

» Wegweisend: Fertigung thermoplastischer und duromerer Bauteile aus Faserverbundkunststoffen «

Der Kompetenzbereich „Polymer Engineering“ am Fraunhofer ICT in Pfinztal beschäftigt sich seit fast zwei Jahrzehnten mit Zukunftsthemen der Kunststofftechnologie. Eine tragende Rolle in der anwendungsnahen Forschung an Kunststoffen spielt die Entwicklung von kosten- und ressourceneffizienten Materialrezepturen und Verarbeitungsprozessen.

Bei der Umsetzung von Forschungsprojekten arbeiten thematisch fokussierte Arbeitsgruppen eng vernetzt zusammen mit Partnern aus dem Ausland, aus den Fraunhofer-Allianzen und mit dem Karlsruher Institut für Technologie KIT. Die Anbindung und wissenschaftliche Zusammenarbeit mit dem KIT ermöglicht darüber hinaus eine Vertiefung der Grundlagenforschung über den Lehrstuhl für Leichtbautechnologie mit Professor Dr.-Ing. Frank Henning und den Lehrstuhl Polymertechnik mit Professor Dr.-Ing. Peter Elsner.

Bei der Entwicklung von polymeren Werkstoffen werden hochleistungsfähige Resultate durch eine intelligente Kombination von faserverstärkten Kunststoffen verwirklicht. Interdisziplinäre Teams entwickeln sinnvolle Materialkombinationen, die leistungsfähige Anwendungen ermöglichen. Dabei stehen in der Faserverbundtechnik Entwicklungsstrategien im Zentrum des Interesses, die zu einer höheren Effizienz entlang der gesamten Prozesskette führen.

Im Folgenden belegen zwei aktuelle Forschungsprojekte am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT in Pfinztal die Realisierung von Hochleistungsfaserverbunden: zum einen mit thermoplastischer zum anderen mit duromerer Matrix.

Beispielhaftes Forschungsprojekt mit thermoplastischen Faserverbundkunststoffen

Ein Beitrag von Sebastian Baumgärtner und Tobias Joppich

Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes von EDAG GmbH & Co. KGaA, Celanese-Engineered Materials und dem Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) wurde anhand eines Struktureinlegers für eine LKW-Staufachklappe die Nutzbarkeit der Thermoplast-Tapelegetechnologie im industriellen Maßstab aufgezeigt. Die Bauteilformgebung erfolgte hierbei in einer automatisierten Prozesskette mit integriertem Online-Prozessmonitoring. Der nachfolgende Artikel beleuchtet die Kernprozessschritte – Thermoplastbasiertes Tapelegen, Vorkonsolidieren, Umformen – und beschreibt damit die Teilaspekte des vorgestellten Gemeinschaftsprojektes.

Rahmenbedingungen zur effizienten Realisierung

Verschärfte Richtlinien hinsichtlich des zugelassenen CO₂-Ausstoßes bei Neufahrzeugen erhöhen sukzessive den Druck auf die Automobilindustrie zur Emissionsminderung. Die Gewichtsreduktion von Fahrzeugen ist hierbei ein wesentlicher Lösungsansatz. Bei der Großserienfertigung der dafür notwendigen Leichtbaustrukturen aus faserverstärkten Kunststoffen müssen jedoch einige Vorgaben erfüllt werden. Dazu gehören insbesondere eine geringe Zykluszeit von unter 60 Sekunden, die Rezyklierbarkeit der eingesetzten Materialien sowie die Möglichkeit einer inte-

grativen Bauweise. Darüber hinaus müssen die monetären Randbedingungen der Automobilindustrie hinsichtlich eng definierter Stückkosten und eine Adaptierbarkeit des Prozesses in die bestehende Infrastruktur eingehalten werden. Speziell thermoplastische Faserverbundkunststoffe bieten in diesem Kontext ein hohes Potenzial. Sowohl die hervorragenden Möglichkeiten zur stoffschlüssigen Funktionsintegration als auch die preisgünstigen und reproduzierbaren Fügeprozesse sorgen dafür, dass thermoplastische Faserverbundwerkstoffe gesamtwirtschaftlich betrachtet ein großes wirtschaftliches Potenzial aufweisen.

Prozessbetrachtung

Die Projektinhalte des Gemeinschaftsprojektes von EDAG GmbH & Co. KGaA, Celanese – Engineered Materials und dem Fraunhofer ICT lassen sich in folgende sechs Unterpunkte gliedern (Abb.1):

Im Rahmen dieses Beitrags werden die Prozessschritte zwei bis vier näher betrachtet.

Thermoplast-Tapelegen

Um die in der Bauteilauslegung ermittelten Faserorientierungen der jeweiligen Lage im finalen Gelegetaufbau zu realisieren, wurden mittels der RELAY® Tapelegetechnologie unidirektional faserverstärkte Thermoplasttapes (UD-Tapes) abgelegt und mittels Ultraschalltechnologie aneinander geheftet, um die prozesssichere Handhabung des entstehenden Geleges zu gewährleisten. Dabei gibt es keine Limitierungen auf einen biaxialen Aufbau, wie die bei Geweben übliche 0°, 90°

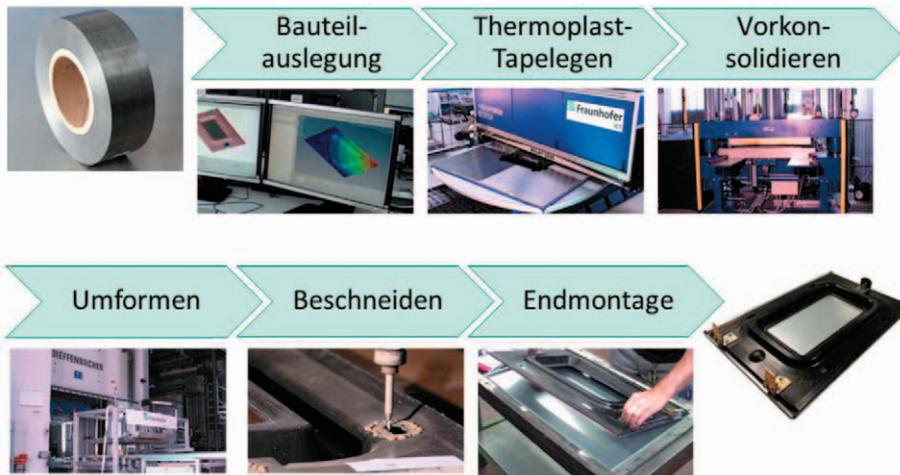


Abb. 1: Untergliederung der Projekthalte

oder $\pm 45^\circ$ Faserorientierungen. Im Gegensatz hierzu können die Faserorientierungen bei diesen Gelegen komplett frei, entsprechend der Berechnungsergebnisse, festgelegt werden.

Vorkonsolidieren

Konsolidieren ist das „weitestgehend einschussfreie Zusammenführen von Fasern, Matrix und gegebenenfalls Füllstoffen und das Verfestigen zum Faserverbundbauteil“ [6]. Der hierfür erforderliche Prozess, der sich maßgeblich aus Temperatur, Druck und Zeit zusammensetzt, wird anhand von **Abbildung 5?** verdeutlicht. Aus den punktuell verschweißten, recht biegeschlaffen Gelegen entstehen so feste, endlosfaserverstärkte Platten mit thermoplastischer Matrix.

Umformen

Im nächsten Prozessschritt wurden die konsolidierten Gelege automatisiert aufgeheizt, umgeformt und wieder abgekühlt. **Abbildung 2** zeigt schematisch den hierzu verwendeten Aufbau.

Zunächst wird das Halbzeug durch pneumatische Greifer, welche an einem Transportschlitten befestigt sind, fixiert und mittels eines Transfersystems in ein Infrarotheizfeld (IR-Heizfeld) gefahren (**Abb. 3 oben**). Dort erfolgt die Aufheizung, während kontinuierlich mittels zwei Pyrometern die Oberflächentemperatur gemessen wird. Anschließend wird der Schlitten in die Presse gefahren, abgekoppelt und durch eine Höhenverstellung direkt über der Kavität des Werkzeugs positioniert (**Abb. 3 Mitte**).

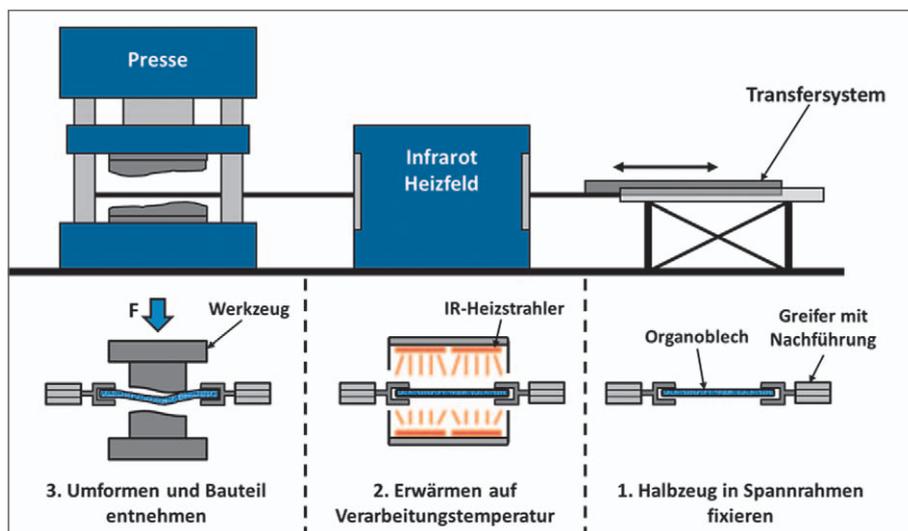


Abb.2: Schematische Prozesskette zum Aufheizen und Umformen endlosfaserverstärkter Halbzeuge [6]

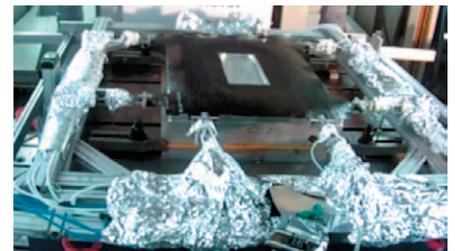
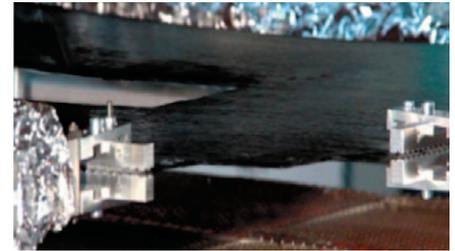


Abb.3: Aufheizung im IR-Feld, Transport des Geleges zum Werkzeug und Entformen des umgeformten Bauteils

Im letzten Schritt schließt sich die Presse und das Gelege wird im temperierten Werkzeug umgeformt und bis zum Erreichen der Entformungstemperatur abgekühlt. Die Pneumatikzylinder ermöglichen dabei ein gezieltes Nachführen des maßgeschneiderten Geleges und stellen sicher, dass auch dieser Prozess reproduzierbar stattfindet (**Abb. 3 unten**). Bei der Umformung zeigen sich abhängig vom Lagenaufbau große Unterschiede, welche in **Abbildung 4** beispielhaft an unterschiedlichen, achtlagigen Gelegeaufbauten mittels Rasteraufnahmen verdeutlicht werden.

Während beim $\pm 45^\circ$ -Aufbau das Material sehr lokal in der Mitte der jeweiligen Seitenflanken nachgezogen wurde, gestaltete sich dies beim $0^\circ, 90^\circ$ -Aufbau deutlich flächiger. Bei der Betrachtung der quasiisotropen Variante wird die Wechselwirkung der unterschiedlichen Drapierung und Nachführung der Einzellagen anhand lokaler Verzerrungen des Linienmusters deutlich.

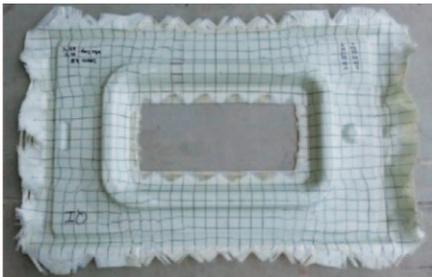
Nach dem Entformen erfolgen der Randbeschneidung und das Einbringen von Funktionsöff-



± 45°



0°, 90°



Quasiisotrop

nungen mittels Wasserstrahlschneidverfahren z. B. für nachfolgende Montageschritte.

Fazit

Im Rahmen des Projektes konnte anhand eines Versteifungsinlays für eine LKW-Staufachklappe die Machbarkeit dieser Komponente mittels Thermoplast-Tapelegetechnologie in Kombination mit einem Pressprozess gezeigt werden. Der besondere Fokus lag dabei auf einem hohen Automatisierungsgrad, um eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit des Gesamtprozesses zu gewährleisten und die Eignung für die Mittel- und Großserie aufzuzeigen. Wie dargestellt, spielen die Parameter Druck, Temperatur und Zeit beim Konsolidieren die maßgebliche Rolle für das Erreichen der maximalen Bauteilperformance. Diese Parameter gilt es, material- und prozessspezifisch zu optimieren. Ferner hat der Lagenaufbau einen signifikanten Einfluss auf das Drapierverhalten. Die dabei auftretenden Effekte sind Bestandteil weiterer Untersuchungen.

Abb.4: Drapierverhalten in Abhängigkeit von der Faserorientierung

Enorm belastbar: Faserverbundkunststoffe mit trialem Geflecht im Hochdruck- RTM Verfahren

Ein Beitrag von Michael Karcher

Motivation und Zielsetzung

Aufgrund ökologischer und ökonomischer Aspekte sowie der politischen Vorgabe den Energieverbrauch und damit die CO₂-Emissionen zu senken, gewinnt das Thema Leichtbautechnologien und neue Leichtbauwerkstoffe zunehmend an Bedeutung. Daraus abgeleitet ergibt sich ein stark wachsender Bedarf an neuen, gewichtsoptimierten Bauweisen, effizienten Verarbeitungsprozessen und innovativen Konzepten zum Systemleichtbau.

Zukünftig werden sich – besonders in der Automobilindustrie – verstärkt Hybridbauweisen neben reinen CFK-Bauweisen etablieren. Dabei werden die jeweiligen Materialsysteme in den Strukturkomponenten verwendet, in denen ihre individuellen Eigenschaften optimal genutzt werden können. Ein sinnvoller hybrider Leichtbauansatz kann zur Gewichtsreduktion bei gleichzeitiger Fokussierung der ökonomischen und ökologischen Randbedingungen beitragen. Insbesondere Faserverbundstrukturen, welche sich durch ihre ausgezeichneten spezifischen Eigenschaften und ihren äußerst hohem Energieaufnahmevermögen auszeichnen, finden speziell in crashrelevanten Bauteilen verstärkt ihren Einsatz. Zu solchen Bauteilen zählen zum Beispiel Längsträger, Crash-Cones, B-Säulen, Schweller oder Sitzquerträger.

Im Rahmen des Technologie Cluster Composites Baden-Württemberg (TC²) befassten sich im Projekt „Forschung für eine geschlossene Simulations- und Fertigungsprozesskette für crashrelevante Faserverbundstrukturen im Automobilbau“ Forschungseinrichtungen aus Baden-Württemberg in Zusammenarbeit mit der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, mit der simulativen Betrachtung/Berechnung sowie der praktischen Umsetzung und Realisierung eines crashrelevanten Hohlbauteils aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. Der realisierte generische Projektdemonstrator wurde am Beispiel eines Sitzquerträgers abgeleitet. Ein heutzutage verbauter Sitzquerträger muss neben der Absorption von Energie im Crashfall gleichzeitig weitere Funktionen er-

Literatur:

1. V.S. Chevali, D.R. Dean, G.M. Janowski: Flexural creep behavior of discontinuous thermoplastic composites: Non-linear viscoelastic modeling and time-temperature-stress superposition, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Vol. 40 (6-7) (2009), p. 870-877
2. H.C. Kim, L.W. Glenn, C.S. Ellis and D.E. Miller: Selecting long-glass fiber/thermoplastics for creep resistance, Plastics Engineering Vol. 53 (1) (1997), p. 39-40
3. E.M. Silverman: Effect of glass fiber length on the creep and impact resistance of reinforced thermoplastics, Polymer Composites Vol. 8 (1) (1987), p. 8-15
4. H. Schürmann: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden (2005), Springer-Verlag Berlin
5. F. Henning, B. Hangs, M. Reif: Funktionalisierung thermoplastischer UD-Tapelegele im Spritzgießverfahren (2012), DVM Tag, Berlin
6. F. Henning, E. Moeller: Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung (2011), Carl Hanser Verlag München.
7. T. G. Gutowski: Advanced Composites Manufacturing (1997), John Wiley & Sons, Inc. New York

füllen. Dies sind unter anderem Durchbrüche für Kabeldurchführungen, Sitzanbindungselemente, sich kontinuierlich ändernde Querschnitte zur definierten Energieaufnahme (Absorption) und Flanschbindungspunkte zur Integration und/oder Anbindung an andere Bauteilkomponenten.

Eine weitere Prämisse war die Betrachtung von Fertigungstechnologien, die eine funktionsintegrierte Fertigung von ungefähr 300 Bauteilen pro Tag ermöglichen. Die Flechttechnologie ist für die Herstellung von Hohlstrukturen ideal geeignet und ermöglicht zugleich eine endkonturnahe Performherstellung. Die Hochdruck-RTM Technologie, welche den Einsatz hochreaktiver Epoxidharzsysteme mit kurzen Injektions- und Aushärtezeiten ermöglicht, bieten ein hohes Potenzial zur Fertigung von Bauteilen in kurzen Zykluszeiten, um die definierte Stückzahl zu realisieren.

Fertigungstechnologien

Aktuell befindet sich die Flechttechnologie bereits erfolgreich im industriellen Einsatz, ist jedoch in wesentlichem Umfang immer noch Bestandteil von Forschungsprojekten. Flechten ist ein prädestinierter Preformprozess für die Herstellung von Hohlbauteilen, in dem eine Maschine trockene Faserrovings auf einem Kern ablegt und somit eine Art Schlauchgebilde herstellt. Für die Herstellung eines Geflechts werden eine Flechtmaschine mit Flechtring sowie ein 6-Achs Industrieroboter benötigt. Auf dem Flechtring sitzen dabei die Klöppel, auf denen sich die Fasern (Faserspulen) befinden. Durch Flügelräder werden die Klöppel auf der Innenseite des Flechtrings auf zwei sich kreuzenden Sinusbahnen in entgegengesetzter Richtung geführt, wodurch sich die Rovings überkreuzen und ein Rundgeflecht um den Kern bilden. Der Kern wird mittels des Roboters durch eine programmierte, dreidimensionale Bahn durch eine Flechtkulisse geführt. Somit können komplexe Kernegeometrien beflochten werden. Durch Variation der Flechtprozessparameter können unterschiedliche Eigenschaften des Geflechts definiert eingestellt werden. Bei Einsatz der reinen Klöppel entsteht ein Geflecht, das als biaxial beschrieben wird. Zusätzlich können noch Stehfäden in das Geflecht mit eingebracht werden, um so die Eigenschaften des Bauteils in Längsrichtung zu verbessern – wird als triaxial bezeichnet. Die Dicke des Geflechts und somit die Wandstärke

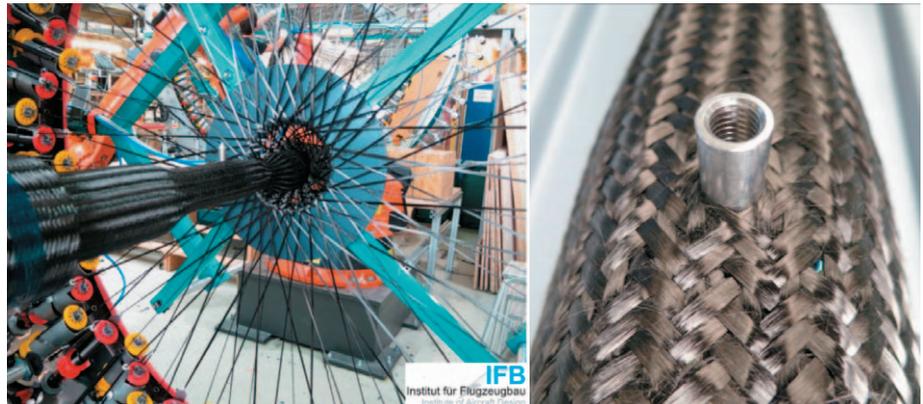


Abb. 5: Flechtmaschine (links), Flechtrohling mit eingeflochtenem Insert (rechts)

der Bauteile kann durch mehrfaches Beflechten des Kerns oder durch Wahl der Faser eingestellt werden (Abb. 5).

Hochdruck-RTM-Verfahren

Nach Herstellung des Flechtrohlings wird dieser in die Kavität eines 2-teiligen Presswerkzeuges eingelegt. Anschließend wird die Presse auf Endbauteildicke geschlossen. Die reaktive Matrix besteht meist aus Harz, Härter und eventuellen Additiven wie z. B. Katalysatoren, Flamschutzmittel, etc., welche in einem stöchiometrisch festgelegten Verhältnis vermischt werden. Zur Vermischung der einzelnen Komponenten wird eine spezielle Injektionsanlage, der Hochdruck-RTM-Anlage eingesetzt, welche eine exakte, hochpräzise Vermischung der reaktiven Harzkomponenten ermöglicht. Beim klassischen RTM-Verfahren werden Niederdruck-RTM Anlagen verwendet, welche mit niedrigeren Misch- und Injektionsdrücken arbeiten. Dort werden üblicherweise Statikmischer zum Erreichen einer homogenen Harzmischung eingesetzt, die jedoch nach jedem Bauteilzyklus gereinigt oder ausgetauscht werden müssen. Im Gegensatz dazu befinden sich bei der Hochdruck-RTM-Anlage die Matrixkomponenten in separaten beheizbaren Kreisläufen und werden erst während der Injektionsphase in einem Mischkopf mit Drücken von 50 bis 220 bar vermischt. Durchflussraten von 20 bis 400 g/s sind je nach Anlagen- und Mischkopfkonfiguration erreichbar. Durch die hohen Durchflüsse und die direkte Vermischung der einzelnen Matrixkomponenten können im Gegensatz zum herkömmlichen RTM hochreaktive Harze mit geringen Topfzeiten zum Einsatz kommen, was die Zykluszeit drastisch reduziert. Eine Reinigung des Mischkopfes nach jedem Harz-

schuss ist nicht erforderlich, da sogenannte selbstreinigende Mischköpfe eingesetzt werden. Durch die Realisierung von hohen Injektionsdrücken können auch stark kompaktierte Fasern (Preforms) zuverlässig infiltriert werden, was zu einem hohen Faservolumengehalt im finalen Bauteil führt und zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, vor allem gewichtsspezifisch, führt. Heutzutage sind mit dem Hochdruck-RTM-Verfahren bereits Aushärtezeiten von unter 5 min realisierbar (Abb. 6).



Abb. 6: Eingelegter Flechtrohling im Hochdruck-RTM-Werkzeug

Umsetzung und Realisierung des Projektdemonstrators

Vor der eigentlichen Umsetzung und Realisierung des Projektdemonstrators wurden an einer vorherigen, kleineren Bauteilstufe unterschiedliche Kernkonzepte zur Realisierung eines hinterschnittbehafteten Hohlstrukturbauteils näher untersucht. Hierbei liegt der Fokus unter anderem auf der Bewertung der Großserientauglichkeit dieser Kernsysteme. In Tabelle 1 sind die untersuchten Kernsysteme dargestellt. Zum Einsatz kamen einfach und mehrfach geteilte Kerne aus Aluminium-,

2-teiliger Kern	Mehrteiliger Kern	Integraler Kern
		 inkl. Steiger + Anguss
Stoßverbindung an engster Stelle mit Passstiften	Durchgehende Grundform und 2 magnetisch befestigte Aufsätze	Verlorener Kern
<ul style="list-style-type: none"> ■ Alu EN AW-7075 / Ra 1µm ■ Stahl 1.2311 / Ra 1µm ■ Messing MS58/CW614N / Ra 1µm 	■ Alu EN AW-7075 / Ra 1µm	■ Bismutlegierung (MST 150)

Tab.1: Überblick untersuchter Kernsysteme zur Realisierung eines hinterschnittbehafteten Hohlbauteils

Stahl-, Messinglegierungen. Für einen verlorenen Kern wurde eine Bismutlegierung ausgewählt. Keiner der Kernsysteme konnte gleichzeitig eine hohe Designfreiheit und hohe Prozesssicherheit in der Fertigung aufzeigen. Am praxistauglichsten erwies sich das Kernkonzept mit dem geringsten Freiheitsgrad (2-teilig mit Stoßverbindung an der engsten Stelle), welcher für die Umsetzung des Projektdemonstrators weiterverfolgt wurde. Des Weiteren wurden an dieser kleineren Bauteilstufe mittels der Software PAM-RTM Formfüllsimulationen mit realitätsnahen definierten Randbedingungen durchgeführt, um diverse Anguss- und Entlüftungskonzepte für die Werkzeugauslegung zu evaluieren. Als bestes Ergebnis erwies sich ein Linienanguss entlang des Bauteils, da der bei der Werkzeugfüllung entstehende Werkzeuginnen- druck am geringsten war und eine homogene Formfüllung ermöglichte. Die Werkzeugauslegung und -fertigung wurde in enger Zusammenarbeit mit der Firma Pelz Technik GmbH durchgeführt.

Die Erkenntnisse aus diesen Voruntersuchungen flossen dann in die Umsetzung und Realisierung des Projektdemonstrators ein. Es wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und einem weiteren Werkzeugbauer, der Frimo Group GmbH ein Hochdruck-RTM-Werkzeug konzipiert und entsprechend gefertigt. Neben dem Hochdruck-RTM-Werkzeug wurden vier unterschiedliche Kerne (2-teiliger Kern mit Stoßverbindung) für die Herstellung der Bauteile beschafft, welche alle optional mit und ohne Insertintegration genutzt werden können. Die Kerne wurden so ausgelegt, dass jeweils ein Bauteil mit 50% FVG, 55% FVG und 60%FVG fertigbar ist. Der vierte Kern wurde so konzipiert, dass sich drei Lagen Geflecht im Bauteil befinden und 50% FVG erzielt werden. Durch die Variation der Kerne sollte untersucht und analysiert werden, welcher Faservolumengehalt prozesstechnisch mit Geflechtem im Hochdruck-RTM- Verfahren realisierbar ist. Diese Untersuchungen dienten ebenso zur Validierung der konstruktiven Bauteilauslegung. Schlussendlich konnte ge-

zeigt werden, dass geflochtene Bauteile mit einem Faservolumengehalt von ca. 60% im Hochdruck-RTM-Verfahren mit Zykluszeiten von 4 Minuten durch Einsatz eines hochreaktiven Epoxidharzsystems herstellbar sind. Das integral hergestellte funktionsintegrierte Bauteil ist in **Abbildung 7** dargestellt.

Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen und Ergebnisse wurden im Projekt „Forschung für eine geschlossene Simulations- und Fertigungsprozesskette für crashrelevante Faserverbundstrukturen im Automobilbau“ im Rahmen des Technologie-Cluster Composites Baden-Württemberg (TC²) durchgeführt. Dieses Vorhaben wurde durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg gefördert. Ebenso ein Dank an die Firma Sika Deutschland GmbH zur kostenfreien Bereitstellung des Epoxid Harzsystems. Folgende Partner waren an dem Projekt beteiligt:

- Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Pforzheim
- Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut EMI, Freiburg
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
- Institut für Flugzeugbau IFB, Universität Stuttgart
- Institut für Fahrzeugsystemtechnik FAST, Karlsruher Institut für Technologie KIT
- Automotive Simulation Center Stuttgart ASCS
- Dr. Ing. h.c.F. Porsche AG (industrielle Projektbegleitung)

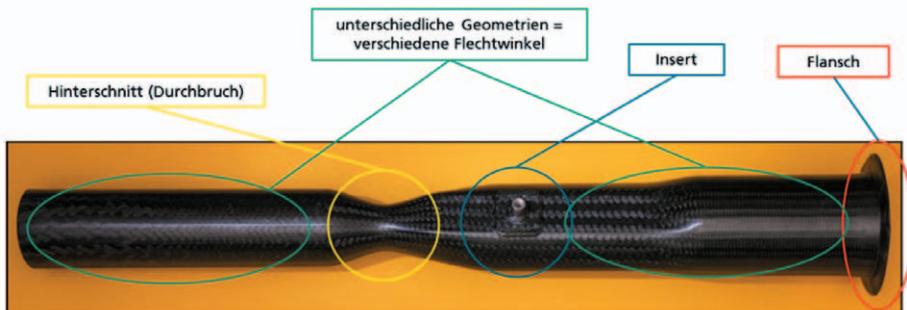


Abb. 7: Finaler Projektdemonstrator: funktionsintegriertes Hohlstrukturbauteil durch integrale Fertigung mittels Flechttechnologie und Hochdruck-RTM-Verfahren

KONTAKT:

Fraunhofer-Institut Chemische Technologie
 Zentrales Management
 Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7
 Tel.: +49 (0)721 4640-0
 www.ict.fraunhofer.de