

Recycling von Carbonfasern

Dieter Meiners und Bertram Eversmann

1.	Einleitung	371
2.	Carbonfasern	372
3.	Matrix	373
4.	Materialverbund CFK.....	373
5.	Recycling von Carbonfasern und CFK	374
6.	Fazit.....	378
7.	Literatur.....	378

Ausgehend von den aktuellen Marktentwicklungen beim Einsatz von Carbonfasern und den daraus hergestellten Bauteilen aus Carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) werden mögliche Wege der Aufbereitung von Carbonfaser- und CFK-Abfällen dargestellt. Anhand erster erfolgreicher Entwicklungen zum Wiedereinsatz recycelter Carbonfasern wird die aktuelle Situation vorgestellt und das Recyclingpotenzial analysiert.

1. Einleitung

Die Entwicklung von Leichtbaustrukturen wurde in den letzten Jahren vorrangig durch die Optimierung bestehender Materialkonzepte unter Berücksichtigung fertigungstechnisch realisierbarer Bauweisen vorangetrieben. Eine sehr interessante Materialgruppe im Hinblick auf die Kombination von leichten und gleichzeitig hochfesten und -steifen Bauteilstrukturen sind Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK). Das sehr hohe Leichtbaupotenzial führt deshalb zunehmend zum Einsatz in allen Bereichen der Verkehrstechnik, der Windenergiegewinnung, der Sportartikelindustrie, des Maschinenbaus sowie der Medizintechnik [1]. Auch wenn CFK durch die Materialkombination und die feste Anbindung zwischen Carbonfasern und polymerer Matrix an sich kein recyclinggerechtes Material darstellen, sind Recyclingprozesse möglich und aufgrund des Preises von neu hergestellten Carbonfasern auch wirtschaftlich.

2. Carbonfasern

Carbonfasern werden als Endlosfasern überwiegend auf Basis von Polyacrylnitril in einem zweistufigen Prozess durch Pyrolysieren bei 200 bis 300 °C und anschließendem Karbonisieren bei 1.300 bis 1.600 °C hergestellt.

Hierbei bildet sich eine zweidimensionale Graphitstruktur in der Kohlenstofffaser, die zu einer nahezu 100 prozentig kristallinen Struktur mit sehr hoher Orientierung in Faserlängsrichtung führt (z.B. HT-, IM-Carbonfaser). Je nach gewünschter Qualität kann die Faser in einem weiteren Schritt bei bis zu 3.000 °C graphitisiert werden (HM, UHM-Carbonfaser). Durch unterschiedliche Precursorfasern und verschiedene Temperaturen in der Karbonisierung und Graphitisierung können somit verschiedene Eigenschaften eingestellt werden und führen so zu einer Vielzahl unterschiedlicher Carbonfasertypen.

Die Leistungsfähigkeit von Faserverbundwerkstoffen wird im Allgemeinen stark durch die Anbindung der polymeren Matrix an die Faseroberfläche bestimmt. Deshalb wird während der Faserfertigung eine Oberflächenaktivierung durchgeführt, um sauerstoffhaltige Gruppen auf der Faseroberfläche zu erzeugen. Gleichzeitig erfolgt der Auftrag einer polymeren Schlichte die zusätzlich zur Verbesserung der Faser-Matrix-Anbindung als wichtige Schutzschicht bei der Weiterverarbeitung und Handhabung der Fasern dient.

Carbonfasern weisen einen Durchmesser von etwa 5 bis 10 µm auf und werden zu Rovings mit mehreren tausend Einzelfasern zusammengefasst. Die Schlichte hält diesen Rovingverbund zusammen und ermöglicht dadurch die Weiterverarbeitung zu technischen Textilien, wie beispielsweise Gewebe, Gelege oder Geflechte. Mit einer Dichte von nur etwa 1,8 g/cm³ und exzellenten mechanischen Eigenschaften (E-Modul: 220 bis 680 GPa, Zugfestigkeit: 2.740 bis 6.370 MPa) eignen sie sich für die Anwendung in Leichtbaustrukturen. Werden sie als Verstärkungsfasern in Kunststoffe, die deutlich geringere Festigkeit und Steifigkeit aufweisen, eingebracht, entsteht ein Verbundwerkstoff mit sehr guten spezifischen Eigenschaften [1, 2].

Der Herstellungsprozess von Carbonfasern ist äußerst energieintensiv, benötigt hohe Investitionskosten für die Anlagentechnik und stellt hohe Anforderungen an die Prozessführung wie auch die Qualität der Precursor. Dies schlägt sich auch in dem hohen Preis von etwa 20 EUR/kg nieder. Wird die Faser zu Geweben oder Gelegen weiterverarbeitet, steigt der Preis nochmals um ein Vielfaches. Aufgrund des hohen Preises konnten sich Carbonfaserverstärkte Kunststoffe noch nicht in Massenmärkte etablieren [3, 4].

Aufgrund der guten mechanischen Eigenschaften und der geringen Dichte steigt die Nachfrage nach Kohlenstofffasern trotz des hohen Preises in den vergangenen Jahren stetig an. Die weltweiten Produktionskapazitäten von Carbonfasern stiegen im Jahr 2012 auf 43.500 Tonnen [5]. Der Bedarf an Carbonfasern und damit an Bauteilen aus CFK wird bis zum Jahr 2020 mit deutlichen Zuwachsraten prognostiziert. Für das Jahr 2020 wird von einem Bedarf an Carbonfasern von etwa 130.000 Tonnen und etwa 208.000 Tonnen an CFK ausgegangen [5].

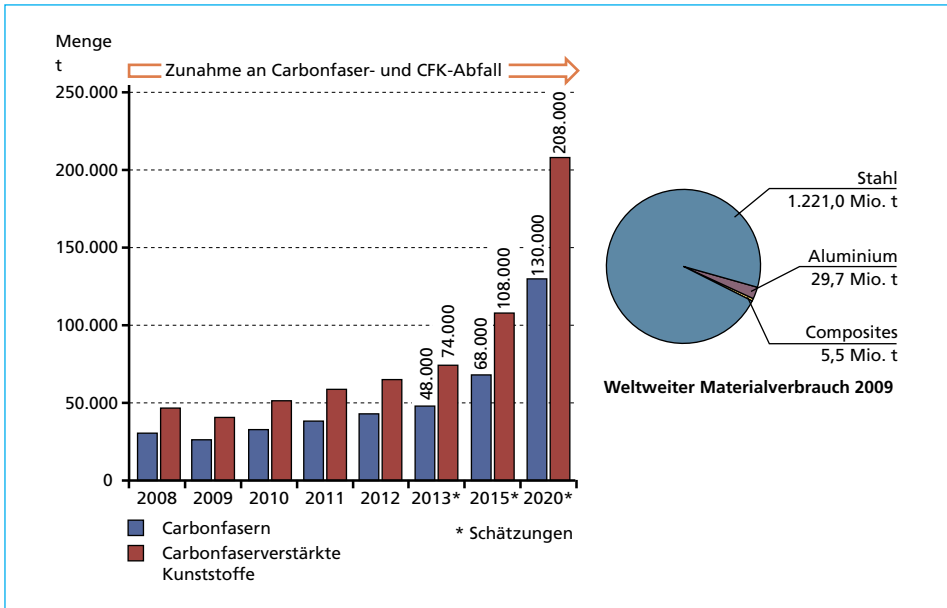


Bild 1: Globaler Bedarf an Carbonfasern und CFK

Quelle: AVK-TV (Bild links) Handelsblatt (Bild rechts)

3. Matrix

In einem Verbund hat die Matrix die Aufgabe, die Fasern in einer festen geometrischen Form zu halten, Kräfte in die Fasern zu übertragen und die Faser vor Umwelteinflüssen zu schützen. Die mechanischen Eigenschaften der Matrixsysteme sind deutlich geringer als die der Fasern. Als Matrixwerkstoffe können Thermoplaste, wie beispielsweise PA, PP, PEEK oder PES, oder Duromere, wie beispielsweise Epoxid- oder Phenolharze eingesetzt werden. Beide Materialgruppen unterscheiden sich deutlich in ihrer chemischen Struktur und in ihren Verarbeitungseigenschaften. In Thermoplasten liegen die Polymere als lineare Makromoleküle vor, die unter Wärmezufuhr schmelzen und mehrfach ur- und umgeformt werden können. Thermoplaste sind in geeigneten Lösungsmitteln löslich. Duromere dagegen härten durch eine chemische Vernetzungsreaktion aus, wodurch ein dreidimensionales Netzwerk entsteht. Nach der Aushärtung sind Um- oder Urformvorgänge nicht mehr möglich. In Verbunden mit Carbonfasern werden fast überwiegend duromere Matrixsysteme verwendet. Die Anwendung von thermoplastischen Matrices ist aber weiter zunehmend, da man sich eine kosten- und zeiteffizientere Verarbeitung verspricht [5].

4. Materialverbund CFK

Die Fertigung von CFK-Bauteilen kann durch verschiedene Verfahren erfolgen. Bei allen Verfahren wird die Carbonfaser in eine Matrix aus Kunststoffen eingebettet. Die Verfahren unterscheiden sich in der Art der Zugabe der Matrix.

Am bedeutendsten ist die Verarbeitung von Prepregs. Prepregs sind flächige Carbonfasertextilien, die mit einer definierten Menge an Matrix vorimprägniert sind. Der Start der chemischen Vernetzungsreaktion der Matrix wird durch das Einfrieren des Prepregs verhindert. Vor der eigentlichen Verarbeitung im Autoklaven werden die Prepregs unter definierten Bedingungen aufgetaut und in das einseitige Werkzeug entsprechend dem Laminatplan appliziert. Dem entgegen werden bei den Liquid Composite Moulding-Verfahren, wie dem Resin Transfer Moulding oder der Vakuuminfusion, trockene Carbonfaserzuschnitte in eine Form platziert und anschließend das flüssige Duromer, bestehend aus einem Harz-Härter-Gemisch, infiltriert.

Um optimale Eigenschaften zu erreichen ist eine gute Kraftübertragung zwischen Fasern und Matrix nötig. Daher wird angestrebt, jede Einzelfaser mit Matrix zu benetzen und somit eine möglichst feste Haftung zwischen Fasern und Matrix zu erreichen. Unterstützt wird dies durch eine gezielte Oberflächenmodifizierung der Fasern durch Präparation und Schlichte. Aufgrund dieser Haftungsbedingungen ist CFK somit kein optimaler Recyclingwerkstoff.

Die Eigenschaften eines Faserverbundes hängen entscheidend von der Faserlänge ab, da die Fasern nahezu alle auf den Verbund lastenden Kräfte aufnehmen. Je größer die Faserlänge ist, desto besser sind bis zum Erreichen der kritischen Faserlänge die Eigenschaften des Verbundes. Für ein hochwertiges Recyclingprodukt müssen Recyclingprozesse demnach so gestaltet sein, dass die Verkürzung der Faserlänge möglichst gering ist. Es findet jedoch immer ein Downcycling statt.

5. Recycling von Carbonfasern und CFK

Das Recycling von Carbonfasern und daraus gefertigten CFK-Bauteilen wird im Wesentlichen durch die drei Faktoren Ökologie, Ökonomie und rechtliche Bestimmungen beeinflusst. Ökologisch betrachtet bietet sich durch das Recycling die Möglichkeit den hochwertigen aber sehr energieintensiven Rohstoff Carbonfaser wiederzuverwenden und somit den hohen Herstellungsaufwand zu rechtfertigen. Dies trifft auch auf die Fertigung von CFK-Bauteilen zu, dessen Gesamtenergiebilanz durch den Einsatz von recycelten Carbonfasern verbessert werden kann. Wie bei den meisten Recyclingmethoden kann auch beim Recycling von Carbonfasern eine Ressourcenschonung bei gleichzeitiger Abfallverringerung und damit einer Entlastung der Umwelt erreicht werden.

Der Austausch der teuren Carbonneufasern gegen die günstigeren recycelten Carbonfasern wird als ein wesentlicher Punkt aus ökonomischer Sicht angesehen. Allerdings können nur geringe Mengen an Recyclat einem Produkt zugefügt werden, da die mechanischen Eigenschaften der recycelten Carbonfasern nicht den Eigenschaften der Neufasern entsprechen. Beim Einsatz von Recycling-Carbonfasern wird weiterhin von einer Reduktion der Entsorgungskosten ausgegangen und es besteht die Möglichkeit der Bildung eines neuen Marktes durch den Verkauf von recycelten Carbonfasern.

Das Recycling von Carbonfasern wird weiterhin durch rechtliche Vorgaben beeinflusst. Die Deponierung wird durch das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz sowie die Deponieverordnung und europäische Vorgaben reglementiert und ist vor allem für

CFK keine Alternative. Des Weiteren schreiben anwendungsbezogene Regelungen wie die Altautoverordnung genaue Recyclingquoten für die eingesetzten Materialien vor [6, 7]. Durch diese gesetzlichen Vorgaben werden alternative Entsorgungswege für Carbonfaserverstärkte Kunststoffe notwendig.

Über den Produktentstehungs- und -lebenszyklus betrachtet fallen besonders während der Bauteilherstellung und im Produktbetrieb bis zum Produktende verwertbare Abfälle an. Dabei kann der Abfall in drei Gruppen unterteilt werden. Am Anfang können während der Produktion fehlerhafte Carbonfasern oder textile Halbzeuge entstehen. Diese sind noch nicht mit einer Matrix benetzt und werden deshalb als trockener Abfall bezeichnet. Ebenfalls zum trockenen Abfall gehören nicht genutzte Reste, die beim Zuschnitt der einzelnen Faserlagen entstehen. Als zweite Gruppe entstehen mit Matrix benetzte aber noch nicht ausgehärtete Carbonfaserhalbzeuge. Dies sind fast ausschließlich Prepregs, die entweder fehlerhaft produziert wurden oder wie beim trockenen Abfall beim Zuschnitt der einzelnen Laminatlagen entstehen. Die dritte und größte Gruppe an Abfall sind ausgehärtete CFK. Dabei sind Ausschussbauteile und notwendige Randbesäumung vergleichsweise gering gegenüber nicht mehr einsatzfähigen CFK-Bauteilen aus der Produktanwendung.

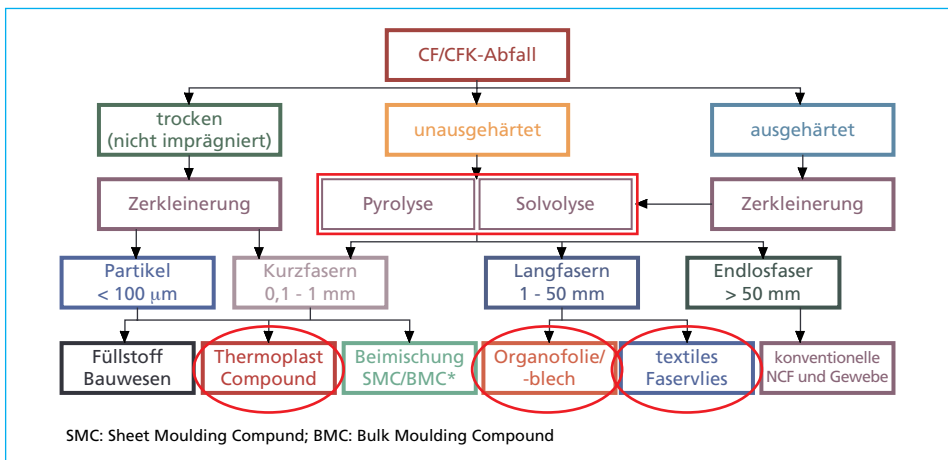


Bild 2: Verwertungswege von Carbonfaser/CFK-Abfall

Die trockenen Carbonfaserreste lassen sich vergleichsweise einfach recyceln. Sie werden gemahlen oder geschnitten als Verstärkungsfasern oder Füllstoffe in Spritzgussgranulaten, Pressmassen sowie in Bauprodukten eingesetzt. Für den Bereich des Faserrecyclings ohne Harzreste wurden bereits vor einigen Jahren kommerzielle Recyclingverfahren entwickelt. Ein Recyclingverfahren (Hadeg Recycling, Stade) mahlt die Endlosfasern je nach Anwendung des Endverbrauchers auf eine mittlere Länge von 0,2 bis 0,5 mm. Diese Kurzfasern werden heute meist thermoplastischen Kunststoffen als Verstärkungsmaterial beigemischt. Problematisch ist bei diesem Verfahren die Mahlung auf eine größere Faserlänge, da die Fasern in einem vorgeschalteten Schredder sehr stark beansprucht werden, so dass z.T. die Schlichte abplatzt und sich Fasern verknoten können, die länger als 1 mm sind.

Für das Recycling von benetzten Carbonfasern die sowohl unausgehärtet als auch als fertiges CFK-Bauteil vorliegen, sind derzeit besonders zwei Verfahren von Interesse. Beide Verfahren zählen zu den thermisch-chemischen Aufbereitungsmöglichkeiten und ermöglichen die Trennung der Carbonfaser von der Matrix. Bei der Pyrolyse nutzt man die deutlich unterschiedlichen Zersetzungstemperaturen von Carbonfasern (3.600 °C) und der sie umgebenden Matrices (i.A. < 600 °C), um eine Trennung auf thermischem Weg durchzuführen. Hierbei ist zu beachten, dass Carbonfasern ab einer Temperatur von 600 °C eine hohe Oxidationsneigung haben, die sich extrem negativ auf ihre mechanischen Eigenschaften auswirkt. Nur unter Inertgasatmosphäre können Carbonfasern ohne deutlichen Gewichts- und Qualitätsverlust höheren Temperaturen widerstehen. Bei allen thermischen Aufbereitungsprozessen wird der Kunststoff zersetzt und nur die Carbonfasern zurück gewonnen [8].

Bei der Solvolyse werden superkritische Flüssigkeiten (z.B. superkritisches Propanol) zur Trennung von Faser und Matrix eingesetzt [9]. Hierzu bringt man zerkleinerte Faserverbundabfälle bei erhöhtem Druck und Temperatur mit Propanol in einen Reaktor ein. Im superkritischen Zustand ist das Propanol in der Lage die Matrix fast vollständig von der Faser zu lösen. Die im Propanol gelösten Matrixbestandteile können als Rohstoff in der chemischen Industrie weiterverarbeitet werden. Das Lösungsmittel muss hierbei auf die Matrix abgestimmt werden. Im Vergleich zur Pyrolyse hat die Solvolyse ein geringeres Energieniveau, erfordert aber weitere Aufbereitungsschritte (Reinigen, Waschen, Trocknen, Lösungsmittelaufbereitung) und ist nicht auf jedes Matrixsystem anwendbar.

Die aus der Pyrolyse und Solvolyse gewonnenen Carbonfasern sind nach weiterer Zerkleinerung beispielsweise als Verstärkungskomponente von thermoplastischen Polymeren geeignet. Durch die Herstellung eines spritzgießfähigen Compounds mit recycelten Carbonkurzfasern erfolgt die Rückführung in neue Kunststoffprodukte. Eine Alternative dazu ist die Herstellung von flächigen textilen Halbzeugen aus recycelten Carbonlangfasern. Besonders erfolgversprechend ist hierbei die Herstellung von Vliesen aus recycelten Carbonfasern. Diese Carbonfaservliese weisen zwar keine vergleichbaren mechanischen Eigenschaften im Verbund auf wie neue Wirrfasermatten, trotzdem können sie zur Verbesserung der Oberflächenqualität in gewebeverstärkten CFK-Bauteilen oder für Verkleidungselemente eingesetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit der Anwendung von recycelten Carbonlangfasern ist die Organofolie. Dabei werden vor allem aus trockenem Faserverschnitt einzelne Faserabschnitte gerichtet auf eine PET-Folie aufgebracht, anschließend konsolidiert und so zu einem thermoplastischen Halbzeug verarbeitet. Im Prozess werden die Carbonfasern/Gewebereste zunächst durch eine Schnittwalze oder einen herkömmlichen CNC-Cutter auf eine für die Folgeprozesse geeignete Größe zugeschnitten. Kleinere Abschnitte fallen durch ein Sieb und können anderen Anwendungen zugeführt werden. Durch Vibrationstechnik werden die trockenen Gewebe- und Gelegezuschnitte zu einzelnen Rovings aufgelöst. Die Fasern werden durch die Vibration einheitlich ausgerichtet und einer extrudierten, noch nicht erstarrten Polymerfolie zugeführt. Die Folie wird unmittelbar nach der Düse mit den einheitlich ausgerichteten Langfasern belegt und

durchläuft zur vollständigen Imprägnierung z.B. eine Doppelbandpresse oder einen Kalander. Die so entstandene Organofolie kann beispielsweise im Thermoformprozess zu neuen Bauteilstrukturen verarbeitet werden. So konnte als Technologiedemonstrator ein PKW-Kotflügel realisiert werden.

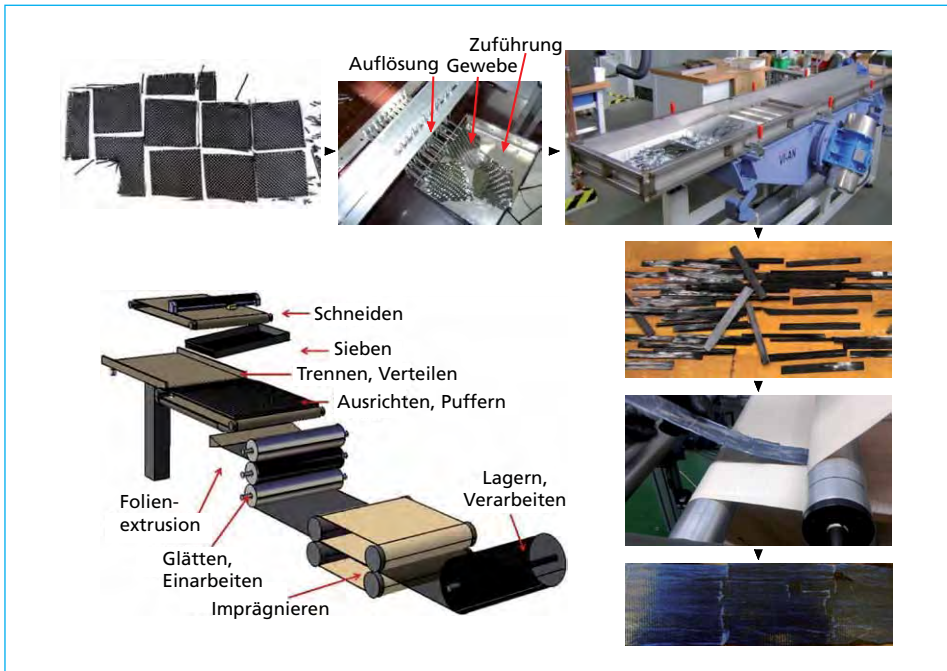


Bild 3: Recyclingkonzept: Organofolie aus Gewebeverschnitt

Des Weiteren können ausgehärtete Prepregs, Ausschussteile und Post-Consumer-Abfälle einem reinen Partikelrecycling unterzogen werden. Hierbei wird der Verbund zerkleinert und neuen duromeren Faserverbundmaterialien wie Sheet Moulding Compounds (SMC) oder Bulk Moulding Compounds (BMC) als Füllstoff aus Carbonfaser und Matrix zugesetzt. Gleiches ist auch für Baustoffe beispielsweise Beton vorstellbar. Das Partikelrecycling stellt die einfachste Methode zum Recyclen von ausgehärteten Verbunden dar und ist für große Mengen geeignet. Jedoch wird es dem hochwertigen Ausgangsmaterial Carbonfaser durch das starke Downcycling nicht gerecht und sollte deshalb einer genauen wirtschaftlichen Betrachtung vor der Anwendung unterzogen werden.

Für den derzeit noch geringen Anteil an thermoplastischen CFK besteht die Möglichkeit das Material zu granulieren, erneut einzuschmelzen und zu einem neuen Bauteil zu verarbeiten. Es muss jedoch beachtet werden, dass durch die hohe Scherbeanspruchung im Extrusions- und Spritzgussprozess die Fasern stark eingekürzt werden und dass viele Thermoplaste nicht miteinander mischbar sind. Eine sortenreine Trennung nach Matrixmaterialien ist hier notwendig. Hinzu kommt, dass Kunststoffe altern und sich hierdurch ihre Eigenschaften (z.B. Schlagzähigkeit) verschlechtern können.

6. Fazit

Bei Bauteilen aus CFK handelt es sich um hochwertige, langlebige Komponenten mit einer Lebenserwartung von mindestens 10 bis 30 Jahren. Da es erst in dieser Zeitspanne zu einem verstärkten Einsatz von CFK in Bauteilen kommen wird, ist in den nächsten Jahren mit einer stark steigenden Menge an zu recycelnden Carbonfasern zu rechnen, die die Kapazität der bestehenden Anlagen überschreitet.

Aufgrund der in den nächsten Jahren zu erwartenden CFK-Abfallmengen, den gesetzlichen Regelung zur Deponierung und den hohen Herstellungskosten ist das Recycling von CFK sinnvoll und nötig. Bei den bestehenden Verfahren scheinen die Solvolyse und die Pyrolyse die erfolgversprechendsten Verfahren zu sein. Es ist aber weiter von einem Downcycling der wiederaufbereiteten Carbonfasern auszugehen. Die Hauptanwendungen werden vor allem bei thermoplastischen Halbzeugen wie Organofolien oder -blechen und der Herstellung von Faservliesen mit Wirrfaserverstärkung gesehen. Damit ein erfolgreicher Wiedereinsatz in CFK-Bauteilen wirtschaftlich möglich ist, müssen die Recyclingprozesse optimiert werden und Anwendungen mit einem Alleinstellungsmerkmal für recycelte Carbonfasern gefunden werden.

7. Literatur

- [1] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Edition: 2, Springer, 2008
- [2] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices. Springer, 1995
- [3] Schmitz N., Hailer T.: Marktanalyse und Entwicklung eines Geschäftsmodells für CFK Recycling. In: Studie in Auftrag des CFK-Valley Stade e.V., 2007
- [4] Composite Materials Price Trends, Forecast, and Analysis. In: Research and Markets, Lucintel (formerly E-Composites). Juli, 2007
- [5] Composites-Marktbericht 2013 Marktentwicklungen. In: AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., 2013
- [6] Directive 2006/12/EC on Waste. In: Official Journal of the European Commission, L114:0009-0021. 2006
- [7] Directive 2000/53/EC of the European Parliament of the Council of 18 September 2000 on end-of-life vehicles. In: Official Journal of the European Commission, L269:0034-0043. 2000
- [8] Meyer, L.O.: Untersuchungen zur Pyrolyse – eine Methode zur Rückgewinnung von Kohlenstofffasern aus CFK-Fertigungsabfällen. In: Dissertation an der TUHH, 2011
- [9] Hyde, J. R.; Lester, E.; Kingman S.; Pickering, S.; Wong, K. H.: Supercritical propanol, a possible route to composite carbon fibre recovery: A viability study. In: Composites Part A, Vol. 37, 2006, S. 2171-2175

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Recycling und Rohstoffe – Band 7

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014

ISBN 978-3-944310-09-1

ISBN 978-3-944310-09-1 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2014

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Ginette Teske, Fabian Thiel, Janin Burbott, Cordula Müller,

Katrin Krüger

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.