



Ganzheitliche Recycling-Prozesskette für Carbonfaser-gewebe und Gelege

Einen Ansatz, unterschiedliche carbonfaserhaltige Abfallströme effizient zu verwerten, stellt die Ablage von kleinen, flächigen Halbzeugstücken (Patches) zu neuen Bauteilen dar. Die Herstellung solcher Bauteile bedingt genaue Kenntnisse über die durchgeführte Faser-Matrix-Separation, Oberflächenbehandlungen der zurückgewonnenen Patches sowie speziell entwickelte Greifer und Legestrategien.

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) gelten aufgrund ihrer herausragenden Eigenschaften als attraktives, zukunftssträchtiges Material für eine Vielzahl von Anwendungen und bieten die Möglichkeit, bisher genutzte Werkstoffe im Bereich Leichtbau zu substituieren. Hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit in Faserrichtung sowie eine sehr gute chemische Beständigkeit machen diese Materialklasse besonders für den

Automobil-, Luftfahrt- und Freizeitsektor interessant. Eine Voraussetzung, um das Potenzial der Kohlenstofffasern vollständig auszuschöpfen, ist eine lastpfadgerechte Auslegung und Fertigung der entsprechenden Bauteile. Diese wird durch unterschiedliche Fertigungsverfahren ermöglicht.

Aufgrund des energieintensiven Herstellungsprozess der Carbonfasern sind eine lange Nutzungsphase sowie angestrebte

Second-Life-Anwendungen notwendig, um die CO₂-Bilanz der Herstellung zu amortisieren. Ein nachhaltiger Einsatz von CFK-Strukturen kann durch die Schließung von Stoffkreisläufen auch in solchen Bereichen ermöglicht werden, in denen die Nutzungsphase, verglichen mit der Rohstoffgewinnung und Herstellung bei der Bilanzierung, weniger stark im Vordergrund steht als dies beispielsweise in der Luftfahrt der Fall ist.

Autoren



DIPL.-ING. FRANK MANIS ist Doktorand in der Abteilung Recycling von Verbundwerkstoffen am Fraunhofer IGCV in Augsburg.



DIPL.-ING. JAKOB WÖLLING ist Gruppenleiter Recycling von Verbundwerkstoffen am Fraunhofer IGCV in Augsburg.



ANNA SCHNELLER, M.Sc. ist Doktorandin am Lehrstuhl für Experimentalphysik II der Universität Augsburg.

Nach heutiger Sicht werden der CFK-Branche mit Wachstumsraten von 12 % sehr gute Marktperspektiven eingeräumt [1]. Aufgrund von Verschnitt, Ausschuss und End-of-Life-Teilen bedeutet dieses Wachstum aber auch eine Zunahme von CFK-haltigen Abfallströmen. So kann im Bereich der Verbundwerkstoffe der anfallende Abfall in zwei dominierende Gruppen eingeteilt werden.

Die erste Gruppe sind sogenannte End-of-Life-Teile, also Strukturen, die nach ihrer Nutzungsphase nicht für eine Reparatur oder Wiederverwendung in Frage kommen. Die zweite weitaus größere Gruppe sind die Produktionsabfälle, also Verschnittreste aus Gewebe- und Gelege-Rollenware. Die Verarbeitung sogenannter trockener unverharzter Produktionsabfälle wird derzeit hauptsächlich über Nass- und Trockenvliesprozesse realisiert, die einzelne Filamente oder Faserbündel zu einem Wirtvlies verarbeiten können. Diese sind jedoch oftmals durch eine starke Fasereinkürzung, einen geringen Orientierungsgrad, sowie durch einen geringen Faservolumengehalt im späteren Bauteil

BILD 1 Batch-Ofen zur Pyrolyse von CFK-Strukturen am Fraunhofer IGCV (© IGCV/Uni Augsburg)



gekennzeichnet. Diese drei Einflussfaktoren sind strukturmechanisch direkt mit der makroskopischen Festigkeit und Steifigkeit eines CFK-Produkts verknüpft und sollten daher optimiert werden [2].

Eine mögliche Optimierung dieser Eigenschaften kann durch die Verwendung von Patches erzielt werden. Hierbei werden matrixfreie Faserlagen, gleichgültig ob Verschnitt oder separierte Patches aus End-of-Life-Bauteilen, in kleine flächige Stücke mit einer Faserlänge von mindestens 20 mm

GaRecCa sind die Universität Augsburg, AFS GmbH, Apodius GmbH, Boll Automation GmbH, Kalex Engineering und das Fraunhofer IGCV.

Effiziente Separation von End-of-Life-Bauteilen

Zu Beginn des Projekts wurden aus real anfallenden Abfallströmen unterschiedliche Materialien ausgewählt, die im Rahmen des Verbundprojekts untersucht werden sollten.

Der im Bereich der Verbundwerkstoffe anfallende Abfall kann in zwei dominierende Gruppen eingeteilt werden.

zugeschnitten. Durch eine geeignete Legestrategie (Stacking und Staggering) unter Berücksichtigung mechanischer Korrelationen, können durch gepatchte Bauteile bis zu 80 % der Festigkeit und 95 % der Steifigkeit eines neuwertigen Bauteils erreicht werden [3]. Ziel des Verbundprojekts GaRecCa „Ganzheitliche Recycling-Prozesskette für Carbonfasergewebe & Gelege“ ist es, durch die Verwendung von Sekundärfaserpatches diese guten Eigenschaften in einem realen Bauteil zu erreichen. Partner im Projekt

Neben Prepreg-Abfall aus Polyamid und unidirektionalen Carbonfasern sowie trockenem Faserverschnitt wird innerhalb des Projekts GaRecCa auch die zukünftige Herausforderung der Separation von infiltrierten und konsolidierten Bauteilen bearbeitet. Um ein infiltriertes Bauteil zu einem Second-Life-Patch-Bauteil zu verarbeiten, ist im ersten Schritt eine Trennung der Faser von der Matrix notwendig.

Zur Untersuchung dieses Verfahrens wurden CFK-Bauteile mit einer duromeren

Epoxidharzmatrix mittels des Vacuum Assisted Resin Infusion (Vari) hergestellt. Stand der Technik der anschließend erfolgenden Faser-Matrix-Separation ist die Pyrolyse, ein thermisches Verfahren, das die Matrix in inerter Atmosphäre bei Temperaturen größer 500 °C zersetzt, Bild 1. Dabei wird die Matrix zunächst in kurzketzigere Moleküle zersetzt und dann komplett verkokst. Die chemisch und thermisch beständigeren Carbonfasern bleiben im Ofen erhalten [4].

In Abhängigkeit des eingesetzten Harzmaterials verbleibt ein geringer Restkoks-

gehalt von 2-15 % auf der Faseroberfläche, der sich negativ auf die Faser-Matrix-Anhaftung im späteren Second-Life-Bauteil auswirken kann. Dieser Koks, der aus den Rückständen des Matrixmaterials besteht, muss gegebenenfalls durch eine anschließende oder in der Pyrolyse enthaltene Oxidation, das heißt eine thermischen Behandlung unter sauerstoffhaltiger Atmosphäre entfernt werden [5]. Ist dies nicht möglich, so können auch makroskopische Koksrückstände auf der Faser verbleiben, die durch einen separaten Reinigungsschritt entfernt werden müssen.

An der Universität Augsburg wurde ein neues Verfahren zur Faser-Matrix-Separation entwickelt, das auf dem physikalischen Prinzip der induktiven Erwärmung von Carbonfasern basiert, Bild 2. Die Faser-Matrix-Separation erfolgt hierbei durch eine gezielte und selektive Erwärmung der elektrisch leitfähigen Carbonfasern. Elektrische Wirbelströme werden mittels eines elektromagnetischen Wechselfelds im Bauteil generiert und führen so zu einer unmittelbaren Erwärmung der Faser-Matrix-Grenzfläche. Die induktive Faser-Matrix-Separation stellt somit ein unmittelbares Erwärmungsverfahren dar, da die Erwärmung im Objekt selbst erfolgt. Dies führt gekoppelt mit sehr kurzen Prozesszeiten zu einem geringeren Energiebedarf im Vergleich zu bekannten Recyclingverfahren [6], da mittels der Induktion hohe Heizraten von circa 100 K/s ermöglicht werden.

Bei dieser Methode ist es im Gegensatz zu bekannten Recyclingmethoden nicht notwendig, einen Großteil der chemischen Bindungen des Matrixmaterials in die gasförmige Phase zu überführen, da die Anbindung an die Matrix bereits an den Grenzflächen zerstört wird. Somit können intakte Patchstrukturen in Form der Gewebelagen aus dem Verbund erzeugt werden.

Nach dem Separationsprozess liegen orientierte Carbonfasern mit weitestgehend matrixfreien Oberflächen und mit zur Neufaser vergleichbaren mechanischen Eigenschaften vor, Bild 3 und Bild 4. Zur Bewertung des induktiven Faser-Matrix-Separationsverfahrens innerhalb des Projekts dient die Pyrolyse als Benchmarkprozess. Dies erfolgt auf Basis der mechanischen Eigenschaften, der Bewertung der Oberfläche sowie dem Vergleich in Form einer Ökobilanzierung im Labormaßstab, Bild 2 und Bild 3.

Verbesserung der Faser-Matrix-Anhaftung

Entscheidend für gute mechanische Eigenschaften eines CFK ist die Anbindung (chemisch, physikalisch und mechanisch) zwischen Carbonfaser und polymerer Matrix. Die Stärke dieser Anbindung wird neben der Oberflächenstruktur entscheidend durch

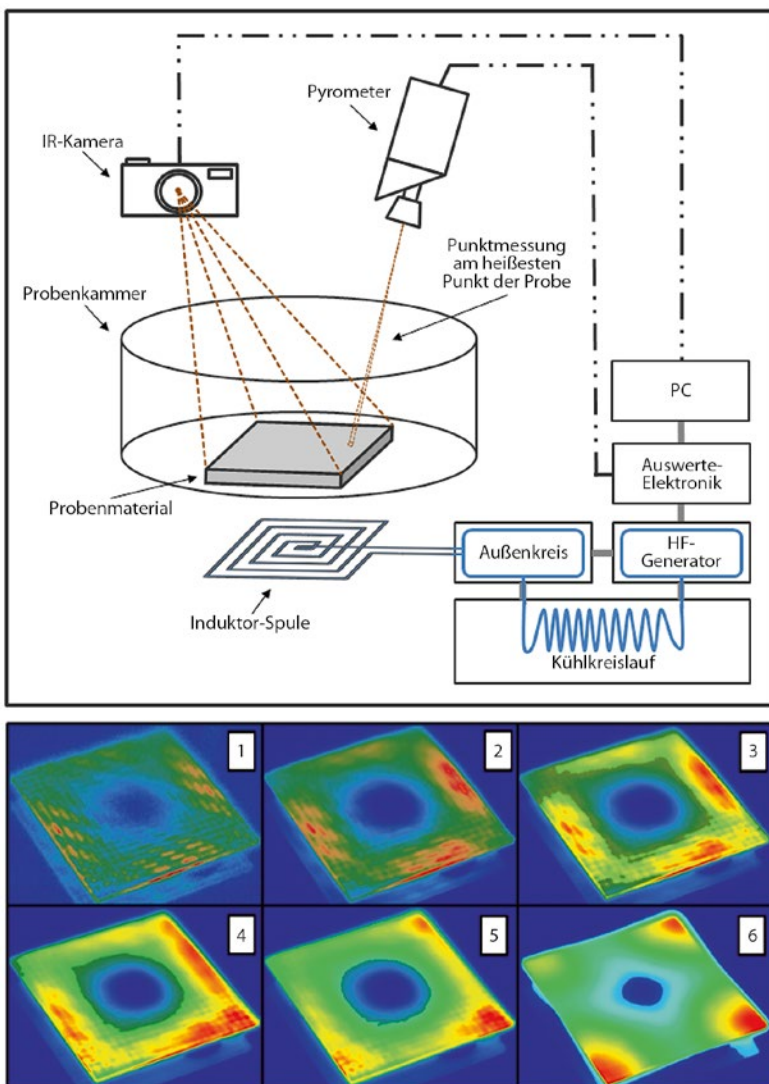
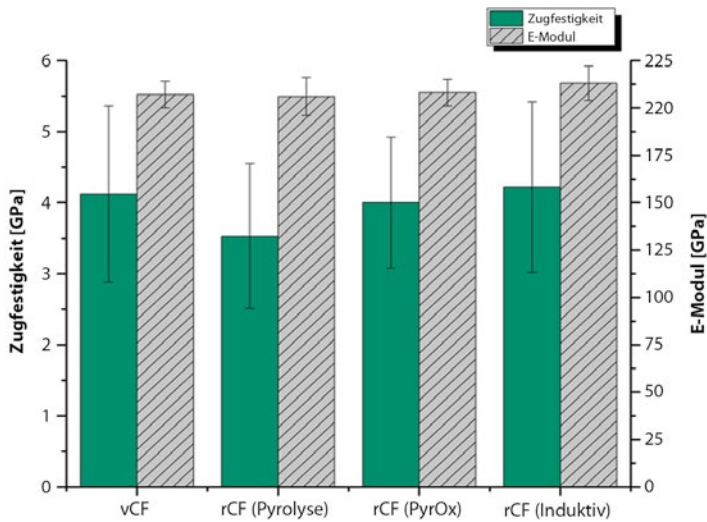


BILD 2 Aufbau der thermischen Induktionzelle mit Infrarotkamera, Induktorspule und Peripherie; Zeitlicher Verlauf der Erwärmung, dargestellt durch eine Folge von Thermographie-Aufnahmen (© Universität Augsburg / Fraunhofer IGCV)



	Zugfestigkeit [GPa]	E-Modul [GPa]	Bruchdehnung [%]	Durchmesser [µm]
vCF (Referenz)	4,12 ± 1,24	207 ± 7	1,85 ± 0,55	6,94 ± 0,22
rCF (Pyrolyse)	3,53 ± 1,02	206 ± 10	1,60 ± 0,40	6,85 ± 0,22
rCF (PyrOx)	4,00 ± 0,92	208 ± 7	1,8 ± 0,40	6,75 ± 0,31
rCF (Induktiv)	4,20 ± 1,20	213 ± 9	1,83 ± 0,52	6,90 ± 0,40

BILD 3 Mechanische Eigenschaften von aus einer Epoxidharzmatrix separierten Einzelfasern durch Pyrolyse, Pyrolyse inklusive Oxidation (PyrOx) und Induktion (© IGCV/Universität Augsburg)

die chemische Oberflächenzusammensetzung beeinflusst.

Bei der Firma AFS GmbH werden neue Methoden der Oberflächenaktivierung und Reinigung von Materialien mittels Plasmabehandlung entwickelt. Es konnte bereits nachgewiesen werden, dass eine Plasmaaktivierung prinzipiell eine positive Wirkung auf die Anhaftung der Fasern an die Matrix zeigen kann [7]. Im Rahmen des Projekts wurden prozessrelevante Parameter wie Behand-

lungsdauer, Abstand zwischen Plasmaquelle und Substrat sowie eingesetztes Plasmagas untersucht. Nach der Behandlung von induktiv separierten Fasern wurden diese auf Faserfestigkeit, Oberflächenchemie und ihre Faser-Matrix-Anhaftung von der Universität Augsburg und dem Fraunhofer IGCV untersucht.

Bei der durchgeführten Plasmabehandlung handelt es sich um ein Atmosphärendruck-Verfahren, das mit zwei Prozessgasen (Stickstoff und Distickstoffmonoxid)

an Umgebungsluft durchgeführt wurde. Hierbei wird die Plasmawolke aus der Plasmadüse, die sich in variablem Abstand zur Probenoberfläche befindet, gleichmäßig auf die Faseroberfläche aufgebracht. Durch das Aufbringen von aktiven polaren Gruppen (zum Beispiel C-OR, C=O, COOR) auf die Oberfläche, können diese nach der Infiltration mit einer polymeren Matrix kovalente Bindungen mit dieser eingehen.

Die durchgeführten Plasmabehandlungen ermöglichten einen signifikanten Anstieg des Sauerstoffgehalts, was durch XPS-Untersuchungen nachgewiesen wurde. Außerdem konnte eine Entfernung von Pyrolysekoks bei stark verkockten Fasern nachgewiesen werden, Bild 5. Dabei ergaben Einzelfaserzugversuche, dass die mechanischen Eigenschaften der plasmabehandelten Carbonfasern im Rahmen des Fehlers weitgehend erhalten bleiben.

Optimierte Legestrategie zur Herstellung hochwertiger Bauteile

Um die vereinzelt Patches wieder zu einem Halbzeug oder zu einer sogenannten Preform zusammensetzen, musste ein geeigneter Greifer gefunden werden, der sowohl separierte Lagen wie auch Verschnittpatches greifen und transportieren kann. Die Firma Boll Automation GmbH führte hierfür eine systematische Bewertung unterschiedlicher Greifer durch und implementierte eine als geeignet evaluierte Ausführung in das Gesamtsystem, Bild 3.

Zur Darstellung einer ganzheitlichen Prozesskette wurde neben dem Greifer, eine

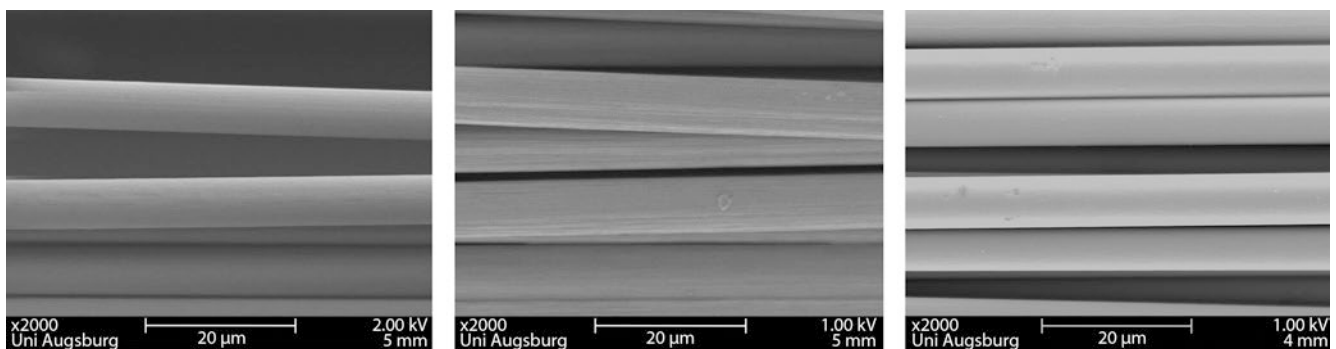


BILD 4 Rasterelektronenaufnahmen von aus einer Epoxidharzmatrix separierten Fasern durch Pyrolyse, Pyrolyse und Oxidation und Induktion (© Uni Augsburg/Fraunhofer IGCV)



BILD 5 Einfluss der Plasmabehandlungen: Deutliche Entfernung von Restkoks auf unvollständig separierten Halbzeugen (© Fraunhofer IGCV)

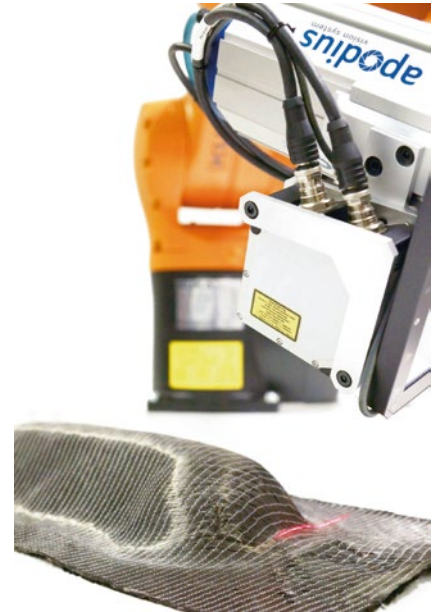
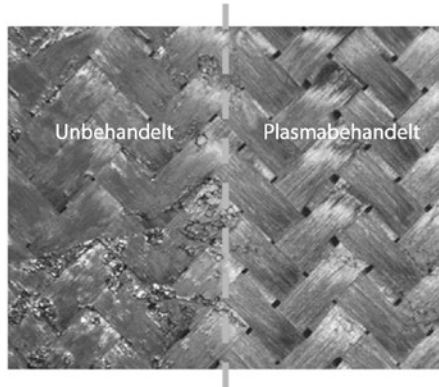


BILD 6 Apodius Vision System Bild mit Faserbewertung (© Apodius)

Apodius Vision Software zur Patchvermessung integriert. Durch die Kompetenz von Boll Automation, Systemintegrator für komplexe Robotik Vision Applikationen und Robotik-Greiftechnik, konnte beides miteinander kombiniert werden. Neben der Geometrie und des Schwerpunktes werden auch die Hauptorientierungen der Patches bestimmt, an die Legesoftware übergeben und in eine optimierte Patchablage überführt, **Bild 6, Bild 7**.

Zur Plasmabehandlung von separierten Patches, wurde ein neuer Plasmadüsenkopf der Firma AFS GmbH für einen Roboter entwickelt. Dieser arbeitet mit zwei Niedertemperatur-Plasmajetdüsen, die simultan flä-

chige Halbzeuge bearbeiten können, **Bild 5**. Neben dieser Funktionalität wurde außerdem zur Fertigung von Prepregpatches eine Ultraschallsonotrode in das Greifersystem integriert, die die Patches nach der Ablage mit einem Schweißpunkt stoffschlüssig verbinden kann.

Zur Optimierung der Festigkeit und Steifigkeit ist die Systematik des Ablegens entscheidend. In Abhängigkeit der vom Apodius-Messsystem ermittelten Fehler, die an jedem Patch individuell detektiert werden, wird entschieden, an welche Stelle ein Patch gelegt wird. Für die Entwicklung dieser Systematik wurden Versuche an thermoplastischen Prepregpatches und trockenen sowie

separierten Gewebepatches durchgeführt, die ein vergleichbares Ergebnis bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften aufgezeigt haben. Des Weiteren wurde der Einfluss einer Winkelabweichung bei der Ablage und einer Verwendung von unterschiedlichen Architekturen im selben Bauteil evaluiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass mithilfe einer optimierten Verwendung von Patches gute mechanische Eigenschaften erreicht werden können. Eine abschließende Kostenbetrachtung des im Labormaßstab getesteten Systems steht noch aus.

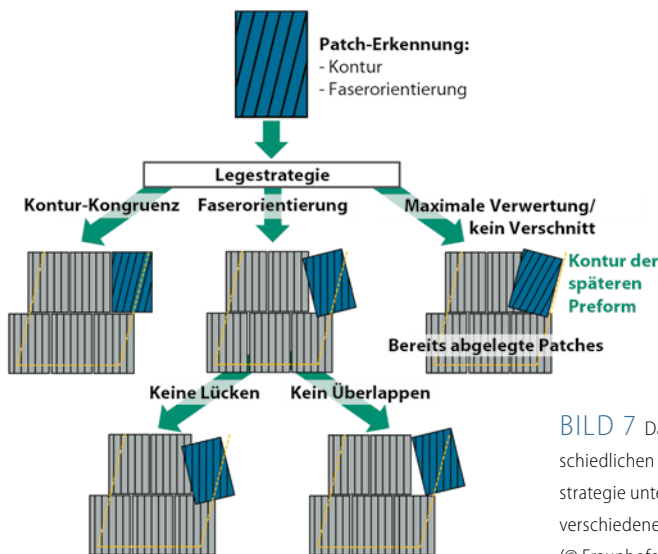


BILD 7 Darstellung der unterschiedlichen Resultate einer Legestrategie unter Zugrundelegung verschiedener Randbedingungen (© Fraunhofer IGCV)

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Projekts GaRecCa war es, das Potenzial des Einsatzes von Patches als Sekundärmaterial aufzuzeigen. Hohe Verschnittsraten, wie sie aktuell häufig anzufinden sind, ermöglichen den kostengünstigen Einsatz solcher patchbasierter Systeme. Dabei muss neben einer Patchbewertung eine für das zu fertigende Bauteil optimierte Legestrategie entwickelt werden.

Neben dem direkten Einsatz von CF-Verschnitt konnte im Projekt die Verwertung thermisch separierter Patches nachgewiesen werden. Zur Separation wurden ein induktives und pyrolytisches Verfahren verwendet.

Beide Verfahren liefern nahezu koksfreie Fasern, die mit einer geeigneten Plasmanachbehandlung in einen Zustand versetzt werden können, in dem sie eine sehr gute Anhaftung zu einem späteren Harzsystem aufzeigen.

Mit der Zusammenführung dieses Know-Hows ist es möglich, eine alternative Verwertung von recycelten Carbonfasern gegenüber klassischen Verfahren aufzuzeigen, die hohes kostenspezifisches mechanisches Potenzial bietet. Zukünftiges Potenzial für eine Prozessverbesserung ergibt sich durch die Verwendung unterschiedlicher Randbedingungen, die sich seitens eines Anwenders bauteilspezifisch anpassen lassen. So kann beispielsweise die Vorgabe, alle Patches perfekt lastpfad-orientiert zu platzieren, andere Positionsdaten für die Roboter-Patchablage generieren als die Bedingung, ein möglichst lückenloses Halbzeug zu erzeugen, Bild 7. Hier sind noch weitere Arbeiten zur Implementierung verbesserter

An der Universität Augsburg wurde ein neues Verfahren zur Faser-Matrix-Separation entwickelt.

Legestrategien unter Beachtung unterschiedlicher, teilweise auch widersprüchlicher Anforderungen notwendig.

Literaturhinweise

- [1] Witten, E.; Schuster, A.: Der Composites-Markt Europa: Marktentwicklungen, Herausforderungen und Chancen. Composite-Marktbericht, CCEV; 2015
- [2] Oliveux, G.; Dandy, L. O.; Leeke, G. A.: Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. In: Progress in Material Science 72, 2015
- [3] Sauer, M.: Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von CFK-Patch-Strukturen in Abhängigkeit der Patch-Größe und der

prozentualen Verteilung. Bachelorarbeit, Universität Augsburg, 2013

- [4] Pickering, S. J.: Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. In: Composites Part A 37, 2006
- [5] Manis, F.; Betz, T.; Wölling, J.; Drechsler, K.: Bewertung der mechanischen und ökologischen Aspekte des thermischen Recyclings von Faserverbundwerkstoffen. 4. Symposium Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen, Tutzingen, 2016
- [6] Schneller, A.; Mueller, W. M.; Richler, S.; Horn, S.: Recycling of woven carbon fiber patches from laminated CFRP by means of induction heating. 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, 7/2015
- [7] Lee, H.; Ohsawa, I.; Takahashi, J.: Effect of plasma surface treatment of recycled carbon fiber on carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) interfacial properties. In: Applied Surface Science 358, 2015

DUPONT

MASSGESCHNEIDERTE LÖSUNGEN FÜR DAS ELEKTROAUTO DER ZUKUNFT

Zukunftsweisende Ingenieurskunst, Know-how und partnerschaftliche Zusammenarbeit treffen auf Leistung in reinsten Form.

Alles beginnt jedoch mit Ihrer Vision und Ihren Bedürfnissen: Platz sparen, leichtere Autos, Integration von Teilen, Kostensenkung. Wir entwickeln maßgeschneiderte Materialien und Verfahren, um diese Vision voranzutreiben, und gestalten das Designkonzept durch unsere neuen Produkte.

Weil Sie es sich so vorgestellt haben... maßgeschneiderte Lösungen, direkt im Kern.

DuPont Performance Materials Wir verleihen cleveren Ideen Gestalt

becauseyouimagined.dupont.com

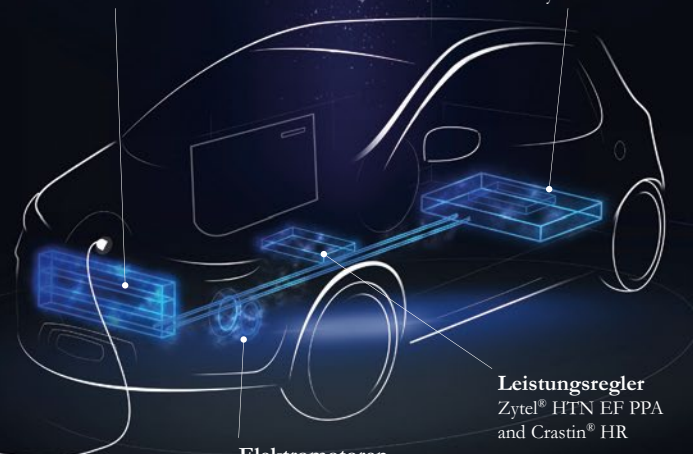
Copyright © 2016 DuPont. Alle Rechte vorbehalten. Das DuPont Ova- Logo, DuPont™ sowie sämtliche mit © oder ™ gekennzeichnete Produkte sind eingetragene Warenzeichen von E. I. du Pont de Nemours and Company oder seinen Partnern. „Zytel“, „Crastin“ und „Vizilon“ sind die Handelsmarken für die Harze von DuPont.

Thermomanagement-Systeme

Zytel® HTN PPA, Zytel® PLUS PA,
Crastin® PBT

Akku-Strukturen

Crastin® PBT, Vizilon™
and Zytel® HTN



Leistungsregler

Zytel® HTN EF PPA
and Crastin® HR

Elektromotoren

Zytel® HTN EF PPA

