomere für die Chemieindustrie zurückgewonnen werden, ist momentan noch Forschungsgegenstand.

Das chemische Recycling umfasst im Wesentlichen technische Verfahren wie die Solvolyse mit chemischen Lösemitteln, die thermische Zersetzung mit Rückgewinnung von Synthesegas und den Einsatz überkritischer Fluide, die als Lösungsmittel fungieren [24]. Durch den Zusatz von Katalysatoren wie z. B. Kaliumhydroxid oder -carbonat kann bei der Solvolyse die Reaktionszeit herabgesetzt werden [24, 36]. Es besteht im Vergleich zur Pyrolyse ein höheres Potenzial, die Kunststoffmatrix durch Filtrationsprozesse zurückzugewinnen und als Rohstoff für die Kunststoffindustrie bereitzustellen [21]. Nachteile der Solvolyse sind die technisch anspruchsvollen Reaktoren mit kostenintensiven Konstruktionen und die aktuell noch geringe Wirtschaftlichkeit [3].

Die separierten Kohlenstofffasern können u. a. zu Nass- oder Trockenvliesen, Garnen sowie Sheet- und Bulk-Molding-Compounds (SMC und BMC) verarbeitet werden [21]. Dies ermöglicht die Herstellung rCF-verstärkter Bauteile mit guten mechanischen Eigenschaften. Erfolgt die Imprägnierung und Konsolidierung der nicht endlosen und zu textilen Halbzeugen aufbereiteten rCF-Filamente mit einer thermoplastischen Matrix, spricht man von Organoblechen. Diese sind im Gegensatz zu mit endlosen vCF verstärkten Platten durch eine bessere Drapier- und Umformbarkeit gekennzeichnet, zeigen jedoch geringere mechanische Eigenschaften [37, 38]. Da CFK-Komponenten häufig dünnwandig sind, können

von der Kunststoffmatrix separierte und noch gewebe- oder gelegeartig zusammenhängende rCF-Agglomerationen mittels Ablegen zu neuen flächen- oder schalenförmigen Produkten verarbeitet werden [39]. Der Vorteil gegenüber der textilen Verarbeitung, z. B. zu Vliesen, bei der die Fasern mechanisch stärker belastet und demzufolge gekürzt werden, besteht in der homogenen Faserorientierung, einer größeren Faserlänge und einem höheren Faservolumengehalt [40].

2.3 | Bewertung der Faserqualität

Die Qualität der rCF und die Möglichkeiten für deren Wiedereinsatz bzw. der Grad des Downcyclings werden u. a. von den folgenden Faktoren beeinflusst [41]:

- im Vergleich zu den vCF möglichst geringe Abnahme der mechanischen Kennwerte, insbesondere der Zugfestigkeit, des Elastizitätsmoduls und der Bruchdehnung
- weitgehende Vermeidung von Restanhaftungen, Koksrückständen oder Beschädigungen wie z. B. Lochfraß an der Faseroberfläche
- möglichst hohe Faser-Matrix-Haftung im Neuverbund
- möglichst definierte Faserlängenverteilung (FLV)

Die Faserlänge hat Einfluss auf die mechanische Beanspruchbarkeit eines CF-basierten Strukturbauteils sowie alle Zwischenschritte der Verarbeitung. Das zeigt sich einerseits dadurch, dass sich beispielsweise in Krempelmaschinen zur Trockenvliesherstellung Fasern von unter 30 mm und über 100 mm nur schwer oder gar nicht verarbeiten lassen [42]. Andererseits erhöhen sowohl eine schmale FLV als auch eine hohe mittlere Faserlänge bis zu einem gewissen Maß die Verbundfestigkeit und -steifigkeit [43]. Da die Faserlänge vor allem von der Vorzerkleinerung des CFK-Abfalls oder dem Zuschnitt der rCF und weniger

TABELLE 1 | Übersicht mittels unterschiedlicher CFK-Recyclingverfahren erzielter rCF-Eigenschaften.

Verfahren	bezogene Zugfestigkeit $R_{m,rel}$	bezogenes Elastizitätsmodul E_{rel}	bezogene Bruchdehnung ε_{rel}	Quelle
Pyrolyse	Mediane der Intervallgrenzen der jeweiligen Autoren: 0,63 bis 0,93	Mediane der Intervallgrenzen der jeweiligen Autoren 0,92 bis 0,93	—	
	0,17 bis 0,96	—	—	[17]
	0,36 bis 0,93	—	—	[25]
	0,92 bis 0,92	0,96 bis 0,98	—	[36]
	0,93	0,88	—	[45]
	0,9	—	—	[46]
	0,15 bis 0,98	—	—	[47]
Solvolyse	Mediane der Intervallgrenzen aller Einträge der jeweiligen Autoren: 0,90 bis 0,98	Mediane der Intervallgrenzen aller Einträge der jeweiligen Autoren: 0,86 bis 0,95	Mediane der Intervallgrenzen aller Einträge der jeweiligen Autoren: 0,93 bis 0,99	
	0,47 bis 0,99	—	—	[17]
	0,9 bis 0,98	—	—	[25]
	0,88 bis 0,96	0,97	0,97	[44]
	0,85 bis 0,98	—	—	[36]
	0,91 bis 0,991	0,8 bis 0,93	—	[24]
	0,98	0,92	—	[45]
	0,95 bis 0,98	—	—	[48]
	0,96	—	—	[49]
	0,94	0,98	—	[50]
	0,95 bis 0,98	—	—	[47]
	0,9 bis 0,94	—	—	[46]
	0,72 bis 0,98	0,81 bis 0,99	0,88 bis 1	[51]

vom Prozess der Faserrückgewinnung abhängt, wird die FLV in diesem Artikel nicht untersucht.

Die erhebliche Faserkürzung während des mechanischen Recyclings konsolidierter CFK-Bauteile lässt keine Verarbeitung der Rezyklate zu langfaserverstärkten Komponenten zu. Infolge der mangelnden Qualität der mittels elektrohydraulischer Zerkleinerung zurückgewonnenen rCF eignen sich diese nicht für den hochwertigen Wiedereinsatz [41]. Da im Artikel die Rückgewinnung langer rCF aus konsolidierten CFK-Abfällen im Vordergrund steht, werden hauptsächlich die mit der Solvolyse und Pyrolyse erreichbaren rCF-Qualitäten näher betrachtet.

Tabelle 1 verschafft einen Eindruck über die Spannweite der erzielbaren Zugfestigkeiten, Elastizitätsmodule und Bruchdehnungen von rCF. Dafür werden gemäß der Gleichungen 1 bis 3 jeweils die auf den entsprechenden Wert der vCF bezogenen Größen herangezogen.

$$R_{m,rel} = \frac{R_{m,rCF}}{R_{m,vCF}} \tag{1}$$

$$E_{rel} = \frac{E_{rCF}}{E_{vCF}} \tag{2}$$

$$\varepsilon_{rel} = \frac{\varepsilon_{rCF}}{\varepsilon_{vCF}} \tag{3}$$

Sowohl bei der Pyrolyse als auch bei der Solvolyse tritt laut Literatur nur eine geringe Reduzierung der rCF-Zugfestigkeit auf, wobei die Ergebnisse der Solvolyse tendenziell etwas besser ausfallen. Die z. T. starken Schwankungen der Werte lassen darauf schließen, dass eine Optimierung der Prozessparameter der Solvolyse oder Pyrolyse hinsichtlich der Faserqualität beispielsweise in Abhängigkeit des angegebenen Materials möglich ist. Die in Tabelle 1 ebenfalls dargestellten Bruchdehnungen und Elastizitätsmodule der rCF werden nur von wenigen Autoren aufgegriffen. In der Regel sind diese jedoch ähnlich wie die Zugfestigkeit nur geringfügig schlechter als bei vCF [24, 36, 44].

Zwar bleibt bei der Solvolyse und Pyrolyse eine große Faserlänge erhalten, jedoch sind auch Schäden an der Faseroberfläche sowie Restanhaftungen möglich. Bei der Solvolyse entstehen tendenziell eine höhere Zugfestigkeit, eine bessere Faserreinheit und geringere Oberflächenbeschädigungen als bei der Pyrolyse [21]. Die Beschaffenheit der Faseroberfläche wirkt sich auf die Faser-Matrix-Haftung aus, wobei diese durch eine erhöhte Rauheit auch verbessert werden kann [41].

TABELLE 2 | Spezifikationen des verwendeten Materials.

Laminat PREDO PR-UD 600/1250 FT1091 33 (23 C)		Roving SIGRAFIL C T50-4.0/240-E100	
Aufbau	drei Lagen UD-Prepreg in 0/90/0-Ausrichtung	Anzahl der CF	50.000
Harzsystem	Epoxidharz FT109	Dichte in g cm ⁻³	1,8
0 °-Zugfestigkeit in MPa	1900	Durchmesser der CF in μm	7
0 °-Elastizitätsmodul in GPa	130	Zugfestigkeit in GPa	4
0 °-Bruchdehnung in %	1,2	Elastizitätsmodul (Zug) in GPa	240
interlaminare Scherfestigkeit in MPa	65	Bruchdehnung in %	1,7
45 °-Zugfestigkeit in MPa	55	Schlichte	Epoxy
45 °-Elastizitätsmodul in GPa	3,8	spezifischer elektrischer Widerstand der CF in $\mu\Omega\text{ m}$	15
45 °-Bruchdehnung in %	2,5		
Harzmasseanteil in %	33,3		

3 | Versuchsgut, Verfahren und Charakterisierungsmethoden

3.1 | Versuchsgut

Für die Untersuchung wurden die in Tabelle 2 spezifizierten Materialien verwendet. Es handelt sich bei allen Versuchen um denselben CF-Typ Sigrafil C T50-4.0/240-E100 des Herstellers SGL. Die CF standen sowohl als trockene, neuwertige Faser-Rovings als auch als konsolidiertes Laminat des Typs PREDO PR-UD 600/1250 FT1091 33 (23 C) des Herstellers Carbonwerke Weißgerber zur Verfügung.

3.2 | Verfahren

Sowohl die CFK-Platten als auch die Fasern wurden manuell, d. h. mithilfe einer Abkantbank bzw. Faserschere, auf eine Länge von 40 mm zugeschnitten und einzeln in die Verfahren gegeben. Im batchweise betriebenen Pyrolyseofen des Fraunhofer IGCV erfolgt eine Pyrolyse bei 550°C mit 30 min Haltezeit unter Stickstoffatmosphäre. Es schließt sich eine zweistufige Oxidation in Sauerstoffatmosphäre mit zwei jeweils 30-minütigen Haltezeiten von 500°C und 450°C an, um die Koksreste auf der Faseroberfläche zu entfernen. Bei der Solvolyse kommen als Lösemittel die im Verhältnis von 3,75:1 gemischte Essig- und Salzsäure in ihrer Gasphase zum Einsatz. Bei einem Masseverhältnis von Lösemittel zu Aufgabegut von 3:1 werden die CFK Partikel im Reaktor 6 h bei 11 bar und 180°C behandelt. Anschließend werden die rCF mit Wasser gewaschen und getrocknet.

3.3 | Charakterisierungsmethoden

Die Untersuchungen der mechanischen Fasereigenschaften wurden vom Fraunhofer IGCV mittels Einzelfaserzugversuchen durchgeführt. Hierfür wurde das Prüfgerät FAVIMAT + der Firma Textechno verwendet. Nach dem Einspannen einer einzelnen CF erfolgt zunächst eine vibroskopische Durchmesserbestimmung bei einer Einspannlänge von 25 mm, einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm min⁻¹ und

einer Vorspannung von 1 cN tex⁻¹. Anschließend werden die Zugfestigkeiten und -steifigkeiten mit einer Kraftmessdose von 210 cN bei einer Prüfgeschwindigkeit von 0,5 mm min⁻¹ und Vorspannung von 1 cN tex⁻¹ bestimmt. Es wird kontinuierlich ein Kraft-Weg-Diagramm aufgezeichnet. Der Probenumfang umfasst jeweils 20 gültige Messungen pro Fasertyp. Die optische Bewertung der Oberflächenqualität erfolgt auf Basis von mittels Rasterelektronenmikroskop^o(REM) aufgenommenen Bildern. Bei dem am Fraunhofer IGCV zur Verfügung stehenden Gerät handelt es sich um ein REM des Typs TM3030Plus von Hitachi.

Die Charakterisierung der Faser-Matrix-Haftung kann anhand der im Einzelfaser-Pull-Out-Versuch ermittelten Grenzflächen-Scherfestigkeit erfolgen. In Anbetracht einer möglichen Steigerung dieses Kennwertes durch eine Oberflächenbehandlung der rCF ist eine Untersuchung im Rohzustand nach der Pyrolyse oder Solvolyse weniger relevant und wird daher im Rahmen dieses Artikels nicht durchgeführt.

4 | Versuchsauswertung

4.1 | Einzelfaserzugversuche

- Faserdurchmesser
In Abbildung 2 sind die gemessenen Faserdurchmesser der vCF und rCF dargestellt. Eine signifikante Verjüngung oder Verdickung der CF ist trotz solvolytischer oder pyrolytischer Behandlung und der damit einhergehenden thermischen Belastung der Fasern nicht zu erkennen. Der tendenziell größere Faserdurchmesser der Pyrolyse-rCF ist möglicherweise auf Koksreste zurückzuführen und deutet darauf hin, dass ein substanzieller Angriff der Faseroberfläche während der Oxidationsphase unter Sauerstoffatmosphäre ausblieb. Die Solvolyse-rCF, deren Faserdurchmesser fast identisch zu den vCF ist, wurden hingegen gewaschen und somit von lockeren Restanhaftungen befreit.
- Kennwerte der Zugfestigkeit
Abbildung 3 enthält die Ergebnisse der durchgeführten Einzelfaserzugversuche. Zusätzlich werden Werte der mittels EHZ zurückgewonnenen rCF desselben Fasertyps aus

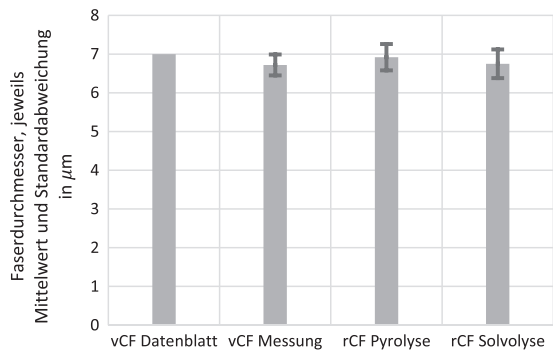


ABBILDUNG 2 | Durchmesser der neuwertigen, pyrolysierten und solvolysierten CF.

vorherigen Arbeiten angegeben [25]. Da diese Messungen jedoch vor einigen Jahren in einem anderen Labor erfolgten, unterscheiden sich die vCF-Ergebnisse geringfügig. Es wird deutlich, dass sowohl bei der Pyrolyse als auch bei der Solvolyse keine signifikante Verringerung der Steifigkeit und der Zugfestigkeit auftritt. Alle Mittelwerte der gemessenen Parameter der vCF sind jedoch bereits im Vergleich zu den entsprechenden Werten aus dem Datenblatt des Faserherstellers niedriger. Die gemäß dem Stand der Technik tendenziell besseren mechanischen Eigenschaften der Solvolyse-rCF gegenüber Pyrolyse-rCF sind erkennbar. Vor allem der Unterschied der Zugfestigkeit ist jedoch aufgrund der hohen Streuung, die ebenfalls kaum Unterschiede zwischen vCF und rCF aufweisen, nicht signifikant. Die verringerte Festigkeit und Steifigkeit der mittels EHZ zurückgewonnenen rCF bestätigen, dass sich diese weniger für den Einsatz in Verbunden mit guten mechanischen Eigenschaften eignen.

c. Bruchdehnung

Abbildung 4 zeigt den Vergleich der Bruchdehnungen der vCF und rCF. Sowohl die hohe Streuung als auch die geringe Abweichung der Mittelwerte deuten auf einen nicht signifikanten Effekt der Faserbehandlung auf die Bruchdehnung hin. Möglicherweise ist das ein Indiz dafür, dass die Sprödigkeit, die für die Weiterverarbeitung der rCF von hoher Bedeutung ist, durch die Pyrolyse und die Solvolyse ebenfalls nicht nachteilig beeinflusst wird. Die These, dass ein entsprechen-

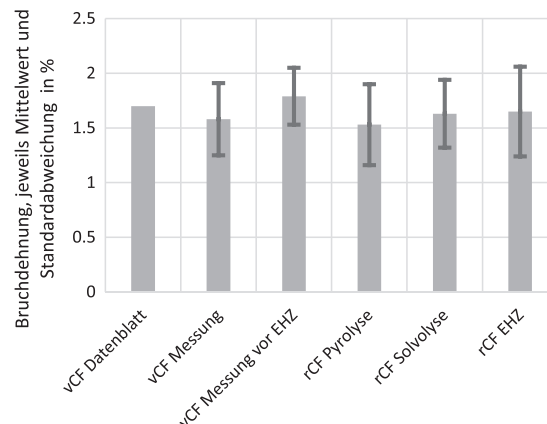


ABBILDUNG 4 | Bruchdehnung der neuwertigen, solvolysierten und pyrolysierten CF aus Einzelfaserzugversuchen (EHZ nach [22] mit Prüflänge rCF 8 bzw. 20 mm).

der Zusammenhang zwischen der Bruchdehnung und der Sprödigkeit besteht, wird nachfolgend erörtert.

Ähnlich wie bei Metallen bildet sich bei der Biegung von CF ein in Abbildung 5 dargestellter, linearer Dehnungsverlauf über dem Faserquerschnitt aus, wobei die dehnungsfreie Achse gegenüber der Fasermittelmitte verschoben ist [52]. Das ist darauf zurückzuführen, dass CF bei Druck- und Zugbeanspruchungen unterschiedliche Steifigkeiten aufweisen. Dieser Effekt kann mit den schwächeren Van-der-Waals-Bindungen zwischen den in Faserlängsrichtung angeordneten Graphitschichten und den weitaus stärkeren, kovalenten Bindungen innerhalb dieser Ebenen begründet werden. Dadurch kommt es auf der Druckseite der CF zu Knickungen bzw. Wölbungen [52]. Zur Berechnung der Dehnung und der Vorhersage des Faserbruchs scheint es nicht abwegig zu sein, Ansätze wie z. B. in Gleichung 4 anzuwenden, die der für Metalle verbreiteten Biegetheorie ähneln [53]. Dafür spricht auch, dass die Sprödigkeit von CF u. a. mit der Filamentknotenprüfung beurteilt wird [54]. Dabei erfolgt die Ermittlung des spezifischen Krümmungsradius, der das Verhältnis aus minimalem, ohne Bruch möglichem Krümmungsradius des Filaments und dem Filamentdurchmesser darstellt [54]. Bemerkenswert daran ist, dass dieser Parameter zum Kehrwert der Dehnung bzw. Bruchdehnung proportional ist. Literaturangaben zufolge liegt

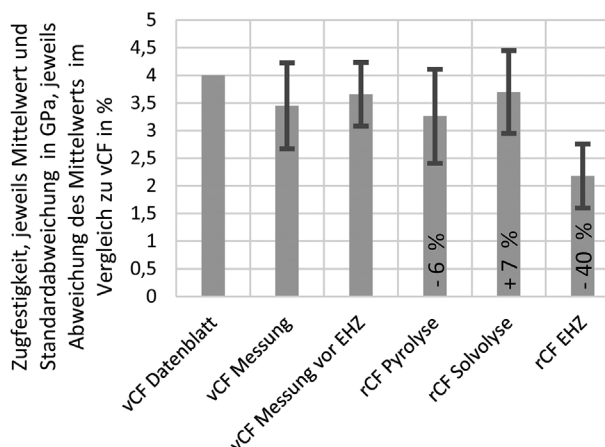
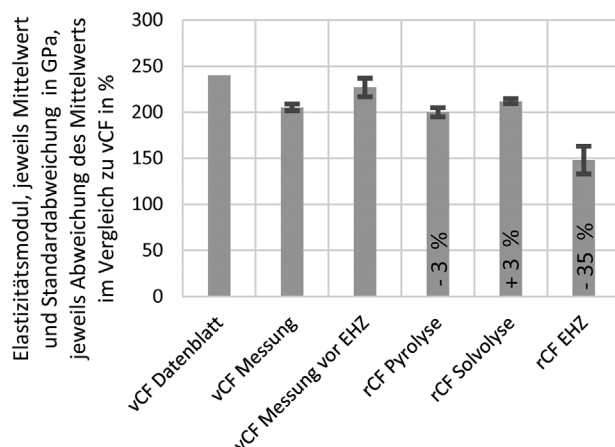


ABBILDUNG 3 | Kennwerte aus den Einzelfaserzugversuchen (EHZ nach [22] mit Prüflänge rCF 8 bzw. 20 mm).

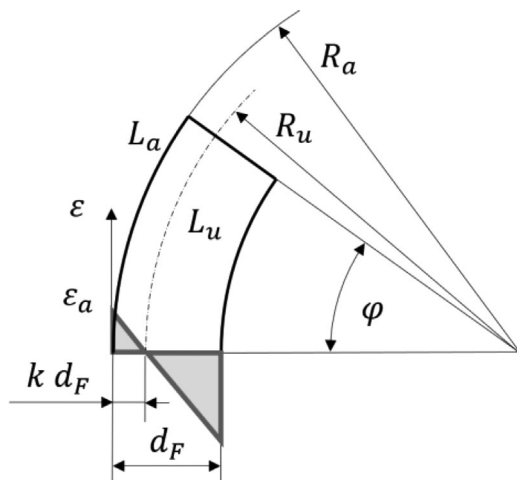


ABBILDUNG 5 | Biegetheoretischer Ansatz bei der Biegung der Fasern.

der spezifische Krümmungsradius bei CF zwischen 25 und 60 [54].

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L_a - L_u}{L_u} = \frac{L_a}{L_u} - 1 = \frac{R_a}{R_u} - 1 = \frac{R_u + k d_F}{R_u} - 1 = k \frac{d_F}{R_u} \quad (4)$$

Allerdings lässt diese Analogie unbeachtet, dass nach wie vor unbekannt ist, ob der Faserbruch unter einer Biegelast aufgrund von Zug- oder Druckbeanspruchungen eintritt. Nur für den ersten Fall, in dem die Fasern auf der Bogenaußenseite einreißen, wäre der Zusammenhang zwischen der ermittelten Bruchdehnung und Sprödigkeit gegeben. Zur Untermuerung der These sind demnach weitere Untersuchungen insbesondere hinsichtlich des Einflusses der Solvolyse oder der Pyrolyse auf das Verhalten der CF bei einer Druckbeanspruchung erforderlich.

4.2 | Rasterelektronenmikroskopie

Bei den in Abbildung 6 dargestellten REM-Aufnahmen handelt es sich um eine Auswahl aus insgesamt etwa 30 Bildern, die allerdings keine repräsentative Stichprobe bilden und deswegen nur punktuelle Einblicke in die Faserqualität erlauben. Dennoch soll nachfolgend ein Versuch unternommen werden, aus den Aufnahmen Tendenzen abzuleiten. Es ist beispielsweise zu erkennen, dass die Pyrolyse-rCF gehäuft Rückstände und Restanhaftungen aufweisen. Im Gegensatz dazu sind an den Solvolyse-rCF weniger solcher Verunreinigungen an der Faseroberfläche sichtbar. Mögliche Ursachen dafür sind die bei der Solvolyse höhere Behandlungszeit, die geringere thermische Belastung der Fasern bei der Solvolyse, der Waschprozess nach der Solvolyse und die stärkere Abhängigkeit der optimalen Prozessparameter der Pyrolyse von den angegebenen CF. Es ist demnach wahrscheinlich, durch Parameteroptimierung eine bessere Qualität der Pyrolyse-rCF erreichen zu können. Auch an den Neufasern sind Verunreinigungen bzw. Störstoffe zu erkennen, bei denen es sich allerdings weniger um flache Restanhaftungen der Kunststoffmatrix an der Faseroberfläche, sondern wahrscheinlich um sonstige, aus der Umgebung eingetragene Schmutzpartikel handelt.

Bei der Faserschichte handelt es sich um eine extrem dünne, chemisch dem Matrixwerkstoff ähnelnde Kunststoffschicht, die während der vCF-Herstellung auf die Faseroberfläche aufgetragen wird, um die Faser-Matrix-Haftung zu verbessern und die CF vor dem Einwirken äußerer Lasten zu schützen. Eine Aussage zum Vorhandensein dieser Schichte auf den rCF kann nicht getroffen werden, da die Auflösung der REM-Aufnahmen nicht ausreicht, um visuell Unterschiede der beschichteten vCF und unbeschädigten Abschnitte der rCF zu erkennen. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass die Schichte während der Solvolyse bzw. der Pyrolyse verloren geht, weil sich die Schichte und die Kunststoffmatrix meist chemisch ähneln [41, 43]. Die Beurteilung der Sprödigkeit der rCF basierend auf den REM-Aufnahmen gestaltet sich zwar schwierig, allerdings wird in der Fachliteratur angenommen, dass die Sprödigkeit umso größer ist, je mehr Oberflächenbeschädigungen auftreten [55].

5 | Zusammenfassung

Aus den in diesem Artikel durchgeführten Untersuchungen lässt sich die mit dem aktuellen Stand der Technik übereinstimmende Schlussfolgerung ziehen, dass beim CFK-Recycling die Pyrolyse und die Solvolyse nur eine geringfügige Verschlechterung der rCF-Qualität bewirken und daher der mechanischen Separierung der CF und der konsolidierten Kunststoffmatrix, insbesondere der EHZ, vorzuziehen sind. Das zeigen die im Rahmen dieses Artikels mittels Einzelfaserzugversuch und REM-Aufnahmen bestimmten Festigkeiten, Steifigkeiten, Bruchdehnungen und der Zustand der Oberflächen der rCF. Den leichten Vorteilen der Solvolyse bei der Faserqualität stehen das höhere TRL der Pyrolyse bzw. deren einfachere technische Umsetzbarkeit gegenüber. Bei beiden Verfahren bleibt eine große Faserlänge erhalten, die durch die Vorzerkleinerung beeinflusst werden kann. Zusammenfassend erscheint die Separation der CF von der Kunststoffmatrix gegenwärtig z. T. auf einem hohen TRL als zufriedenstellender gelöst als andere Prozessschritte des CFK-Recyclings, wie z. B. die Zerkleinerung und die Sortierung des CFK-Abfalls sowie die Verarbeitung der rCF [56, 57]. Die mangelnde Akzeptanz der rCF lässt sich nur in geringem Maß mit der Faserqualität begründen. Besonders der Einfluss der FLV sowie deren Anpassung, der Schädigungen der rCF bei deren Verarbeitung sowie die Faser-Matrix-Haftung bedürfen weiterer Forschung. Außerdem sollte das gesamte Behandlungskonzept von CFK-Abfall, beginnend bei dessen Anfall, betrachtet werden. Da die optimalen Prozessparameter insbesondere bei der Pyrolyse jeweils auf den Fasertyp abgestimmt werden müssen, ist eine sortenreine Erfassung, Sammlung und Behandlung des CFK-Abfalls im Sinne des Erzielens einer hohen rCF-Qualität zielführender als der Versuch einer allgemeinen Prozessoptimierung. Während solche Konzepte beispielsweise für Rotorblätter von WEA denkbar sind, lässt sich das für unspezifizierte CFK-haltige EoL-Abfälle aus sonstigen Quellen wie z. B. dem Sportbereich nur schwer umsetzen. Die in diesem Artikel erarbeitete These, dass die Verarbeitbarkeit der rCF bzw. deren Sprödigkeit in Zusammenhang mit der im Einzelfaserzugversuch ermittelten Bruchdehnung steht, sollte weiter untersucht werden. Dafür sind mikromechanische Untersuchungen zur Druckbelastung von rCF sowie zum Einfluss der Schädigung der Faseroberfläche nötig.

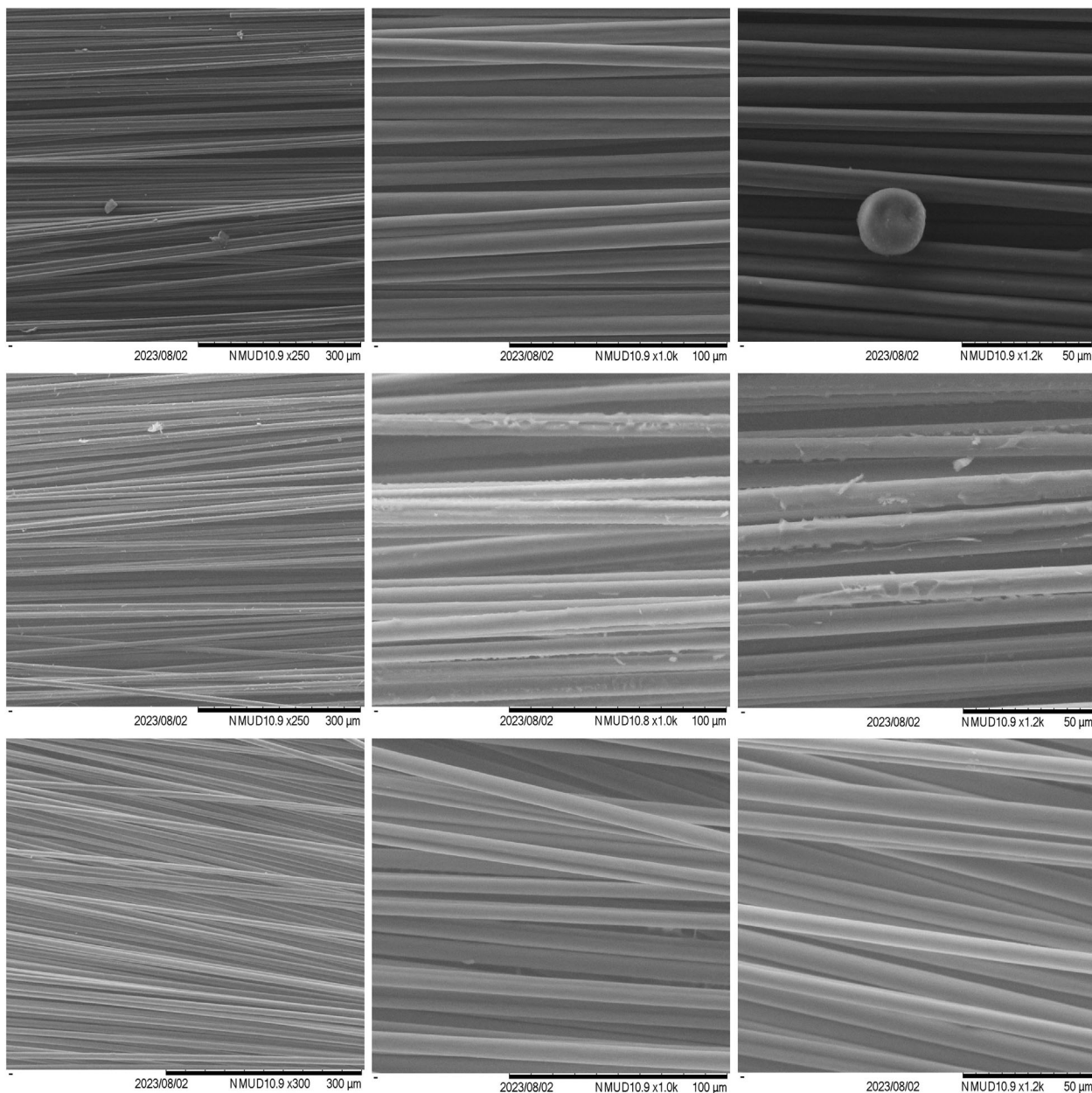


ABBILDUNG 6 | REM-Aufnahmen von CF (oben: vCF, Mitte: Pyrolyse-rCF, unten: Solvolyse-rCF).

Danksagungen

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (Förderkennzeichen: 03LB3007D) im Fördergebiet Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB) gefördert und vom Projektträger Jülich, Geschäftsbereich UMW betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Open access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Formelzeichen

d_F Faserdurchmesser, μm

E Elastizitätsmodul, GPa

E_{rel} Auf den Neufaserwert bezogenes Elastizitätsmodul, —

k Proportionalitätsfaktor, —

L Bogenlänge in einer gebogenen CF, mm

R Radius in einer gebogenen CF, mm

R_m Zugfestigkeit, MPa

$R_{m,rel}$ Auf den Neufaserwert bezogene Zugfestigkeit, —

ΔL Längenänderung in einer gebogenen CF, mm

Griechische Symbole

ε Dehnung bzw. Bruchdehnung, %

ε_{rel} Auf den Neufaserwert bezogene Bruchdehnung, —

φ Winkel des Ausschnitts einer gebogenen CF, °

Indizes

- a Außenrand einer gebogenen CF
- rCF Wert für rCF
- u Ungelängte bzw. dehnungsfreie Zone in einer gebogenen CF
- vCF Wert für vCF

Literatur

1. M. Sauer, M. Kühnel, and E. Witten, *Composites-Marktbericht 2018* (Industrieverein Verstärkte Kunststoffe (AVK), 2018).
2. M. Henningsen and H. Ruckdäschel, "Was Windturbinen den Richtigen Dreh Gibt," *Chemie in Unserer Zeit* 6 (2021): 406–421.
3. *Entwicklung von Rückbau- und Recyclingstandards für Rotorblätter* (2022).
4. *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*, AVK, Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe (Springer Fachmedien, 2013).
5. H. Lengsfeld, J. Lacalle, T. Neumeyer, and V. Altstädt, eds., *Faserverbundwerkstoffe: Prepregs und ihre Verarbeitung* (Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2020).
6. S. Pischinger and U. Seifert, eds., *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (Springer Vieweg, 2021).
7. B. Klein and T. Gänsicke, *Leichtbau-Konstruktion* (Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019).
8. M. Zottler, *Life-Cycle Analyse von Leichtbaukonzepten für den Automobilbau, Masterarbeit* (Technische Universität Graz, 2014).
9. M. Sauer and D. Schüppel, *Marktbericht 2022 Der globale Markt für Carbonfasern und Carbon Composites* (2022).
10. *Entsorgung faserhaltiger Abfälle* (LAGA Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Abfall, 2019).
11. M. Wexler, W. Baumann, T. Doninger, et al., *Optionen der Carbonfaserverwertung in industriellen Hochtemperaturprozessen* (2021).
12. *Entwicklung Eines Konzepts und Maßnahmen zur Sicherung Einer Guten Praxis bei Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen* (2023).
13. M. Zöllner, D. Hamann, T. Krampitz, S. Thüm, and H. Lieberwirth, *Handbook of Recycling*, Ch., ed. C. Meskers, E. Worrell, and M. A. Reuter, (Elsevier, 2024), 34.
14. *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der Umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz—KrWG)* (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2012).
15. *Richtlinie (EU) 2018/850 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 1999/31/EG über Abfalldeponien*, 2018.
16. M. Limburg and P. Quicker, "Entsorgung von Carbonfasern. Probleme des Recyclings und Auswirkungen auf die Abfallverbrennung," *Energie aus Abfall* 13 (2016): 135–144.
17. I. Shyha and D. Huo, eds., *Advances in Machining of Composite Materials* (Springer International Publishing, 2021).
18. *Möglichkeiten und Grenzen der Entsorgung Carbonfaserverstärkter Kunststoffabfälle in Thermischen Prozessen* (Umweltbundesamt, 2021).
19. D. Schueppel, J. Stockschröder, and T. Reden, "End-of-life CFRP as a Raw Material in Steel and of Calcium Carbide Production," in 18th European Conference on Composite Materials, Athen (2018).
20. T. Krampitz, J. Lampke, D. Dietz, and H. Lieberwirth, "Recycling of Carbon Fiber Reinforced Plastic-Containing Waste and Iron Oxide-Containing Dusts as Aggregates in Metallurgical Processes," *Materials* 18 (2025): 8.
21. H. Lengsfeld, H. Mainka, and V. Altstädt, eds., *Carbon Fibers* (Carl Hanser Verlag GmbH Co. KG, 2021).
22. F. Meng, E. A. Olivetti, Y. Zhao, J. Chang, S. Pickering, and J. McKechnie, "Comparing Life Cycle Energy and Global Warming Potential of Carbon Fiber Composite Recycling Technologies and Waste Management Options," *ACS Sustainable Chem Eng* 8 (2018): 9854–9865.
23. K. Kooduvalli, J. Unser, S. Ozcan, and U. K. Vaidya, "Embodied Energy in Pyrolysis and Solvolysis Approaches to Recycling for Carbon Fiber-Epoxy Reinforced Composite Waste Streams," *Recycling* 1 (2022): 6.
24. E. Pakdel, S. Kashi, R. Varley, and X. Wang, "Recent Progress in Recycling Carbon Fibre Reinforced Composites and Dry Carbon Fibre Wastes," *Resour, Conserv Recycl* 166 (2021): 166.
25. A. E. Krauklis, C. W. Karl, A. I. Gagani, and J. K. Jørgensen, "Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s," *J Compos Sci* 5 (2021): 28, <https://doi.org/10.3390/jcs5010028>.
26. C. Orzol, *Untersuchungen zur Elektrohdraulischen Zerkleinerung von Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Resins für das Carbonfaser-Recycling* (Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2018).
27. C. Orzol, M. Ohlmeyer, T. Krampitz, H.-G. Jäckel, M. Zöllner, and H. Lieberwirth, "Voruntersuchungen zur Elektrohdraulischen Zerkleinerung von CFRP für das Carbonfaser-Recycling," *Chemie Ingenieur Technik* 12 (2017): 1773–1781.
28. G. Gorbach, C. Daberger, A.-C. Föhner, et al., *Fertigungs- und Recyclingstrategien für die Elektromobilität zur stofflichen Verwertung von Leichtbaustrukturen in Faserkunststoffverbund-Hybridbauweise* (2018).
29. C. Orzol and H. Lieberwirth, "Elektrohdraulische Zerkleinerung von Carbonfaserverstärkten Kunststoffen für das Carbonfaser-Recycling," *Chemie Ingenieur Technik* 91, no. 1-2 (2019): 160–166.
30. H. Sukantu, W. Raharjo, W. Wijang, D. Ariawan, and J. Triyono, "Carbon Fibers Recovery From CFRP Recycling Process and Their Usage: A Review," *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 1034 (2021): 1.
31. M. Zöllner, T. Krampitz, and H. Lieberwirth, "Aufbereitung Kohlenstofffaserverstärkter Thermoplaste zu Granulat für den Wiedereinsatz in Strukturbauteilen," *Chemie Ingenieur Technik* 4 (2020): 459–468, <https://doi.org/10.1002/cite.201900122>.
32. S. R. Naqvi, H. M. Prabhakara, E. A. Bramer, W. Dierkes, R. Akkerman, and G. Brem, "A Critical Review on Recycling of End-of-life Carbon Fibre/Glass Fibre Reinforced Composites Waste Using Pyrolysis towards a Circular Economy," *Resour, Conserv Recycl* 166 (2018): 118–129.
33. T. Rademacker, M. Fette, and G. Jüptner, "Nachhaltiger Einsatz von Carbonfasern Dank CFK-Recycling," *Lightweight Design* 5 (2018): 12–19, <https://doi.org/10.1007/s35725-018-0046-7>.
34. E. Seiler, H. Urban, and U. Teipel, "Mikrowellenpyrolyse von Carbonfaserhaltigen Kunststoffen Als Recyclingoption," *Chemie Ingenieur Technik* 4 (2020): 469–475, <https://doi.org/10.1002/cite.201900133>.
35. X. Xue, S.-Y. Liu, Z.-Y. Zhang, Q.-Z. Wang, and C.-Z. Xiao, "A Technology Review of Recycling Methods for fiber-reinforced Thermosets," *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 41, no. 11-12 (2022): 459–480.
36. J. Wu, X. Gao, Y. Wu, Y. Wang, T. T. Nguyen, and M. Guo, "Recycling Carbon Fiber From Carbon Fiber-Reinforced Polymer and Its Reuse in Photocatalysis: A Review," *Polymers* 15 (2022): 1.
37. C. Goergen, *Quasiplastisches Verformungsverhalten von Organoblechen aus Recyclaten Kohlenstoff-Stapelfasergarnen* (Technische Universität Kaiserslautern, 2020).
38. D. May, C. Goergen, and K. Friedrich, "Multifunctionality of Polymer Composites Based on Recycled Carbon Fibers: A Review," *Adv Ind Eng Polym Res* 4, no. 2 (2021): 70–81.
39. W. Hintze, *CFK-Bearbeitung* (Springer-Verlag GmbH, 2021).
40. F. Manis, J. Wölling, and A. Schneller, "Ganzheitliche Recycling-Prozesskette für Carbonfasergewebe und Gelege," *Lightweight Design* 5 (2016): 14–19.

41. M. Zöllner, *Untersuchungen zur Analytik Freigelegter Kohlenstofffasern aus Unterschiedlichen Aufschlussverfahren* (Universität Bergakademie Freiberg, 2019).
42. F. Manis, *MAI CC4 CaRinA: Carbonfaser Recyclingwerkstoffe für Industrielle Anwendungen* (2021).
43. M. Hengstermann, *Entwicklung von Hybridgarnen aus Recycelten Carbonfasern und Polyamid 6-Fasern für Thermoplastische Verbundbauteile mit Hohem Leistungsvermögen* (Technische Universität Dresden Dissertation, 2020).
44. S. Kumar and S. Krishnan, "Recycling of Carbon fiber With Epoxy Composites by Chemical Recycling for Future Perspective: A Review," *Chemical Papers* 11 (2020): 3785–3807.
45. S. Pimenta and S. Pinho, "Recycling Carbon Fibre Reinforced Polymers for Structural Applications: Technology Review and Market Outlook," *Waste Management* 2 (2011): 378–392.
46. J. D. S. Vincent and N. Dissanayake, *Review of recycling and traceability methods for carbon fibres* (2023).
47. J. Zhang, V. S. Chevali, H. Wang, and C.-H. Wang, "Current Status of Carbon Fibre and Carbon Fibre Composites Recycling," *Composites Part B: Engineering* 193 (2020): 193.
48. D. Borjan, Ž. Knez, and M. Knez, "Recycling of Carbon Fiber-Reinforced Composites—Difficulties and Future Perspectives," *Materials* (2021): 14, <https://doi.org/10.3390/ma14154191>.
49. S. Karuppannan Gopalraj and T. Kärki, "A Review on the Recycling of Waste Carbon Fibre/Glass Fibre-reinforced Composites: Fibre Recovery, Properties and Life-cycle Analysis," *SN Appl Sci* 2 (2020): 3, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2195-4>.
50. N. Rathore and N. L. Panwar, "Environmental Impact and Waste Recycling Technologies for Modern Wind Turbines: An Overview," *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, Iswa* 4 (2023): 744–759.
51. X. Zhang, R. Sibari, S. Chakraborty, et al., "Epoxy-Based Carbon Fiber-Reinforced Plastics Recycling via Solvolysis With Non-Oxidizing Methanesulfonic Acid," *Chemie Ingenieur Technik* 7 (2024): 987–997.
52. D. Loidl, O. Paris, M. Burghammer, C. Riekel, and H. Peterlik, "Direct Observation of Nanocrystallite Buckling in Carbon Fibers Under Bending Load," *Physical Review Letter* 95 (2005): 22.
53. A. A. Leal, J. M. Dietzel, and J. W. Gillespie, "Compressive Strength Analysis for High Performance Fibers With Different Modulus in Tension and Compression," *Journal of Composite Materials* 6 (2009): 661–674.
54. C. Cherif, *Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken—Verfahren—Materialien—Eigenschaften* (Springer, 2011).
55. A. Greco, A. Maffezzoli, G. Buccoliero, F. Caretto, and G. Cornacchia, "Thermal and Chemical Treatments of Recycled Carbon Fibres for Improved Adhesion to Polymeric Matrix," *Journal of Composite Materials* 47, no. 3 (2013): 369–377.
56. P. K. Niebel, T. Krampitz, H. Lieberwirth, and M. Zeisberg, "Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss Verschiedener Zerkleinerungsparameter auf die Spezifische Zerkleinerungsarbeit von Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen," *Chemie Ingenieur Technik* 96, no. 7 (2024): 913–923.
57. P. K. Niebel, T. Krampitz, A. Datt, A. Valenas, and H. Lieberwirth, "Untersuchung der Sortierbarkeit Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe Mittels Induktiver Sensorik," *Chemie Ingenieur Technik* 97, no. 4 (2025): 278–286.