

Recycling kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK)

Sonja Niemeyer und Gerhard Ziegmann

1.	Einleitung.....	885
2.	Kohlenstofffasern	885
3.	Matrix	887
4.	Verbund.....	887
5.	Recycling.....	887
6.	Resümee	890
7.	Ausblick	890
8.	Literatur.....	891

Es wird der heutige Stand des Recyclings von Kohlenstofffasern aus Kunststoffaserverbunden und der aktuelle Kohlenstofffasermarkt dargestellt. Neben den Verfahren zur Wiedergewinnung der Kohlenstofffasern wird auf die Eigenschaftsveränderung durch den Recyclingprozess eingegangen.

1. Einleitung

Überall dort, wo Massen bewegt werden, ist Leichtbau eine effiziente Methode, um Energie und somit Kosten einzusparen. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) besitzen ein hohes Leichtbaupotenzial und finden deshalb zunehmend Einsatz in der gesamten Verkehrstechnik, besonders der Luft- und Raumfahrttechnik, der Windenergiegewinnung, auf den Gebieten des Maschinenbaus, im Sportbereich aber auch in der Medizintechnik [1]. Auch wenn Faserverbunde durch den Materialmix und die feste Anbindung zwischen Fasern und Kunststoffen an sich kein recyclinggerechtes Material darstellen, sind Recyclingprozesse möglich und aufgrund des Preises von Carbonfasern auch wirtschaftlich sinnvoll.

2. Kohlenstofffasern

Kohlenstofffasern, auch Carbonfasern (C-Fasern) genannt, gehören zu den synthetischen Fasern. Sie werden üblicherweise als Endlosfasern auf der 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 %ig kristallinen Struktur mit sehr hoher Orientierung in Faserlängsrichtung führt (z.B. HT-, IM-Kohlenstofffaser).

Je nach gewünschter Qualität kann die Faser in einem weiteren Schritt bei bis zu 3.000 °C graphitiert werden (HM, UHM-Kohlenstofffaser). Durch unterschiedliche Precursorfasern und verschiedene Temperaturen in der Karbonisierung und Graphitisierung ergibt sich eine ganze Familie von Kohlenstofffasern.

Direkt nach Herstellung besteht die Faseroberfläche aus C-, N- und H-Atomen. Polare Gruppen finden sich kaum auf der Oberfläche. Da diese für eine gute Faser-Matrixhaftung im Verbund nötig sind, erfolgt nach der eigentlichen Faserherstellung die Präparation, eine Oxidationsbehandlung um sauerstoffhaltige Gruppen auf Oberfläche zu erzeugen, und der Schlichteauftrag auf die Oberfläche der Faser. Die Schlichte, meist auf Epoxidharzbasis, erfüllt zusätzlich eine wichtige Schutzfunktion bei der Weiterverarbeitung und Handhabung der Fasern. Durch sie hält der Rovingverbund zusammen, die Fasern werden glatter. Ohne Schlichte würde sich der Roving bei der Weiterverarbeitung aufplustern und verknoten.

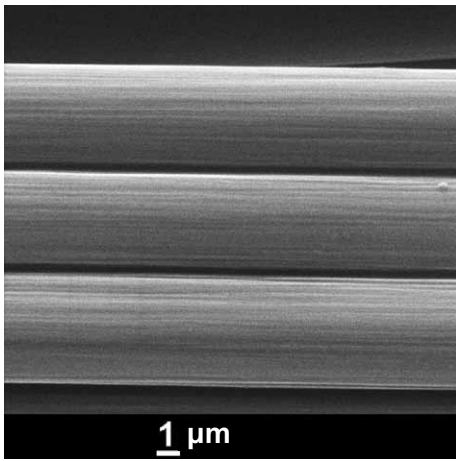


Bild 1: Typische Kohlenstofffaser, Durchmesser 7 µm

Zusätzlich schützt die Schlichte die Faser vor der Ablagerung von Wassermolekülen auf der Oberfläche. Hierdurch würde sich, durch Reduzierung der polaren Gruppen auf der Oberfläche die Faser-Matrix-Haftung im späteren Verbund verschlechtern. Die Kohlenstofffaser hat eine glatte Oberfläche (Bild 1). Die durch den Fertigungsprozess des Precursors bedingten Längsrillen tragen kaum zur Faser-Matrix-Haftung bei.

Die Fasern haben einen Durchmesser von nur 5 bis 10 µm und werden zu Rovings mit mehreren tausend Einzelfasern zusammengefasst, die zu Geweben oder anderen flächigen Halbzeugen weiterverarbeitet werden können. 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 hervorragend für den Leichtbaubereich. 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 oben beschriebene Prozess zur Herstellung von Kohlenstofffasern ist äußerst energieintensiv, hat hohe Investitionskosten für die Anlagen und stellt hohe Anforderungen an die Prozessführung wie auch die Qualität der Precursor. Dies schlägt sich auch in dem hohen Preis von etwa 19 EUR/kg nieder. Wird die Faser zu Geweben weiterverarbeitet, steigt der Preis nochmals um ein vielfaches. Aufgrund steigender Rohstoff- und Energiepreise ist nicht davon auszugehen, dass der Preis für Kohlenstofffasern in absehbarer Zeit sinkt, vielmehr sind Preissteigerungen wahrscheinlich. Aufgrund des hohen Preises konnten sich CFKs noch nicht in den Massenmärkte etablieren, sind aber auf dem Vormarsch [3, 6].

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 stiegen von 33.500 Tonnen im Jahr 2003 auf 49.650 Tonnen im Jahr 2009 [3]. Damit hat der Markt ein Wachstum von etwa zehn Prozent pro Jahr. Andere Studien gehen von einer Kapazität von 73.600 Tonnen [5] bzw. 92.700 Tonnen [8] im Jahr 2010 aus. Mit den bestehenden Kapazitäten kann trotz der deutlichen Steigerung der Produktionsmengen der letzten Jahre die Nachfrage nach Kohlenstofffasern nicht ausreichend bedient werden.

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 werden Thermoplaste, wie z.B. PA, PP, PEEK oder PES, und Duromere, wie z.B. Epoxid- oder Phenolharze eingesetzt. 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. Weiterhin sind Duromere nicht in Lösungsmitteln löslich. In Verbunden mit Kohlenstofffasern werden fast ausschließlich (> 90 %) duromere Matrixsysteme verwendet [5].

4. Verbund

Bei der Fertigung von CFK-Bauteilen werden verschiedene Verfahren eingesetzt. Allen ist gemeinsam, dass die Fasern in eine Matrix aus Kunststoffen eingebettet werden. Zur Herstellung von Bauteilen werden die Reaktionspartner des Duromers, Harz und Härter, gemischt und mit Fasern in eine Bauteilform eingebracht. Bei den Harzinfusionsverfahren werden trockene Fasern in eine Form platziert und das Duromer erst nach dem Schließen der Form 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 i.d.R. 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

Bis vor wenigen Jahren wurden Kohlenstofffaserabfälle fast ausschließlich deponiert. Nach der Verabschiedung verschiedener Abfallrichtlinien und EU-Vorgaben ist dies jedoch heute nicht mehr möglich, da Verbunde den für die Deponierung zulässigen Gehalt an organischen Materialien überschreiten [9, 10]. Ohne vorherige (teure) thermische Behandlung ist somit das Deponieren nicht mehr möglich. Weitere Impulse zum Aufbau von Recyclingkonzepten gibt die Altautoverordnung. Durch diese gesetzlichen Vorgaben werden alternative Entsorgungswege für Faserverbunde nötig und auch finanzierbar.

Fasern fallen nicht nur als Ausschussteile und Post-Consumer-Abfälle an, sondern treten z.B. auch beim Zuschnitt in verschiedenen Herstellungsverfahren für Faserverbunde, Restspulen, Anlauf und Verschnitt bei der Gewebeerstellung und Fehlproduktionen auf. Es gibt somit zwei grundsätzlich unterschiedliche Typen von zu recycelnden Fasern; die trockenen Fasern, die zuvor nicht mit einem Matrixmaterial in Kontakt gekommen sind und Fasern aus Verbunden.

Die trockenen Faserreste lassen sich vergleichsweise einfach recyceln. Sie werden gemahlen oder geschnitten als Verstärkungsfasern in Spritzgussgranulaten oder Pressmassen eingesetzt. Diese quasi neuen Fasern haben einen überraschend hohen Anteil an den Abfall-Fasern, da allein bei allen Harzinfusionsverfahren je nach Quelle etwa zwanzig Prozent des Fasermaterials als Verschnitt anfallen. 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 1mm sind.

Zur Herstellung langfaserverstärkter Kunststoffe wird in der Regel Neuware eingesetzt. Bei der Verarbeitung dieser Fasern in Extrudern und Spritzgussmaschinen zu langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) werden die Fasern von Rovingspulen zunächst abgewickelt, geschnitten und dem Extruder zugeführt. Durch Compoundieren von Polymer und Fasern, Austragen über eine Düse, Schneiden und Abkühlen des Granulats entsteht in einem ersten Schritt ein Langfasergranulat, welches zur Weiterverarbeitung beispielsweise einer Spritzgussmaschine zugeführt wird. In einem Verfahren zur Rezyklierung (zum Recycling) von Faserabfällen werden Halbzeugreste durch zwei Messer auf Längen zwischen 30 mm und 70 mm geschnitten und anschließend in einer modifizierten Mühle zu Rovings und Filamenten aufgelöst. Anschließend werden die Langfasern zusammen mit einer Thermoplastmatrix in einem sogenannten Pull-Drill-Verfahren zu Langfasergranulaten verarbeitet, die für das Spritzgussverfahren eingesetzt werden [7] können.

Der größte Teil der Kohlenstofffasern wird zu Prepregs (flächiges Halbzeug aus mit Matrix vorimprägnierten Kohlenstofffasern) weiterverarbeitet. Fehlproduktionen, überlagerte Prepregrollen und Verschnittreste die hier anfallen, sind bereits mit Harz kontaminiert. Da das Harz noch nicht ausgehärtet ist, kann es durch Lösungsmittel von den Fasern gewaschen werden. Da dies jedoch eine aufwendige Lösungsmittelaufbereitung nach sich zieht, werden unausgehärtete Prepregs in verschiedenen Projekten zu nicht kritischen Bauteilen, z.B. Fertigungshilfsmitteln für die Luftfahrtindustrie weiterverarbeitet [8, 11].

Für den geringen Anteil an thermoplastischen Verbunden (>10 %) 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. Das zumischen alten Matrixmaterials kann sich somit negativ auf den neuen Verbund auswirken.

Für ausgehärtete Prepregs, Ausschussteile und Post-Consumer-Abfälle kann das Partikelrecycling eingesetzt werden. Hierbei wird der Verbund geschreddert und neuen Composite (SMC, BMC) als Füllstoff aus Faser und Matrix zugesetzt. Das Partikelrecycling stellt die einfachste Methode zum Recyceln von ausgehärteten Verbunden dar. Durch das starke Downcycling, schwankende Eigenschaften abhängig vom Matrixmaterial und das nur sehr eingeschränkte Anwendungsfeld ist die Nachfrage gering und das Verfahren ist daher nicht zur Aufbereitung der in den nächsten Jahren anfallenden Abfallmengen geeignet.

Zur Wiederverwendung der Kohlenstofffasern in hochwertigen Bauteilen müssen diese zunächst von der Matrix getrennt werden. Hierzu gibt es prinzipiell verschiedene Ansätze. In Allred [13] werden Faser und Matrix durch Katalyse getrennt. Ebenso möglich ist das

Abtrennen der Matrix durch Hydrolyse. Beide Verfahren haben sich jedoch in der Praxis bisher nicht durchgesetzt. Auf dem Markt oder in größeren Versuchsanlagen konnten sich lediglich die Auftrennung durch Solvolyse in superkritischen Fluiden und die thermisch Aufbereitung/Pyrolyse durchsetzen.

So wurden an der Universität Nottingham erfolgreich superkritische Flüssigkeiten (z.B. superkritisches Propanol) zur Trennung von Faser und Matrix eingesetzt [15]. Hierzu werden zerkleinerte Faserverbundabfälle bei erhöhtem Druck und Temperatur mit Propanol in einen Reaktor eingebracht. 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 chemische 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 deutlich unterschiedlichen Zersetzungstemperaturen von Kohlenstofffasern (3.600 °C) und der sie umgebenden Matrices (i.A. < 600 °C) erlauben eine Trennung auf thermischem Weg. Hierbei ist zu beachten, dass Kohlenstofffasern ab einer Temperatur von 600 °C eine hohe Oxidationsneigung haben, die sich extrem negativ auf ihre mechanischen Eigenschaften auswirkt. Nur unter Inertgasatmosphäre können Kohlenstofffasern ohne deutlichen Gewichts- und Qualitätsverlust höheren Temperaturen ausgesetzt werden. Bei allen thermischen Aufbereitungsprozessen wird der Kunststoff zersetzt und nur die Kohlenstofffasern zurück gewonnen.

In Pickering [14] wird die thermische Aufbereitung in einem Fließbett mit Quarzsand zur abrasiven Unterstützung beim Recycling von Glas- und Kohlenstofffasern vorgestellt. Dieses Verfahren reagiert äußerst tolerant auf verschiedene Matrices oder andere Fremdstoffe wie Schaumkerne, Waben oder Metallinserts. Bei Temperaturen um 550 °C wird die Matrix thermisch zersetzt. Trotz der sauerstoffhaltigen Atmosphäre wird die Zugfestigkeit um lediglich zwanzig Prozent im Vergleich zu Neufasern verringert.

Um Oxidation zu vermeiden werden, Faser und Matrix häufig durch Pyrolyse (unter Sauerstoffausschluss) getrennt. Üblicherweise geschieht dies in einer Gasatmosphäre.

Es gibt jedoch auch Untersuchungen zur Depolymerisation der Matrix im Metallbad [4] und in Salzschmelzen. Abhängig von Art und Temperatur kann sich der Pyrolyse-Prozess negativ auf die Eigenschaften der Kohlenstofffasern auswirken. In Meyer [11] und BMBF [12] wurden hierzu umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Diese zeigen, dass sich die Zugfestigkeit der Faser bis zu einer Pyrolysetemperatur von etwa 700 °C kaum verringern. Bei dieser Temperatur kann jedoch störender Pyrolysekoks auf der Faseroberfläche zurückbleiben. Bei höheren Temperaturen erfolgt eine deutliche Versprödung der Faser. Bei den beschriebenen Verfahren wird neben der Matrix auch die Schlichte von der Faseroberfläche entfernt. Hierdurch halten die Einzelfilamente der Rovings nicht mehr zusammen. Zur bessern Handhabung wird daher eine Ersatzschlichte/Binder auf die Fasern aufgetragen.

Die aus der Solvolyse und Pyrolyse gewonnenen Fasern werden zerkleinert und zu rieselfähigen Flakes gebunden den thermoplastischen Matrices für den Spritzguss zugesetzt oder zu Pressmassen und Vliesen weiterverarbeitet. Mit keinem z.Z. auf dem Markt vorhandenen Verfahren ist es möglich recycelte Lang- oder Endlosfasern gerichtet in neue hochwertige Produkte einzubringen. Bei allen Verfahren findet ein deutliches Downcycling statt.

Nach einer Studie aus dem Jahr 2007 werden nur von gut der Hälfte der kohlenstofffaserverarbeitenden Firmen Faserabfälle recycelt. Ein Großteil der Fasern wird im Restmüll entsorgt [3]. Zur Entsorgung von Altteilen konnten keine Angaben gemacht werden, da bei den meisten Firmen (noch) keine Altteile vorlagen. Hier besteht also noch Optimierungsbedarf.

Bei Bauteilen aus CFK handelt es sich i.d.R. um hochwertige, langlebige Komponenten mit einer Lebenserwartung von mindestens zehn bis dreißig Jahren. Da es erst in dieser der Zeitspanne zu einem verstärkten Einsatz von CFK in Bauteilen kam, ist in den nächsten Jahren mit einer stark steigenden Menge an zu recycelnden Fasern zu rechnen, die die Kapazität der bestehenden Anlagen überschreitet.

6. Resümee

Aufgrund der in den nächsten Jahren zu erwartenden CFK-Abfallmengen, den gesetzlichen Regelung zur Deponierung und dem 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. Bisher ist jedoch kein Verfahren umgesetzt, bei dem kein deutliches Downcycling stattfindet.

7. Ausblick

In einem aktuellen Forschungsvorhaben des Instituts für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik der Technischen Universität Clausthal (PuK), des Faserinstituts Bremen e.V. und des Laserzentrums Hannover (LZH) sollen Faserabfälle mit einer Mindestlänge von 50 mm gerichtet in thermoplastische Kunststofffolien eingebracht werden (Bild 2). Zur Erreichung dieses Ziels werden die Fasern/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. Das entstandene Produkt trägt den Namen Organofolie.

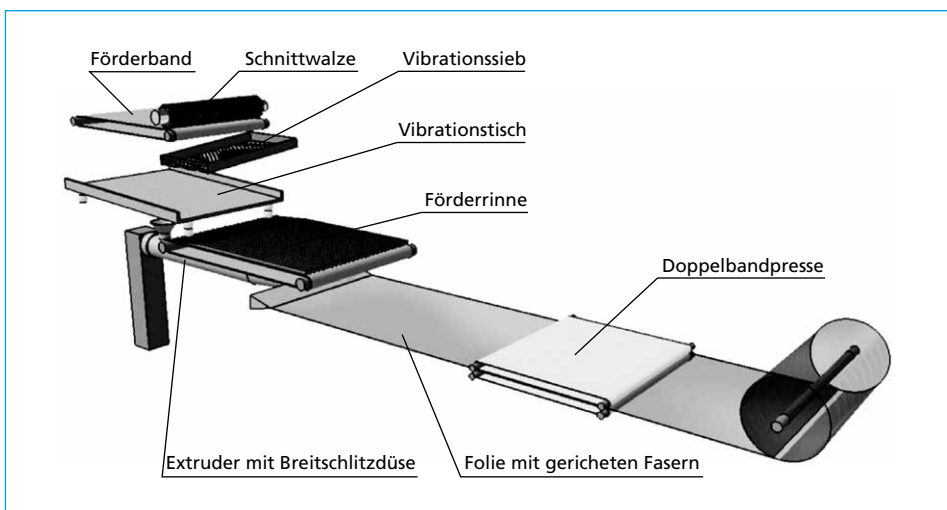


Bild 2: Schematische Darstellung einer möglichen Prozesskette

In einem ersten Projekt (15692N, AiF/BMWi) wurde der Prozess entwickelt und die Durchführbarkeit für trockene Abfallfasern aus Harzinfusionsprozessen gezeigt. Zurzeit wird in einem Folgeprojekt (17063N, AiF/BMWi) untersucht, wie der Prozess auf den Einsatz von pyrolysierten Fasern übertragen werden kann.

Zur Herstellung von Bauteilen können aus den unidirektional gerichteten faserverstärkten Folien Lamine nach vorher berechnetem Lagenaufbau gelegt und konsolidiert werden. Anschließend können die Organofolien durch einen Umformprozess (Tiefziehen und/oder Pressen) zu Bauteilen mit definierten Faserlängen und Vorzugsorientierungen umgeformt werden. Es entsteht ein sehr hochwertiges Produkt, bei dem die Fasern im Vergleich zur Neuware quasi unverändert vorliegen. Die Organofolie weist viele Vorteile gegenüber dem anderen Recyclingverfahren auf:

- deutlich höhere Faserlängen durch schonenderen Aufbereitungsprozess im Vergleich zu anderen Recyclingprozesse erreichbar,
- Belastungsoptimierte Bauteile durch Faserorientierung,
- hohes CO₂-Einsparpotenzial durch Leichtbau,
- Einsparung von Ressourcen durch Verwendung von Recyclingfasern.

8. 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. Studie in Auftrag des CFK-Valley Stade e.V., 2007
- [4] Tötze, M.: Untersuchung zum Recycling von kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) durch Depolymerisation im Metallbad. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Dissertation, 2005
- [5] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.. Composites-Marktbericht 2011 Marktentwicklungen
- [6] Composite Materials Price Trends, Forecast, and Anaysis: Research and Markets, Lucintel (formerly E-Composites), July 2007
- [7] Ortlepp, G.: Long carbon fibers from textile wastes. In: Chemical Fibers International (2006), Nr. 12, S. 363-365
- [8] Schult, K.; Rettig, K.: Wohin geht es mit den Faserkapazitäten, Produkten und Entwicklungstrends? In: Lightweigt (2010), Nr. 1, S. 20-25
- [9] Directive 2006/12/EC on Waste, Official Journal of the Eurpean Commision 2006, L114:0009-0021
- [10] Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Concil of 18 September 2000 on end-of life vihivles, Official Journal of the Eurpean Commision 2000, L269:0034-0043
- [11] Meyer, L. O.: Untersuchungen zur Pyrolyse – eine Methode zur Rückgewinnung von Kohlenstofffasern aus CFK-Fertigungsabfällen. Dissertation an der TUHH, 2011
- [12] BMBF: Verbesserung von Verfahren zum werkstofflichen Recycling von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen. Abschlussbericht, Förderkennzeichen 01RC0064-74, 2007
- [13] Allred, R. E.: Recycling process of Scarp Composite Prepregs. In: SAMPE Journal (1996), Vol. 32, S. 46-51

- [14] Pickering, S. J.: Recycling technologies for thermoset composite materials – current status. In: Composites: Part A (2006), Vol. 37, pp. 1206-1215
- [15] 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 (2006), Vol. 37, pp. 2171-2175

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Recycling und Rohstoffe – Band 5

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012

ISBN 978-3-935317-81-8

ISBN 978-3-935317-81-8 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 2012

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: Janin Burbott, Petra Dittmann, Sandra Peters,

Martina Ringgenberg, Ginette Teske

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.