

Entwicklung von Heavy Tows aus recycelten Carbonfasern für kostengünstige duroplastische Composites mit hohem Leistungsvermögen (rCF-Heavy Tows)

Autoren: Mahmud Hossain, Anwar Abdkader und Chokri Cherif

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der TU Dresden

Einleitung

Carbonfaserverstärkte Verbundwerkstoffe (CFK) werden aufgrund ihrer hohen Steifigkeit und Festigkeit sowie der geringen Dichte zunehmend in Leichtbauanwendungen eingesetzt, insbesondere in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Transport, Windenergie, Sport oder Bau. Der globale CFK Bedarf wird sich Prognosen zufolge bis 2024 auf 197.000 t/a [1] erhöhen und damit im Vergleich zu 2011 fast verdreifachen. Das zeigt den dringenden Bedarf an [2, 3] Lösungen zur Wiederverwertung der hochwertigen CF (rCF) im Sinne der Circular Economy. Das ist nicht nur aufgrund strenger rechtlicher Bestimmungen, sondern auch aus ökologischen sowie ökonomischen Gründen eine Notwendigkeit. Zahlreiche Forschungsinstitute und Unternehmen entwickelten in den letzten Jahren Lösungen zur Wiederverwertung von rCF in den Bereichen Vliesstoffe [4-6], Spritzgießen [7, 8] oder als Hybridgarne [9-10]. Diese Arbeiten umfassen allerdings mehrheitlich den Einsatz von rCF in Kombination mit thermoplastischen Fasern für thermoplastische Composites. Für den Bereich rCF basierter duroplastischer CFK wurden bisher vorwiegend rCF-Vliesstoffe aus 100% rCF entwickelt [4-6]. Da die Fasern in den Vliesstoffen prinzipbedingt nur eine begrenzte Länge und eine geringe Orientierung aufweisen und zusätzlich prozessbedingt hohen Faserschädigung auftreten, sind damit bisher nur max. 30% der Verbundkennwerte von CFK-Bauteilen aus Carbonfilamentgarnen erreichbar.

Aktuell sind die im Bereich hochbelastbarer CFK verwendeten Matrixsysteme überwiegend duroplastisch. Derartige Bauteile weisen eine hohe Formstabilität und hohe Steifigkeiten sowie Festigkeiten auf und eignen sich aufgrund niedrigviskoser Matrixsysteme zur Umsetzung komplexer Bauteilgeometrien. Jedoch werden aufgrund der bisher für diese Bauteile nur ungenügend in rCF abbildbaren, notwendigen Eigenschaften vorrangig Primärcarbonfilamentgarne eingesetzt. Neben einer geringen Nachhaltigkeit verursacht das auch um mind. 200 % höhere Kosten [11-13]. Die Herstellung primäres Carbonfilamentgarnes erfordert einen hohen Energiebedarf von ca. 230 MJ/kg [14, 15] mit einem CO₂-Emissionsäquivalent von 20 kg CO₂/kg CF [16, 17]. Hier ist eine deutliche Verbesserung der CO₂-Bilanz notwendig, um einen wesentlichen Beitrag zu den anvisierten Klimaschutzzielen der BRD [18, 19] bzw. der EU [20] leisten zu können. Aus diesem Grund ist der Fokus der Projektarbeit die Entwicklung neuartiger, nachhaltiger rCF-Heavy Tows aus recycelten Carbonfasern (rCF) und dazugehöriger Fertigungstechnologien zur Umsetzung kostengünstiger duroplastischer Composites mit hohem Leistungsvermögen.

Entwicklung einer Prozesskette zur Herstellung von rCF-Heavy Tows am ITM

Die entwickelte Prozesskette zur Herstellung von rCF-Heavy Tows mit hohem mechanischen Leistungsvermögen für komplex geformte duroplastische Composites zeigt schematisch die Abb. 1.

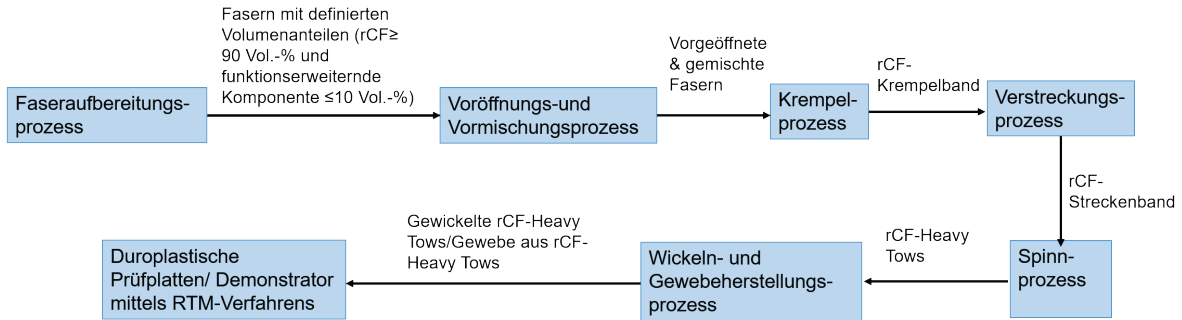


Abb. 1: Schematische Darstellung der Prozesskette zur Entwicklung von rCF-Heavy Tows

Die Eigenschaften der ausgewählten recycelten Carbonfasern (rCF) und Schmelzklebstapelfasern Copolyamid (SKF, EMS-Griltech GmbH) sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Fasereigenschaften

Fasern	Mittlere Faserlänge (mm)	Mittlerer Durchmesser (µm)	Bruchdehnung (%)	E-Modul (GPa)	Mittlere Zugfestigkeit (MPa)	Oberflächenenergie (mN/m)	
						Dispers	Polar
rCF	80 ± 2; 100 ± 2	5,5 ± 0,10	1,7	268 ± 59,6	3558 ± 758	14,1	9,1
SKF	100 ± 2	34,5 ± 0,6	147,9	0,30 ± 0,1	268 ± 20	14,6	8,3

Die ausgewählten und charakterisierten rCF-Verstärkungsfasern sowie die Schmelzklebstapelfasern Copolyamid (SKF) als Funktionsfasern zur Verleihung der Haftung zwischen den rCF wurden im ersten Schritt zum Faserflocken mit definierten Faservolumenanteilen, mittlerer Faserlänge und Eigenschaften aufbereitet, um die Anforderungen der Prozesskette und der Verbundeigenschaften zu erfüllen. Dazu wurde die Voröffnungs- und Vormischungsvorrichtung der Faseraufbereitungsanlage zur schonenden Verarbeitung von rCF und Funktionsfasern im Bezug der Geschwindigkeit und des Abstands des Öffnungsaggregats optimiert. Unter Nutzung der modifizierten Vorrichtung wurden rCF und SKF mit definierten Volumenanteilen (rCF/SKF: 98/2 Vol.-%, 95/5 Vol.-%, 90/10 Vol.-% und 100/0 Vol.-%) schonend gleichmäßig vorgeöffnet bzw. zusätzlich vorgemischt.

Die vorgeöffneten und vorgemischten Fasern wurden anschließend im Krempelprozess zu einem Band verarbeitet. Besondere Herausforderungen des Krempelprozesses war die Umsetzung von Faserbändern mit hoher Gleichmäßigkeit und geringer Faserschädigung der glatten, sehr feinen und extrem querkräftempfindlichen CF. Dazu erfolgten technologisch-konstruktive Modifikationen der Krempeltechnologie (bspw. zur Reduktion der Intensität mit der Arbeiter Wender Walzenpaare in den Faserflor eindringen) und Komponenten weiter- bzw. teilweise neu entwickelt (bspw. eine Zuführmulde für eine tangentielle Zuführung) für eine schonende Faserführung ohne schädigende Umlenkungen (Umlenkradius mind. 8 mm). Darüber hinaus wurden geringe Anteile von Bindemitteln oder Schlichten (≤ 2,5 Vol.-%) auf die rCF aufgebracht, um die Reibung zwischen den Fasern und auch zwischen Fasern und Walzengarnituren zielgerichtet einzustellen. An der modifizierten Krempelanlage wurden zudem optimale maschinen- und textiltechnologischen Parameter ermittelt und damit aus vorgeöffneten und vorgemischten Fasern mit definierten Faservolumenanteilen von rCF und SKF Krempelbänder hergestellt und diese charakterisiert. Die Krempelbänder stehen damit auch zur Untersuchung des Verstreckungsprozesses zur Verfügung.

Die Entwicklung und Umsetzung eines Verstreckungsprozesses war ein weiterer Projektbestandteil. Zielstellungen waren die Erhöhung der Bandgleichmäßigkeit und die Reduktion der Faserschädigung insbesondere an der Reguliereinheit einer Strecke. Dazu wurden folgende Lösungsansätze verfolgt. Nach Ansatz 1 wurden die Tastwalzenbelastung und -oberfläche der Reguliereinheit der Strecke an die extreme Querkraftempfindlichkeit der Fasern angepasst. Der Ansatz 2 verfolgt die Weiterentwicklung der Prozessführung durch mehrfache Verstreckung und erhöhte Doublierung. Darüber hinaus wurden am Streckwerk die geriffelten Standardunterwalzen des Streckwerkes durch topocrombeschichtete Unterwalzen mit optimierten Oberflächeneigenschaften und hoher Verschleißfestigkeit ersetzt. Nach Abschluss der Modifikationen wurden die relevanten streckwerksabhängigen Faktoren, wie Belastungsdruck, Feldweite, Verzugshöhe, Regulierung in Abhängigkeit von Faserlängen und Bandungleichmäßigkeiten untersucht und die bestmögliche Parameter zur Herstellung von Streckenbänder ermittelt, diese hergestellt und charakterisiert. Die Streckenbänder stehen für die Entwicklung von rCF-Heavy Tows zur Verfügung.

Der Fokus der Forschungsarbeiten war die Entwicklung neuartiger rCF-Heavy Tows und dazugehöriger Herstellungstechnologien. Dazu wurde ein modularer Versuchstand konzeptioniert und umgesetzt. Dieser besteht unter anderen aus einem Streckwerk zur Lieferung des Streckenbandes mit definierten Feinheiten, einem Thermostabilisierungsmodul zur Erhöhung der Streckenbandfestigkeit durch Schmelzen beigemischter Schmelzklebefasern, einer Vliesführungsdüse zur Kompaktierung bzw. Verfestigung der Faserstruktur zu rCF-Heavy Tows und einem Aufwicklungsmodul (Abb. 2). Mit Hilfe des Versuchsstandes wurden bestehende textiltechnologische Wechselwirkungen und Technologiegrenzen tiefgreifend untersucht. Zur Ableitung bestmöglicher Herstellungsparameter wurden aus rCF (≥ 90 Vol. %) und geringen Anteilen Schmelzklebefasern (Copolyamid SKF 2/5/10 Vol. %) rCF-Heavy Tows unter Variation der Feinheit, der Intensität des Wärmeeintrags, des Durchmessers der Vliesführungsdüse und der Produktionsgeschwindigkeit hergestellt. Unter Verwendung der bestmöglichen Herstellungsparameter wurden rCF-Heavy Tows verschiedener Feinheiten hergestellt und das feinheitsbezogene Spannungs-Dehnungs-Verhaltens (DIN EN ISO 13934-1) sowie Faserlängen mittels am ITM entwickeltes Verfahren ermittelt. Die rCF- Heavy Tows stehen für die Untersuchung der Weiterverarbeitbarkeit mittels Webtechnologie und zur Fertigung von Verbundplatten mittels RTM-Verfahren (Resin Transfer Molding) zur Verfügung. Für Verbundzugprüfungen wurden Verbundplatten in Anlehnung an DIN EN ISO 527-5/A/2 hergestellt und charakterisiert.

Die hergestellten Faserbänder, rCF-Heavy Tows und UD-Prüfplatten mit definierten Faservolumenanteilen sind in der Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: beispielhaft ausgewählte Produkte mit definierten Faservolumenanteilen

Faservolumenanteil [Vol.-%]		Krempelband (KB)	Streckenband (SB)	rCF-Heavy Tows (HT)	Unidirektionale (UD) Verbundplatten
rCF	SKF				
90	10	KB1-rCF/SKF-90/10	SB1-rCF/SKF-90/10	HT1-rCF/SKF-90/10	UD1-rCF/SKF-90/10
95	5	KB2-rCF/SKF-95/5	SB2-rCF/SKF-95/5	HT2-rCF/SKF-95/5	UD2-rCF/SKF-95/5
98	2	KB3-rCF/SKF-98/2	SB3-rCF/SKF-98/2	HT3-rCF/SKF-98/2	UD3-rCF/SKF-98/2
100	0	KB4-rCF-100	SB4-rCF-100	HT4-rCF-100	UD4-rCF-100

rCF: recycelte CF

SKF: CoPolyamid/Schmelzklebefaser

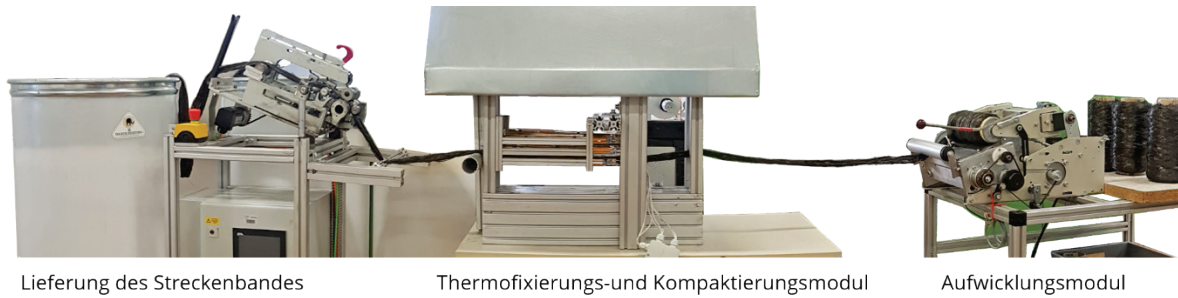
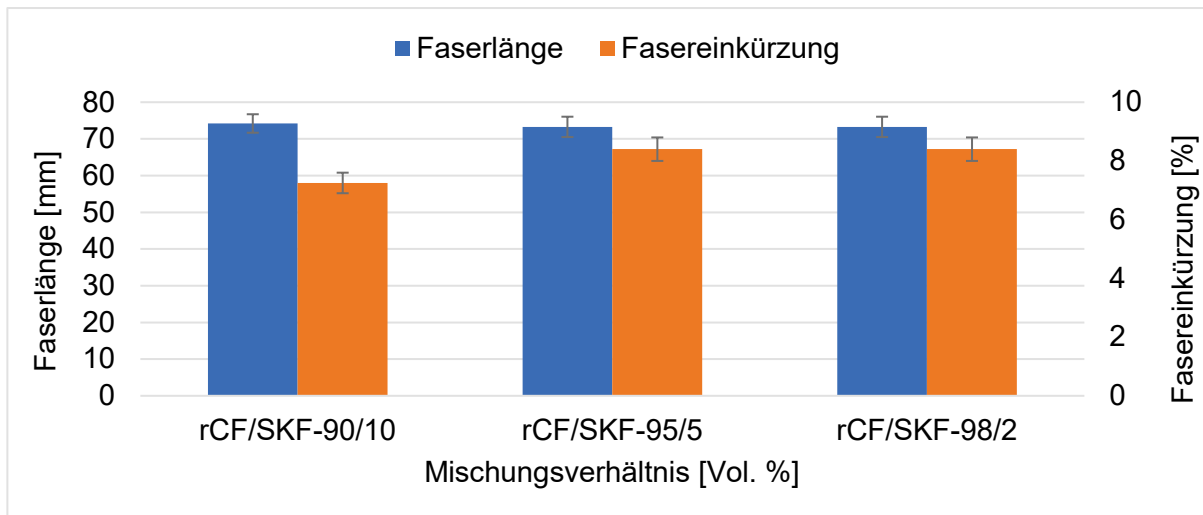


Abb. 2: rCF-Heavy Tows-Fertigungsversuchsstand

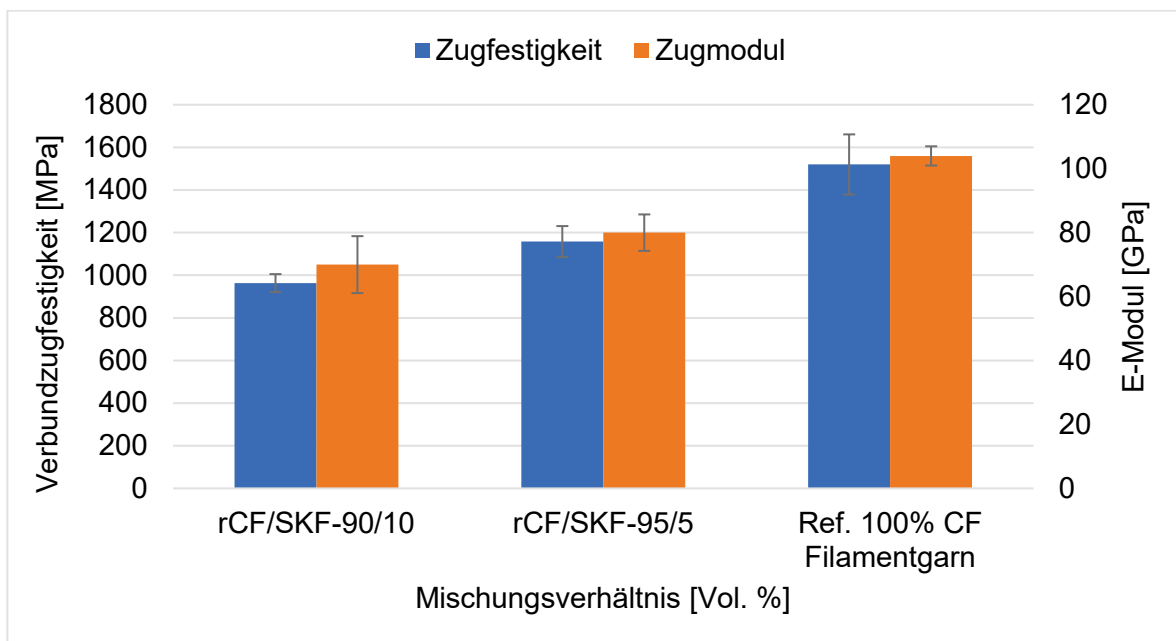
Ergebnisse (Auswahl)

Die technisch-technologischen Untersuchungen und anlagentechnischen Entwicklungen im Rahmen dieser Arbeit erlauben die schonende Verarbeitung von glatten, sehr feinen und extrem querkräftempfindlichen rCF zu rCF-Heavy Tows mit sehr geringer Faserschädigung und hoher Faserorientierung und daraus die Herstellung von Composites mit hohem Leistungsvermögen. Durch die Optimierung der technologischen und maschinentechnischen Parameter der Krepelanlage konnte die Faserschädigung bzw. Fasereinkürzung von bisherigen größer als 80 % auf kleiner als 10 % reduziert werden. Durch Optimierung der Strecke wurde die Bandgleichmäßigkeit signifikant verbessert.

Den Einfluss des Anteils der Schmelzklebefasern auf Faserschädigung bzw. Fasereinkürzung bei der Verarbeitung von rCF im Krepelprozess und auf die mechanischen Eigenschaften der auf den rCF-Heavy Tows basierten Verbundplatten zeigt beispielhaft Abb. 3. Die Faserschädigung bzw. Fasereinkürzung im Krepelprozess sinkt geringfügig mit steigendem Anteil Schmelzklebefasern. Die funktionserweiternde Komponente z. B. Schmelzklebefasern führt zu einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen den Fasern und reduziert die mechanische Beanspruchung der rCF durch die Garnituren. Infolgedessen verringert sich die Schädigung der rCF während des Krepelprozesses. Die Verbundzugfestigkeit bzw. der E-Modul von Composites betragen bei einem Schmelzklebefaseranteil von 5 und 10 Vol.% 1158 ± 72 MPa bzw. $80 \pm 5,7$ GPa und $963 \pm 42,4$ MPa und $70 \pm 8,9$ GPa. Diese Werte entsprechen ca. 77% der Verbundfestigkeit bzw. des E-Moduls von Composites auf Basis von Carbonfilamentgarnen. Bereits ein geringer Anteil von ca. 5 % Schmelzklebefasern bewirkt eine gleichmäßige, störungsarme und schonende Verarbeitung von rCF. Dies führt zu gleichmäßigen Faserstrukturen und darauf basierender Verbundstrukturen. Eine weitere Erhöhung des Anteils der Schmelzklebefasern auf 10 % kann weiterhin gleichmäßige Faserstrukturen und darauf basierender Verbundstrukturen umgesetzt werden, jedoch überwiegt hier der Anteil der Schmelzklebefaser so groß, dass sie aufgrund des geringeren FVA negativ auf die Verbundeigenschaften wirkt.



(a)



(b)

Abb. 3: rCF-Heavy Tows - Einfluss rCF-Volumenanteil auf (a) mittlere Faserlänge bzw. Fasereinkürzungen in den Krepelbändern und (b) Verbundfestigkeit duroplastischer Composites (FVG 50 Vol.-%)

Zusammenfassung

Im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens (21612 BR) wurde am ITM die gesamte Prozesskette zur industriellen Herstellung neuartiger drehungsfreier rCF-Heavy Tows entwickelt. Insbesondere wurde eine neuartige Technologie zur Herstellung von rCF-Heavy Tows auf Basis recycelter Carbon- (rCF, ≥ 90 Vol.-%) und Schmelzklebefasern (< 10 Vol.-%) konzipiert, konstruiert und erfolgreich umgesetzt. Diese umfasst die Faseraufbereitung, den Krepelprozess zur Krepelbandbildung, den Streckprozess zur Streckenbandbildung sowie die abschließende Fertigung der rCF-Heavy Tows aus rCF und Schmelzklebefasern in einem neuen entwickelten Versuchsstand. Der Nachweis der Eignung der entwickelten Technologie erfolgt mit der Umsetzung von rCF-Heavy Tows mit unterschiedlichen rCF Typen, Faserlängen und Faservolumengehalten und eines Demonstrators. Abb. 4 zeigt den am ITM entwickelten Prozessablauf von der rCF bis zum Demonstrator. Die entwickelten rCF-Heavy Tows mit Feinheiten zwischen 3000-7000 tex und deren Weiterverarbeitbarkeit zu textilen Halbzeugen

wurden erfolgreich nachgewiesen. Die entwickelten rCF-Heavy Tows und darauf basierende Verbunde weisen eine maximale Verbundzugfestigkeit bzw ein maximales Zug-Modul von 1158 ± 72 MPa bzw. $80\pm 5,7$ GPa auf. Die rCF Heavy Tows sind somit für kostengünstige duroplastische Composites mit hohem Leistungsvermögen und komplexer Geometrie einsetzbar. Damit bieten die entwickelten rCF-Heavy Tows ein sehr hohes Innovations- und Marktpotential in den Bereichen Werkstoffe und Materialien, Leichtbau, Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung sowie Ressourceneffizienz. Damit eröffnet sich die Gelegenheit für KMU der Textilindustrie neue Produkte und Technologien für den Faserverbundwerkstoffmarkt und sich als Lieferant für die Automobil-, Maschinenbau- sowie Luftfahrt-, Medizin- und Sportgeräteindustrie zu etablieren.

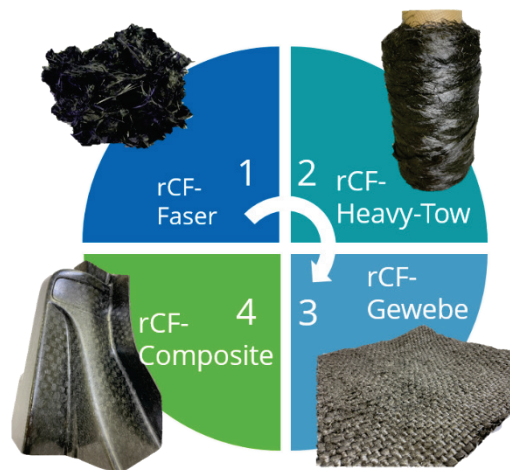


Abb. 4: Materialfluss der Prozesskette: von der Faser über rCF-Heavy Tows, Gewebe zu Composites

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 21612 BR der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.

Literatur

1. SAUER, M.; SCHÜPPEL, D.: Composites-Marktbericht 2021 – Veröffentlichte Kurzfassung, (22.03.2023)
2. WOIDASKY, J. (HRSG.): Weiterentwicklung des Recyclings von faserverstärkten Verbunden. Recycling und Rohstoffe. Band Bd. 6, S. 241–259, Neuruppin: TK Verlag, 2013.
3. LAGA Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall: Entsorgung faserhaltiger Abfälle – Abschlussbericht. https://www.laga-online.de/documents/bericht-laga-ausschuss-entsorgung-faserhaltigeabfaelle_juli-2019_1574075541.pdf, (22.03.2023)
4. Gulich, B.; Hofmann, M. (2013): From black gold to the „golden fleece“, In: Allgemeiner Vliesstoff-Report 4, 2013, S. 34–35.
5. ELG CARBON FIBRE LTD. (Hrsg.): CARBISO TM-PA Nonwoven Mats. Coseley, UK, 2020

6. Schinner, G.; Brandt, J.; Richter, H. (1996): Recycling Carbon-Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites, In: Journal of Thermoplastic Composite Materials 9 (1996), Nr. 3, S. 239–245.
7. Wong, K. H.; Syed Mohammed, D.; Pickering, S. J.; Brooks, R. (2012): Effect of coupling agents on reinforcing potential of recycled carbon fibre for polypropylene composite. In: Composites Science and Technology 72 (2012), Nr. 7, S. 835–844.
8. Stoeffler, K.; Andjelic, S.; Legros, N.; Roberge, J.; Schougaard, S. B. (2013): Polyphenylene sulfide (PPS) composites reinforced with recycled carbon fiber. In: Composites Science and Technology 84 (2013), S. 65–71.
9. Cherif, C.; Hengstermann, M.; Hasan, M. M. B.; Abdkader, A. (2018): Practical technologies for the development of fiber-based high-performance structures of recycled carbon fibers and thermoplastic fibers for the cost-effective serial production of lightweight structures with high performance In: European scientific exchange meeting and discussion on circular economy and recycling of technical textiles. Frankfurt/Main, 17.10.2018
10. Abdkader, A.; Hengstermann, M.; Cherif, C. (2017): Innovative Hochleistungshybridgarne aus recycelten Carbonfasern für Leichtbaustrukturen/Innovative high-performance hybrid yarns made from recycled carbon fibers for lightweight structures. In: Technische Textilien/Technical Textiles 60 (2017), 1/E2, 18-20/E78-E80.
11. Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U. (2014): Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2014.
12. Zürn, M. (2019): Ergebnisse des LAGA ATA Ad-hoc-Ausschusses „Faserhaltige Abfälle“ (Aufbereitung und Verwertung carbonfaserhaltiger Abfälle). Dessau-Roßlau, 19.09.2019.
13. Yadav, S. N.; Kumar, V.; Verma, Sushil, K. (2006): Fracture toughness behaviour of carbon fibre epoxy composite with Kevlar reinforced interleave. In: Materials Science and Engineering: B 132 (2006), 1-2, S. 108–112.
14. GEHR, M.: LCA benefits of rCF. In: Allianz Faserbasierte Werkstoffe Baden-Württemberg e.V. (Ed.): Proceedings. Composite Recycling & LCA 2017, Stuttgart, 08.-09.03.2017, pp. 1-19
15. ACHTERNBOSCH, M.; BRÄUTIGAM, K.-R.; KUPSCH, C.; REßLER, B.; SARDEMANN, G.: Analyse der Umweltauswirkungen bei der Herstellung, dem Einsatz und der Entsorgung von CFK- bzw. Aluminiumrumpfkomponten, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6879, 2003. (www.itas.kit.edu/pub/v/2003/acua03a.pdf)
16. Umweltbundesamt: CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom steigen 2021 wieder an. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-steigen>, (27.03.23)
17. Life Cycle Assessment – Carbon Fiber Composite Materials. Toray Industries, Inc., 14.09.21. (www.cf-composites.toray/aboutus/sustainability/lci.html)
18. Bundesregierung: EU-Klimaschutzpaket Fit For 55 | – <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj>. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/europa/fit-for-55-eu-1942402>, Webseite, (29.03.23)
19. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Klimaschutz in Zahlen – Aktuelle Emissionstrends und Klimaschutzmaßnahmen in Deutschland – Ausgabe 2022. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/klimaschutz-in-zahlen.pdf?__blob=publicationFile&v=8, (22.03.2023)
20. Publications Office of the European Union: Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 – Europäisches Klimagesetz. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32021R1119>, (29.03.23)