

VDI

K

KUNSTSTOFFTECHNIK

Kunststoffe im Automobilbau

KUNSTSTOFFTECHNIK

Kunststoffe im Automobilbau

Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH
VDI-Gesellschaft Materials Engineering

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen photomechanischen Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie) und das der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN 978-3-18-234342-4

Vorwort

Bei Fahrzeug-Neuentwicklungen stehen heute Themen wie Leichtbau, Ressourceneffizienz, Gebrauchsnutzen, designtechnische Anmutung sowie aktive und passive Sicherheit besonders im Vordergrund. Technische Kunststoffe, faserverstärkte Verbundwerkstoffe und hybride Kunststofftechniken leisten dabei wichtige Schrittmacherdienste.

Multifunktionswerkzeuge und automatisierte Verarbeitungsprozesse ermöglichen in vielen Fällen besonders wirtschaftliche Systemlösungen. Neuartige additive Fertigungsverfahren haben bereits heute ein großes Potenzial, vor allem bei Kleinserien individuelle maßgeschneiderte Bauteilkonzepte realisieren zu können.

Innovationen in der Kunststofftechnik beeinflussen direkt die fahrzeugtechnischen Konzepte von morgen. Multimaterial-Design, Mischbauweisen, flächige Heizsysteme für Elektrofahrzeuge, folienhinterspritzte Formteile, folierte Fahrzeugaußenteile, sowie kunststoffbasierte Leuchtfolien und Hintergrundbeleuchtungen ermöglichen maßgeschneiderte Systemlösungen im Pkw- und Nutzfahrzeugbau und sichern so langfristig die internationale Wettbewerbsfähigkeit in der Kunststoff- und Automobilbranche ab.

Der Verein Deutscher Ingenieure lädt für den 9. und 10. März 2016 nach Mannheim ein zum internationalen kunststofftechnischen Jahreskongress „Kunststoffe im Automobilbau 2016“. Strategische Übersichtsvorträge aus Markt und Forschung, technische Berichte über Kunststoffinnovationen aus dem Pkw- und Nutzfahrzeugsbereich, sowie Praxisberichte aus der Kunststoffverarbeitung informieren ausführlich über den heutigen technischen Stand zur Kunststofftechnik im Automobilbau. Eine Fachaussstellung von Kunststoff- und Maschinenherstellern sowie ein angegliederter Automobilsalon mit aktuellen Pkws und Nutzfahrzeugen ermöglichen den Fachaustausch am Objekt.

Seien Sie uns herzlich willkommen in Mannheim!
Prof. Dr. Rudolf C. Stauber

Inhalt

Plenum

Die Leichtigkeit des Designs – Potenziale des Leichtbaus für Konstruktion und Oberflächen in der Architektur

Prof. Dr.-Ing. G. Henn, Henn GmbH, Berlin und München

1

Interieur

Anspruchsvolle Oberflächen und Leichtbau in der Instrumententafel des neuen Volkswagen Tiguan

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (TU) R. Mielke, Dipl.-Ing. (FH) P. Dierks, Volkswagen AG, Wolfsburg

5

3D Simulation für den Leichtbau in der kunststoffverarbeitenden Industrie

Dipl.-Ing. M. Kurz, Prokurist SimpaTec GmbH, Reutlingen

19

Neuartige PUR-Oberflächen – Selbstheilend und mehr

Dr.-Ing. I. Kleba, J. Emig, Rühl Puromer GmbH, Friedrichsdorf

31

Exterieur

Mono-polymer lift-gate solution cuts CO₂ emissions

*G. Liraut, Renault sas, Guyancourt Cedex, France;
A. Tebib, Trinseo, Paris La Défense, France*

47

Class A Compression-Molded Carbon-Fiber Hood – Development and production of the Cadillac ATS-V and CTS-V Hood

*Dr. J. J. Laux, Magna Management, Cham, Switzerland;
H. Moore, Polycon Industries, a Division of Magna Exteriors Corp., Guelph, ON, Canada;
J. Ingram, Magna Exteriors Corp., Concord, ON, Canada;
J. Kowalski, Magna Exteriors Corp., Troy, MI, USA*

61

Perspektiven der polymeren Verglasung im Automobil – Potenziale von Polycarbonat ermöglichen den Einsatz in Seiten- und Heckscheiben

H. Schmidhuber, Webasto Roof & Components SE, Stockdorf

69

Struktur

Carbon Core – Composite Einsatz in der Karosseriestruktur des BMW 7er
Dipl.-Ing. (FH) M. Derks, BMW AG München 87

Injection-Molded Carbon-Fiber Grille Opening Reinforcement – Development and production of the 2016 Ford Mustang Shelby GT350 GOR
Dr. J. J. Laux, Magna Management, Cham, Switzerland;
L. Vanin, Plastcoat, a Division of Magna Exteriors Corp., Brampton, ON, Canada;
S. Grgac, Magna Exteriors, Concord, ON, Canada;
G. Schalte, Magna Exteriors, Troy, MI, USA 95

Simulation

Determination of thermal damages undergone by plastic parts in stochastic environments: application to air ducts
L. Gervat, M. Lacuve, J. M. Fiard, G. Gauge, F. Bekaert,
Renault Technocentre, Guyancourt, France 107

Berechnung von Kunststoffen im Crash bei Volkswagen – Anforderungen an sicherheitsrelevante Kunststoff-Bauteile
Dipl.-Ing. (FH) E. Glas, Dr.-Ing. L. Greve, Dipl.-Ing. O. Steiln, J. Čopík (M.Sc.),
Dipl.-Phys. R. Flögel, Volkswagen AG, Wolfsburg 121

Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von Langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation
L. Schulenberg, J. Lienhard, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg;
Dr. D. Niedziela, I. Shklyar, Dr. K. Steiner, Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern;
Dr.-Ing. B. Lauterbach, Adam Opel AG, Rüsselsheim 133

Motor & Technik

Neuentwicklung SCR-Tank-Systeme: Werkstoffe, Funktionen, Prozesse
Dipl.-Ing. T. Rösch, Veritas AG, Gelnhausen;
Dipl.-Ing. U. Remmele, Daimler AG, Sindelfingen 163

Erstes Kunststoff-Ölwannenmodul im 911-Carrera – Leichtbau und System-Integration
Dipl.-Ing. (FH) J. Soares, Polytec Group, Lohne;
Dipl.-Ing. A. Misala, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach 169

Plastic oil pan design for an optimized gasoline engine – Project management of novelty by failure mode analysis
J. M. Fiard, J. M. Cardona, Renault, Guyancourt, France;
P. Gauquie, Mécaplast, Lens, France 187

Werkstoffe & Technologie

Wärmeleitfähigkeit – Geht das? Wärmemanagment in Thermo- und Duroplasten

Dipl.-Ing. T. Hilgers, Quarzwerke GmbH, Frechen

197

Effizienter Ansatz zur Entwicklung von Faserverbundwerkstoffen

Dr.-Ing. T. Müller, BMW Group München

209

Das innovative "Hybrid Fleece Molding (HFM)" Konzept als nachhaltige Alternative im direkten Serienvergleich mit dem Türträger für den Volvo XC90

*Dipl.-Ing. (FH) F. Schumann, Dipl.-Ing. R. Ankele, IAC Group GmbH, Ebersberg;
M.Eng. F. Jürgens, IfBB, Prof. Dr.-Ing. H-J. Endres, IfBB, Hochschule Hannover*

217

Thermoplastische Crashabsorber aus PC/PBT (Makroblend®) als Teil des Seitenschutzkonzept des BMW i3

*Dipl. Ing. (FH) E. Meurer, Covestro Deutschland AG, Leverkusen;
Dipl. Ing. (FH) M. Hanigk, BMW AG, München*

229

Lokale Endlosfaserverstärkungen in der Serienfertigung

*Dr. rer. nat. B. Pfeiffer, Celanese AG, Sulzbach;
Dipl.-Ing. S. Tönnies, Ford Motor Company, Köln*

243

Leichtbau

Neue Fertigungstechnologie für Werkstoff-Hybrid-Leichtbau-Lösungen am Beispiel einer FVK-Metall-Hybridbodenstruktur

*Dr.-Ing. Dipl.-phys. O. Täger, Dipl.-Ing. F. Häusler,
Dipl.-Ing. J. Lohmann, Volkswagen-Konzernforschung, Wolfsburg;
Prof. Dr.-Ing. N. Modler, Dipl.-Ing. T. Weber, TU Dresden, Dresden*

251

Entwicklung einer Leichtbau I-Tafel-Tragstruktur – Werkstoff- und Fertigungskonzept des I-Tafel-Tragrohres aus langglasfaserverstärktem teilaromatischen Polyamid für den BMW M4 GTS

*Dipl.-Ing. R. Krischke, Dipl.-Ing. R. Poltrock, BMW AG, München;
Dipl.-Ing. S. Stein, BMW AG, Landshut*

263

Consideration of local thicknesses within finite element simulation of injection molded thermoplastics

Dipl.-Ing. M. Franzen, Dr.-Ing. O. Ghouati, Ford Werke GmbH, Aachen

283

Industrie 4.0

Werkzeugsensorik in der vernetzten Spritzgiessfertigung – Eine Voraussetzung für Industrie 4.0

Dr.-Ing. R. Vaculik, Kistler Instrumente AG, Winterthur

295

Plenum

Tanksysteme aus Kunststoff, Energieträger für zukünftige Fahrzeugkonzepte

Dr.-Ing. U. A. Karsch, Kautex Textron, Bonn

301

Rahmenbedingungen für die Anwendung von Kunststoffen/ Framework Conditions for Plastic Applications

Study of lightweight applications in truck development – Metal replacement of a headlamp frame by a thermoplastic

A. van den Einden, P. van der Velden,

DAF Trucks N.V., Eindhoven, Netherlands

319

Treibhausgasfußabdruck von Lastkraftwagen

Henryk Gräser, MAN Truck & Bus AG, München

327

Kosteneffizienter Leichtbau

Nutzfahrzeuge aus CFK – vom Prototyp zur Serie

Dr.-Ing. R. Kaiser, TTT The Team Composite AG, Stade

329

Leichtbau durch Multi-Material-Systeme – Strukturelle Kabinenbauteile aus endlosfaserverstärktem thermo-plastischen Kunststoff (Organoblech) mit PUR-Außenhaut in "Class A"-Qualität

A. Spiegel, M.Eng., EDAG Engineering GmbH, Fulda;

Dipl.-Ing. (BA) S. Schmidhuber, KrausMaffei Technologies GmbH, München;

Dr. U. Fehrenbacher, Rühl Puromer GmbH, Friedrichsdorf

341

Kunststoffe im Fahrwerk

CFK Luftfederträger für Reisebusse – Machbarkeitsstudie

Dipl.-Ing. (FH) S. Rübsamen, Dipl.-Ing. (FH) H. Häberle, MAN Truck & Bus AG, München; Dipl.-Ing. (FH), Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) N. Elbs, MAN Truck & Bus AG

343

Potenzial zur Gewichtsreduktion in Nutzfahrzeugen – Luftfedern mit Abrollkolben aus glasfaserverstärktem Kunststoff

Dipl.-Ing. H. Gawinski, Dipl.-Ing. E. Neitzel, Dipl.-Betriebswirt, D. Bauch, ContiTech Luftfedersysteme GmbH, Hannover

353

Auslegung und Fertigung von Blattfedern aus Faserverbundwerkstoffen für den Einsatz in schweren Nutzfahrzeugen – Besonderheiten und Herausforderungen

Dipl.-Ing. H. Kempe, IFC Composite GmbH, Haldensleben

371

Rahmenbedingungen für die Anwendung von Kunststoffen

Neue Möglichkeiten zur schnellen und individuellen Strukturierung von Werkzeugoberflächen Laserlack im Werkzeug

Dipl.-Ing. M. Gehlen, Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft NRW GmbH, Lüdenscheid

373

Emissionsoptimierte Kompositmaterialien für die Laufflächen runderneuerter Nutzfahrzeugreifen mit recyceltem Feingranulatanteil – EKORUND

Prof. Dr. M. Beiner, Fraunhofer IMWS, Halle (Saale)

383

Die Leichtigkeit des Designs

Potenziale des Leichtbaus für Konstruktion und Oberflächen in der Architektur

Prof. Dr.-Ing. **G. Henn**, Henn GmbH, Berlin und München

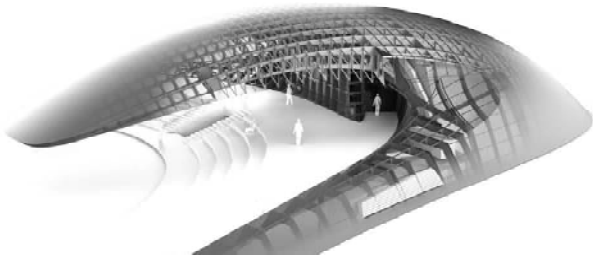
Kurzfassung

- Monocoque-Konstruktion als raumbildende Hülle
- Tragwerk und Oberflächen im Hochhausbau
- Minimalflächenbasierte Hochhausstrukturen

„Monocoque-Konstruktion als raumbildende Hülle“

Der Porsche Pavillon in der Autostadt Wolfsburg

Linien und Kurven machen den Pavillon zu einer dynamischen und reduzierten Skulptur, deren Charakteristika sich aus dem Markenbild des Fahrzeugherstellers ableiten. Einheitliche, matte Edelstahlbleche umhüllen fugenlos den Baukörper. Ähnlich wie in der Monocoque-Bauweise, die im Leichtbau der Automobil- und Flugzeugindustrie angewandt wird, übernimmt die raumbildende Hülle des Bauwerks tragende Funktion. Insgesamt wurden 620 Deckenbleche aus Edelstahl mit aussteifenden Spanten verschweißt, in einer Schiffswerft in Stralsund vorgefertigt und vor Ort montiert.



„Tragwerk und Oberflächen im Hochhausbau“

Der Haikou Tower, Hainan

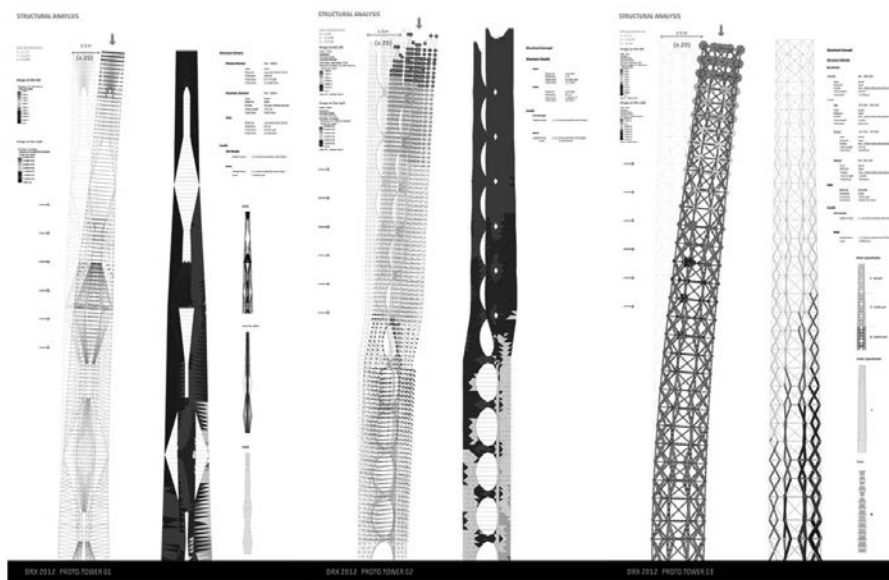
Der 450 Meter hohe Haikou Tower soll zum Herzstück des neuen Business District von Haikou werden, auf der Insel Hainan im Südchinesischen Meer. Form und Struktur des Turms sind unmittelbar durch die räumlichen Anforderungen des Programms beeinflusst. Die Büroflächen im unteren Teil sollen flexibel und großzügig sein, die Hotelzimmer im oberen Teil einen ungestörten Blick nach außen ermöglichen. Die aussteifende Struktur macht die Verbindung von Programm und Tragwerk deutlich. Die Gesamthöhe von 450 Metern erfordert zudem ein intelligentes hoch-performatives adaptives Fassadendesign, das je nach Ausrichtung der Fassade auf unterschiedliche Sonneneinstrahlung reagiert.



„Minimalflächenbasierte Hochhausstrukturen“

DRX Design Research Exchange

Minimalflächen, zahlreich in der Natur vorhanden, haben ein enormes Potential für die Anwendung im Entwurf von hohen Gebäuden, da sie Struktur, Material & Form integrieren. Diese Faktoren führen dazu, dass minimalflächenbasierte Tragwerke eine ernstzunehmende Alternative zu herkömmlichen Nachhaltigkeitskonzepten darstellen können.



Anspruchsvolle Oberflächen und Leichtbau in der Instrumententafel des neuen Volkswagen Tiguan

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (TU) **R. Mielke**, Dipl.-Ing. (FH) **P. Dierks**,
Volkswagen AG, Wolfsburg

- 1 Einleitung**
- 2 Best in Class Oberflächen**
 - 2.1 Technische Narbe**
 - 2.2 Lasernarbe**
 - 2.3 Abdeckung HUD**
- 3 Innovativer Leichtbau in Serie**
 - 3.1 Integrierter Beifahrerairbag**
 - 3.2 Leichtbaukonzept einteiliger Grundkörper**
 - 3.3 Dichtereduzierte Sprühhaut**
- 4 Fazit**

1 Einleitung

Die seit 2007 produzierte erste Generation des Volkswagen Tiguan ist mit über 2,8 Million verkauften Fahrzeugen ein großer Erfolg. Das Segment der Compact SUV wird weltweit in den nächsten Jahren nach Volkswagen Prognosen weiterhin stark wachsen. Hierdurch ergibt sich eine hohe Erwartungshaltung an den 2015 auf der IAA der Weltöffentlichkeit präsentierten neuen Tiguan, das erste SUV im Volkswagen Konzern auf der Plattform des sogenannten Modulare Querbaukasten (MQB). Um die ehrgeizigen Ziele erreichen zu können, wurden hohe Ansprüche an die Entwicklung der Instrumententafel des neuen Tiguan gestellt. Das betrifft neben den Bereichen Sicherheit, Bedienkomfort und Qualität besonders die Bereiche Oberflächenanmutung und Leichtbau bei gleichzeitig hohem Kostenbewusstsein. Hierbei wurden bei der Entwicklung des neuen Tiguan einige neue Technologien und Konzepte entwickelt und erfolgreich in Serie umgesetzt.

2 Best in Class Oberflächen

2.1 Technische Narbe

In den Oberflächenstrukturen von Kunststoffbauteilen in Fahrzeuginnenräumen dominieren aktuell Abbildungen von echtem Leder, sogenannte Ledernarben. Das Naturprodukt Lederhaut hat eine unregelmäßig gewachsene Oberflächenstruktur. Somit ist es unempfindlich gegen Oberflächenunruhen, beispielsweise Ungleichmäßigkeiten in den Kunststoffbauteilen. Geometrisch ausgerichtete Oberflächenstrukturen, welche als technische Narbung bezeichnet werden, haben durch den ihnen eigenen gleichmäßigen Verlauf diesen Vorteil nicht. Abweichungen der Regelstruktur können vom menschlichen Auge leichter erfasst werden, so dass Ungleichmäßigkeiten aus dem Herstellprozess schneller auffällig sind. Aus diesem Grund wird die gerichtete Oberflächenstruktur nur bei höchster Entwicklungs- und Fertigungsgenauigkeit eingesetzt. Um die vorhandene Qualitätsanmutung der Instrumententafel des neuen Volkswagen Tiguan zu unterstreichen, ist nun erstmalig der vordere Bereich mit einer technischen Narbung als Oberflächenstruktur versehen.

Bei der Auswahl der Narbung standen die Dimples auf der Oberfläche eines Golfballs Pate. Ebenso wie die Dimples die Aerodynamik des Golfballs stark verbessert, so unterstreicht die technische Narbung die Designsprache einer „dynamischen Schalttafel“. Zudem verkörpert ein Golfball neben den Attributen Sportlichkeit, Präzision und Wertigkeit technischen Eigenschaften wie Robustheit, Festigkeit und Stabilität. Für diese Eigenschaften steht der neue Tiguan.

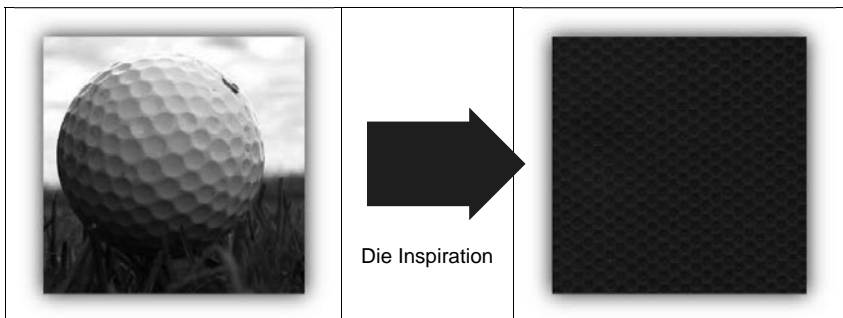


Bild 1: Inspiration der Narbung

2.2 Lasernarbe

Die Abbildung einer Narbstruktur auf der Instrumententafel erfolgt klassischerweise über das so genannte Belederungsmodell. Dieses ist ein Hilfsmittel zur Erstellung der Galvanoschalen, dem Werkzeug für die Herstellung der Instrumententafelhaut. Hierbei wird das Modell mit einem Kunstleder mit der gewünschten Narbstruktur händisch bezogen (Abbildung 2).

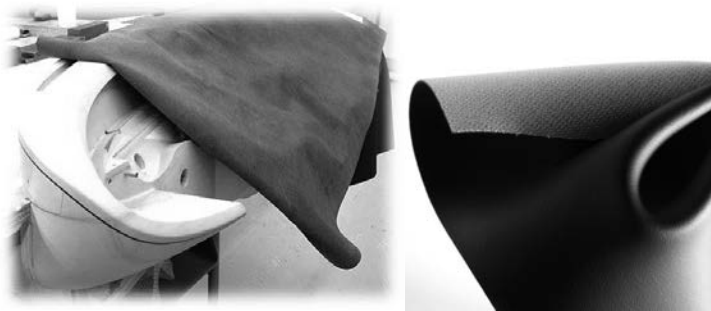


Bild 2: Kaschierung Belederungsmodell mit Kunstlederfolie

Über einen Abformprozess mit einem Negativ wird das Muttermodell erzeugt. Das Muttermodell ist das Urmuster und somit die Basis aller später erzeugten Galvanoschalen für die Serienproduktion der Instrumententafelhaut (Abbildung 3).

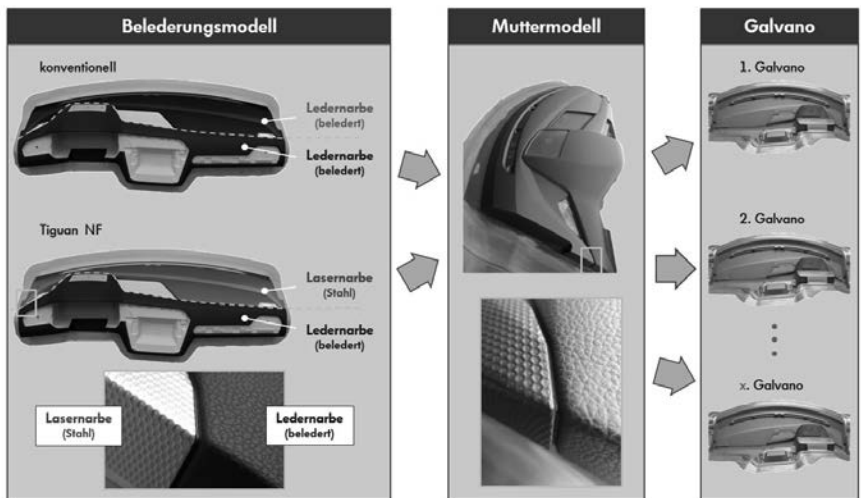


Bild 3: Prozessschritte Belederungsmodell bis Galvano

Die Einbringung der technischen Narbung im vorderen Bereich der Instrumententafel des neuen Tiguan erfolgt mittels eines Lasers. Die Laserung erfolgt nicht auf dem Bauteil oder im Werkzeug, sondern auf dem einen Teil des Belederungsmodells, dem Stahlkern. Hierzu wurde das Belederungsmodell geteilt in den mit einer Ledernarbe bezogenen Bereich und den Bereich der Lasernarbe. Diese wird mittels eines 5 - Achsen Festkörperlaser in den gefrästen Stahleinsatz eingebracht. Dieser Einsatz wird später mit dem lederkaschierten Teil zum fertigen Belederungsmodell verheiratet. Auf einen klassischen Narbgraben kann durch direktes Schließen der Übergangsstelle der beiden Narbbereiche verzichtet werden. Dieses generiert im Styling der Übergangsbereiche neue Freiheitsgrade.

Gegenüber einer klassischen Abformnarbe bietet die Lasernarbe mehrere Vorteile.

Mappingprozess

Bei der Belederung des Modells mittels Rollenware kann die Narbung nur die Ausrichtung entsprechend der Laufrichtung der Rolle haben. Anpassungen an die spezifische Designgeometrie sind nicht möglich. Hierdurch können an Kanten und Fugen unerwünschte Effekte wie Verstreckungen auftreten.

Im Gegensatz dazu sind bei der Lasernarbung Anpassungen an die Kontur des Bauteiles möglich. Dies erfolgt beim Mappingprozess. Die Ausrichtung der Oberflächenstruktur wird vor der Einbringung in den Stahleinsatz virtuell designt. Die exakte geometrische Struktur einer technischen Narbe wird so angepasst und modelliert, dass diese unterhalb der sichtbaren Schwelle auf einzelne Kanten hin optimiert wird. Dies erfolgt mit dem Ziel eines harmonischen Kantenverlaufs. Beim neuen Tiguan wurde dies wie in Abbildung 4 gezeigt umgesetzt. Die Möglichkeit für virtuelle Abnahmen mit gerichteten realen Oberflächenstrukturen ist ein weiterer Vorteil des Mappingprozesses.

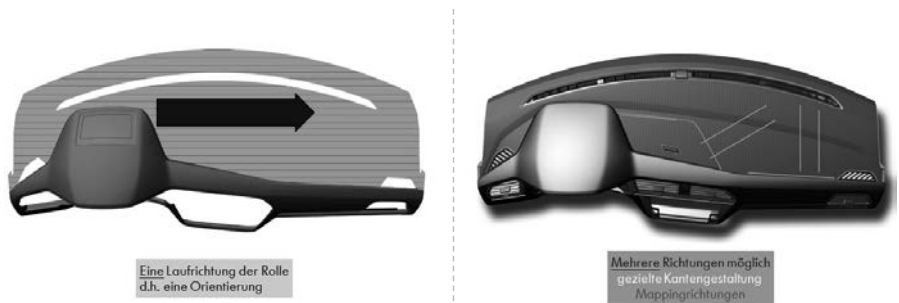


Bild 4: Vergleich Ausrichtung Narbstruktur klassische Beleuchtung und Mappingprozess

Abflachungen

Um Sägezahnffekte an engen Radien zu vermeiden, können durch die Lasernarbung die Narbtiefe und Narbausprägung situativ angepasst werden. So wird bei konvexen Kurven und spitzen Winkeln die Narbtiefe für einzelne Bereiche stufenlos eingestellt, ohne der Narbung die Tiefe und den Charakter zu nehmen. (Bild 5)

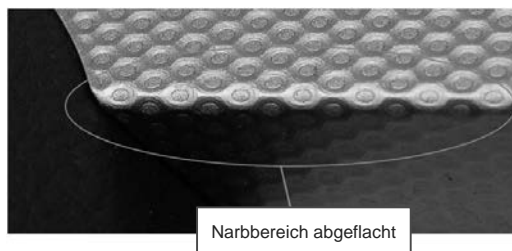


Bild 5: Abflachungen der Narbung

Präzision

Ätznarben arbeiten mit einer niedrigen einstelligen Anzahl von Schichten beim Narben. Die Kanten werden durch das Ätzen prozessbedingt verrundet. Der Lasernarbprozess hingegen erfordert keine großen Radien, sondern lässt eine freie Gestaltung zu. Der individuelle Aufbau der Lasernarbe kann in Abständen von 3µm zwischen den Schichten (Layern) erfolgen. Durch die hohe zweistellige Anzahl von solchen Layern ermöglicht die Lasernarbung eine große Narbpräzision und Oberflächenprägnanz.

2.3 Abdeckung HUD

Der neue Tiguan bietet als erstes Compact Fahrzeug des Volkswagen Konzerns ein Head-up-Display (HUD) an. Dabei werden wichtige Informationen, wie Warnungen, Fahrdaten und Routeninformationen, über mehrere Spiegel so ins Blickfeld des Fahrers projiziert, dass der Eindruck entsteht, das Bild stehe rund 2 m vor dem Fahrzeug. Dies ist ein weiterer wichtiger Beitrag für mehr Sicherheit und mehr Fahrkomfort. Der letzte Spiegel, die Combiner genannte Projektionseinheit, lässt sich bei Nichtgebrauch in der Schalttafel versenken. Dazu besitzt die Instrumententafel eine motorisch angetriebene Kunststoffabdeckung, welche diesen Bereich vollständig schließt und so vor Verschmutzung und Beschädigung schützt. Bei Benutzung des HUDs fährt die Abdeckung in die Hülse der Instrumententafel ein. Hierfür nutzt sie den geringen Bauraum perfekt aus. Die Integration des HUDs inklusive verfahrbarer Abdeckung in die Schalttafelarchitektur erfolgt unter Sicherstellung bestehender Funktionalitäten wie Crashverhalten, Bauteilstabilität bei allen klimatischen Bedingungen, Innenraum- und Scheibenbelüftung. Gemeistert wurde diese Herausforderung unter Beibehaltung der gleichen Struktur der Instrumententafel, so dass die Bauteile Grundkörper, Luftführungen und der Träger der Schalttafel Gleichteile zur Basisvariante ohne HUD sind. Ergebnis ist ein Konzern-Modul, welches Investitionen reduziert und die Demokratisierung dieses neuen Features HUD auch bei geringeren Einbauraten je Fahrzeugprojekt ermöglicht.

Ein wichtiger Treiber bei der Entwicklung der Abdeckung war der Wunsch nach einer harmonischen Oberfläche der Instrumententafel ohne störende Aufbauten und Vertiefungen bei Nichtgebrauch des Head-up-Displays. Neben dem ästhetischen Vorteil reduziert dies störende Spiegelungen in der Frontscheibe bei ungünstigen Lichtbedingungen. Dazu wurden die Deckelgröße, die Breite des außenliegenden Rahmens und Fugengrößen optimiert. Die Abdeckung ist so in die Schalttafel integriert, dass aus Fahrersicht die Abdeckung unsichtbar ist und so die Stringenz der Formsprache unterstreicht.

Die Abdeckung des Head-up-Displays besteht aus den in Abbildung 6 gezeigten Bauteilen. Motorisch einseitig angetrieben überträgt eine Achse die Kraft über zwei Zahnräder auf die beiden Zahnkurven an den beiden Deckelseiten. Durch den doppelseitigen Antrieb des Deckels wird dessen Gleichlauf sichergestellt und ein Verkanten des Deckels in der Führungsbahn vermieden. Der doppelseitige Antrieb ermöglicht somit minimalen Bewegungsfugen. Die beiden Kunststoffzahnräder und teilweise die Kunststoffzahnstange sind in Evolventenform ausgeführt. Dies ermöglicht ein minimales Zahnflankenspiel und minimiert die Verfahrgeräusche des Deckels.

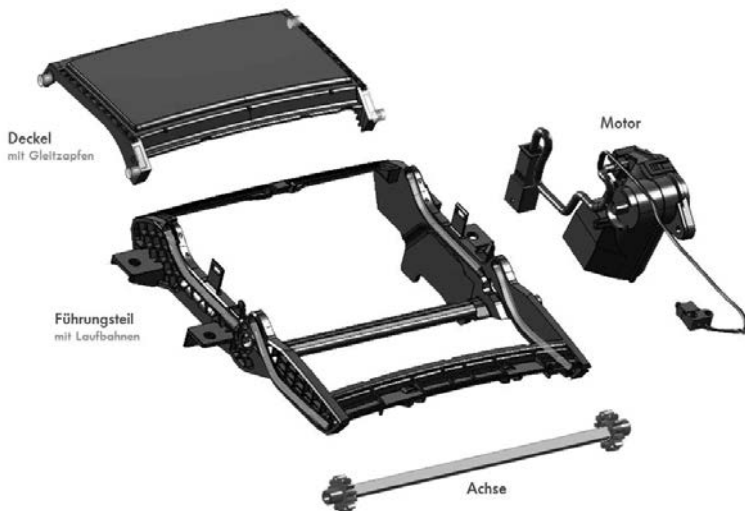


Bild 6: Explosionsdarstellung HUD

Für den reibungslosen Gebrauch sind in der Abdeckung insgesamt vier verschiedene Kunststoffe im Einsatz, wobei jeder einzelne perfekt auf seine Aufgabe abgestimmt ist. Das Führungsteil, über alle Temperatureinsatzbereiche verwindungssteif ausgelegt, ist die Schnittstelle zur Instrumententafel und nimmt den verfahrbaren Deckel in sich auf. Aus diesen Gründen ist es als Zwei-Komponenten (2K) Bauteil gestaltet. Als erste Materialkomponente ist glasfaserverstärktes Polycarbonat/Acrylnitril-Butadien-Styrol (PC/ABS) gewählt. An die Laufbahnen für den Deckel werden höchste Anforderungen bezüglich Steifigkeit, Maßhaltigkeit auch unter Klimaeinfluss, Reibung und Verschleißfestigkeit gestellt. Deshalb wird für die

Deckellaufbahn als zweite Materialkomponente Polybutylenterephthalat (PBT) eingesetzt. Neben den eben genannten Anforderungen gibt es auch für den verfahrbaren Deckel besondere Anforderungen. Da sich dieses Bauteil im Sichtbereich befindet, muss es sich optisch harmonisch und bei Sonneneinstrahlung reflektionsarm in die Umgebung einpassen. Hierzu ist es ebenfalls als 2K- Bauteil gestaltet. Die Hauptkomponente bildet ein PC/ABS lackiert. Die Gleitzapfen, welche in den Laufbahnen des Führungsbauteils eingreifen, müssen besonders abgestimmt sein und einen niedrigen Reibungskoeffizient und eine hohe Abriebfestigkeit besitzen. Daher wurde Polyoxymethylen (POM) als zweite Komponente für den Deckel gewählt.

3 Innovativer Leichtbau in Serie

3.1 Integrierter Beifahrerairbag

Die Realisierung großserientauglicher Leichtbaukonzepte findet Anwendung in allen Bereichen der Schalttafel des neuen Tiguan.

Die erste große Säule der Leichtbauentwicklung ist die Gestaltung des Instrumententafelumfeldes des Beifahrerairbags. Hierbei ist das zentrale Element der Airbagschusskanal. Dessen Aufgaben sind die sichere Befestigung des Airbagmoduls und die zuverlässige Führung des Luftsacks im Falle der Airbagauslösung. Somit ist der Airbagschusskanal die Schnittstelle zur Airbagöffnung in der Instrumententafel. Diese Aufgaben sind über Fahrzeuglebenszeit und unter allen extremen Witterungsbedingungen zu gewährleisten.

In der Evolution vom mehrteiligen Metallschusskanal, über den separat angeschweißten Kunststoffschusskanal zu dem im neuen Tiguan direkt angespritzten integrierten Kunststoffschusskanal sind seit der letzten Fahrzeuggeneration 650g Gewicht eliminiert worden. Abbildung 7 veranschaulicht die einzelnen Stufen der Gewichtsreduktion bei gleichzeitiger Prozessvereinfachung und Teilereduzierung.

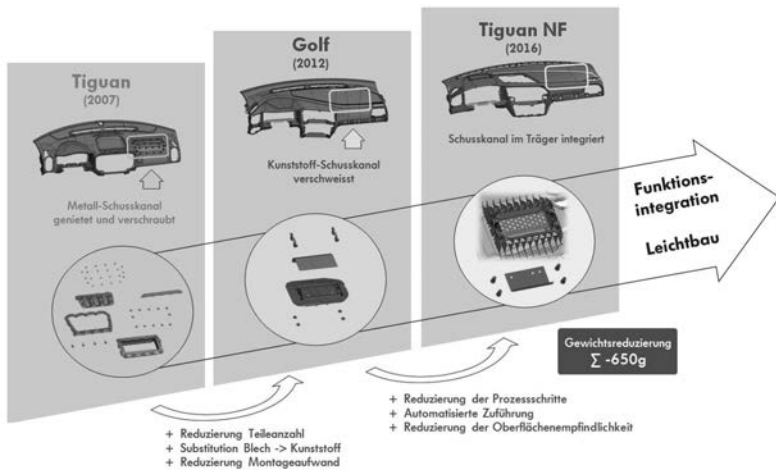


Bild 7: Airbagschusskanalevolution

Bei dem aktuellen Evolutionsschritt wird der ehemals separate Kunststoffschusskanal in den Schaumträger zu einem Bauteil integriert. Hierbei wird in das flächige Bauteil ein Bauteil mit hohen Craschanforderungen eingepasst. Durch die ungleiche Verteilung der Kunststoffschmelze zwischen diesen beiden Bereichen ist das verzugsfreie Spritzgießen die besondere Herausforderung. Hierfür notwendig ist eine bedarfsgerechte Gestaltung der Funktionselemente des Schusskanals. Im Airbagschuss stark beanspruchte Bereiche sind durch ein präzise ausgelegtes Rippenpaket so verstärkt, wie es die jeweilige lokale Belastung erfordert. Mit Hilfe von FEM Berechnungen konnten außerdem Teilbereiche der nun integrierten Schusskanalgeometrie gewichtsoptimiert reduziert werden. Parallel zu dieser belastungsgerechten Auslegung des Bauteils wurde die Entwicklung des Anspritz- und Kühlkanalsystems durchgeführt. Die Bauteilgeometrie des integrierten Kunststoffschusskanals wurde somit sowohl belastungs- als auch fertigungsgerecht gestaltet.

Der Schaumträger der Schalttafel besteht aus glasfaserverstärktem Polypropylen und wird mit dem Ziel Leichtbau physikalisch aufgeschäumt. Hierzu wird während des Spritzgussprozesses eine Stickstoff- Beladung der Kunststoffschmelze zugeführt. Neben der Gewichtsverringerung bietet dieses Verfahren Vorteile, da auf einen klassischen Nachdruck verzichtet werden kann. Dies gibt dem Bauteil eine hohe Dimensionsstabilität und reduziert die Verzugseigung.

Neben den erläuterten Leichtbaueffekten kommt durch die Ausführung des integrierten Kunststoffschusskanalsystems eine starke Vereinfachung bzw. zum Entfall von Prozessschritten gegenüber dem Vorgängermodell sowie dem Wettbewerbsumfeld zum Tragen. Die Befestigung des Airbagmoduls in dem integrierten Schusskanalsystem des neuen Tiguan erfolgt mit Hilfe von im Werkzeug eingelegten, direkt umspritzten Metallbuchsen. Aus mehreren verschraubten, vernieteten und verschweißten Einzelteilen aus Metall ist ein Bauteil mit direkter Integration der Befestigungselemente durch Einlegen und Positionieren in das Spitzgusswerkzeug entstanden.

3.2 Leichtbaukonzept einteiliger Grundkörper

Neben der Integration des Airbagschusskanals in den Schaumträger der Instrumententafel ist der Einsatz eines einteiligen Grundkörpers maßgeblich für den Leichtbaueffekt verantwortlich. Das bisherige Serienkonzept zeigt einen zweiteiligen Aufbau mit drei zusätzlichen Luftführungsbauteilen, die ebenso verschweißt werden müssen wie die beiden Strukturbau- teile. Hierfür werden die Luftführungen für die Personenanströmer separiert von der Struktur und über separate Luftkanäle aus Polyethylen (PE) - Schaum dargestellt. Die Konzeptentwicklung des alten zum neuen Tiguan zeigt Abbildung 8.

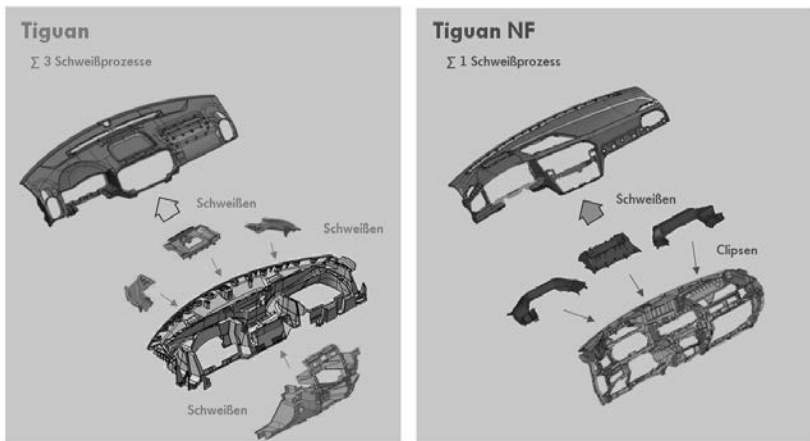


Bild 8: Vergleich der Grundkörperkonzepte

Eine besondere Herausforderung stellt die Werkzeuggestaltung mit den aus sehr differenten Funktionsanforderungen resultierenden Entformvektoren dar. Die verschiedenen Anforderungen resultieren aus den Vorgaben für den Fußgängerschutz, der Montagefähigkeit, das Defrosten der Windschutzscheibe, die Aufnahme der Infotainmentgeräte sowie die Befestigung weiterer Anbauteile, z.B. Handschuhkasten. Es ist gelungen, durch den Einsatz unterschiedlichster Schieberkonzepte alle technischen Anforderungen zu erfüllen und in Großserie umzusetzen (Abbildung 9).

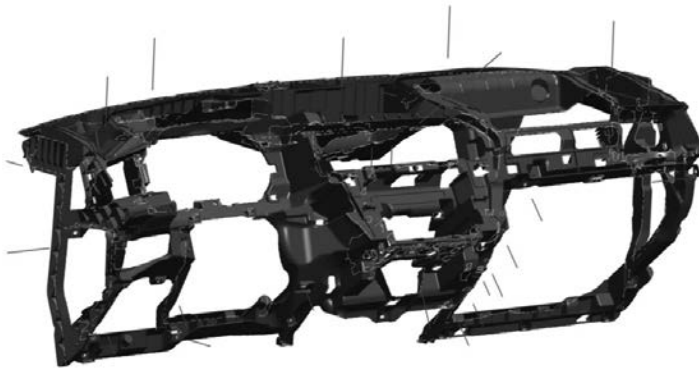


Bild 9: Schieberrichtungen Grundkörper

Durch die Verwendung der Schaumkanäle ergibt sich zusätzlich ein positiver Effekt für die Fahrgastakustik. Die Schallabsorption sowie die Dichtigkeit gegen Leckluftverluste der Schaumkanäle gegenüber herkömmlichen Spritzgussbauteilen sind deutlich verbessert. Außerdem können die erforderlichen Querschnitte durch eine optimierte Bauraumnutzung gegenüber Spritzgussbauteilen im Sinne des Kundennutzens erhöht werden. Die Gesamtkonzeption des Grundkörpers inkl. Schaumluffführung vereint innovativen Leichtbau bei gleichzeitiger Integration zusätzlicher Funktionen.

3.3 Dichtereduzierte Sprühhaut

Die dritte Leichtbausäule der neuen Tiguan Instrumententafel sind das Material und der Herstellungsprozess der Haut als Oberfläche der Instrumententafel.

Die Oberfläche wird durch einen dreischichtigen Verbund aus Schaumträger, Polyurethan-Schaum und Haut gebildet. Dieser Aufbau für eine haptisch weiche Schalttafel wird im klassischen Fall häufig durch eine Polyvinylchlorid (PVC) - Slushhaut oder eine Polyurethan (PU) - Sprühhaut als oberste Schicht gebildet. Dabei ist die oberste Haut eine einschichtige Folie von rund 1,0 mm – 1,5 mm Stärke. Der neue Tiguan hat als Instrumententafelfolie eine PU - Sprühhaut. Durch den Sprühprozess bei der Fertigung der PU-Folie kann die Wandstärke partiell reduziert und so auf den jeweiligen Bedarf gezielt eingestellt werden. Dies führt zu einer Gewichtsersparnis gegenüber einer PVC Haut, die fertigungsbedingt eine konstante Wandstärke aufweist und deren Minimaldicke anhand der maßgebenden Stelle auf das Gesamtbauteil übertragen werden muss. Bei der Sprühhaut kann im Gegensatz dazu an besonders beanspruchten und kritischen Stellen die Wandstärke punktuell erhöht werden. Dadurch wird die Eigensteifigkeit und Konturtreue der Haut verbessert, so dass auf zusätzliche Maßnahmen wie Einleger und Drahtrahmen verzichtet werden kann. Dies führt zu einer weiteren Gewichtsreduzierung. Im Falle des neuen Tiguan ist die PU-Sprühhaut zweischichtig aufgebaut. Die Deckschicht besteht aus einem aliphatischen Polyurethan. Diese Schicht zeichnet sich neben der guten Witterungsbeständigkeit und der Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung durch ihr gutes Aufreißverhalten im Airbagschuss aus. Unterhalb liegt nicht sichtbar eine geschäumte aromatische Polyurethanschicht. Aufgabe dieser zweiten PU Schicht ist es, die obere Schicht bei mechanischer Beanspruchung zu unterstützen. Gleichzeitig ist die Dichte reduziert, so dass sich eine weitere Gewichtseinsparung ergibt (vgl. Abbildung 10).

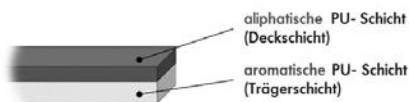


Bild 10: Aufbau der PU- Sprühhaut im neuen Tiguan

4 Fazit

Die Instrumententafel des neuen Tiguan zeigt im Bereich Oberflächenanmutung und Leichtbau neue Wege auf. Mit dem Einsatz einer Lasernarbung zur Abbildung einer geometrischen technischen Oberflächenstruktur konnte eine Innovation in automobiler Großserie umgesetzt werden, die neue Möglichkeiten in Bezug auf Designfreiheit und Präzision bietet. Die Kinetik zur Abdeckung des Head-up-Display ermöglicht eine harmonische Oberfläche der Schalttafel. Durch die Leichtbaumaßnahmen der Instrumententafel des neuen Tiguan wurde eine Gewichtseinsparung von über zwei Kilogramm gegenüber dem Vorgängermodell erreicht. Hierbei tragen die Integration des Airbagschusskanals, die Konzeptänderung der Tragstruktur mit Luftführung und die Auswahl der Oberflächenhaut einen wesentlichen Teil bei.

3D Simulation für den Leichtbau in der kunststoffverarbeitenden Industrie

Dipl.-Ing. **M. Kurz**, Prokurist SimpaTec GmbH, Reutlingen

Kurzfassung

Das Jahr 2020 steht im besonderen Fokus der Automobilindustrie.

Die EU hat sich bis dahin verpflichtet, im Vergleich zum Jahr 1990 die Treibhausgasemissionen um mindestens 20% zu reduzieren. Da das Verkehrsaufkommen gut $\frac{1}{4}$ der gesamten CO₂ Emissionen verursacht, erzeugt eine besondere Verantwortung in diesem Bereich. Knapp die Hälfte der Emissionen, entfällt davon auf den PKW-Verkehr.

Dieser Aspekt stellt die Automobilindustrie vor eine erhebliche Herausforderung. Diese sind auf der einen Seite mit neuen effizienteren Technologien, effizienteren Design und mit geringerem Gewicht zu stemmen.

Im Rahmen der Gewichtsreduktion spielt an vielen Stellen das Thema Kunststoff eine wesentliche Rolle. Dies kann in der Rolle von Ersatz von vormals Gussbauteilen, welche mittels kurzglasfaserverstärkten Kunststoffen hergestellt werden, sein aber spielen hier auch vermehrt sogenannte Sonderverfahren eine wesentliche Rolle.

In den letzten Jahren haben sich hier insbesondere die Verfahren RTM und des physikalischen Schäumens, welches den größten Verbreitungsgrad über das sogenannte MuCell®-Verfahren hat, hervorgetan.

Im Zentrum des RTM-Verfahrens steht die Injektion. Aufgrund des Einsatzes verschiedenster Materialien sowie verschiedenster Strategien der Injektion sind auch die Probleme vielfältiger Natur. Diese Probleme können, wie oft auch in der Vergangenheit üblich, mittels Trial & Error erkannt und danach entsprechenden Gegenmaßnahmen abgeleitet werden. Heute steht dem Entwickler und Verarbeiter ein verlässlicheres und effektiveres Hilfsmittel in Form der 3D-Prozesssimulation zur Verfügung. Mittels der 3D Simulation lassen sich schon im Vorfeld Aspekte wie Trockenstellen und Race-Tracking abbilden.

Für reaktive Systeme liefert die Simulation zudem Erkenntnisse hinsichtlich Füllprobleme aufgrund einer zu weit vorgeschrittenen Reaktivität. Zudem wird ebenfalls der zu erwartende Verzug berechnet. Neben der Faserorientierung und der Reaktivität wird dabei auch die Thermik berücksichtigt.

Die Herausforderungen des Schäumens sind sehr stark durch die Fragestellung der Zelldichte- und Zellgrößenverteilung geprägt. Auch diese Aspekte lassen sich mittels der 3D Simulation heute abbilden und können von dem Anwender entsprechend im Vorfeld erkannt und ggf. manipuliert werden.

Den Abschluss der Entwicklung stellt allerdings nicht ein prozessoptimiertes Produkt da! Die lokalen Materialeigenschaften, wie Faserorientierung, Porosität (beim Schäumen), Temperaturen, Drücke und vielen mehr kann mittels entsprechender Schnittstellen auf die FEM Simulation übergeben werden. Dies dient nicht nur zur genaueren Auslegung der Produkte sondern wirkt auch dem Thema „Überdimensionierung“ entgegen.

Im Rahmen von diesem Vortrag wird ein Überblick der heutigen Simulationsmöglichkeiten und auch deren Grenzen zu den genannten Themen anhand von Beispielen gegeben.

1. Resin Transfer Moulding (RTM)

Neben dem klassischen händischen Drapieren und Besprühen gehören die RTM Verfahren zu den Liquid Composite Moulding (LCM) Verfahren.

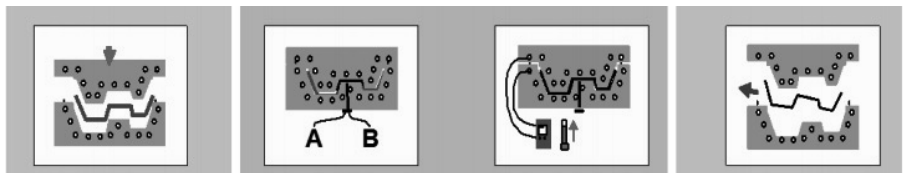


Bild 1: Schematische Darstellung RTM Prozess

Neben dem klassischen RTM Verfahren gibt es Varianten wie das VARTM (Vacuum Assisted RTM) bei dem mit Hilfe von Vakuumtechnologie die Harzinfiltration optimiert wird und CRTM (Injection Compression RTM) bei dem, während der Infiltration des Harzes, das Werkzeug leicht geöffnet ist und anschließend ein Presshub stattfindet.

Alle diese Verfahren haben gemein dass trockene Matten mit einer flüssigen Matrix imprägniert werden. Hierdurch lassen sich hochleistungsfähige Composite Bauteile herstellen. Diese Verfahren halten Einzug in die Automobilindustrie und somit steigt auch die Nachfrage diese neuartigen Prozesse mit entsprechenden Simulationstools auslegen zu können.

Mit den vollen 3D Ansätzen in Moldex3D ist es heute möglich die in der Praxis verwendeten Prozessvarianten abzubilden, hierfür gibt es unterschiedliche Steuerungsmöglichkeiten:

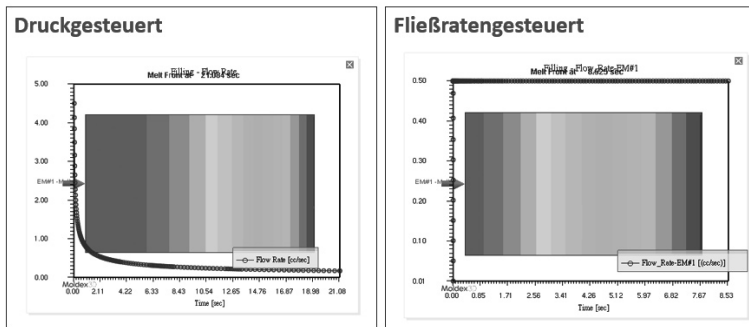


Bild 2 : Varianten der Füllsteuerung.

Für die Simulation von Multi-Inlet Bauteilen (kaskadiert oder gleichzeitig) sind ebenfalls die notwendigen Steuerungen vorhanden:

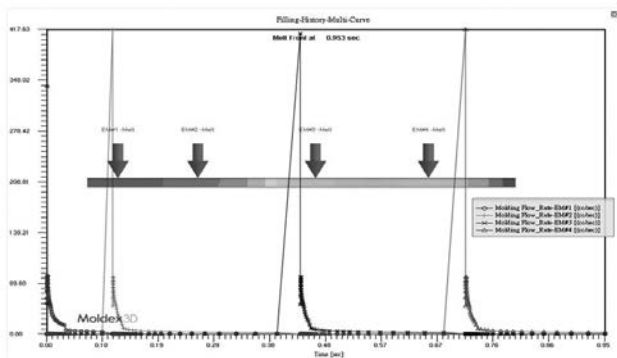


Bild 3: Multi-Inlet-Steuerung

Ein optimales Füllbild eines RTM Bauteils wird nicht nur durch die richtige Steuerung von den Injektionspunkten realisiert; einen großen Einfluss auf den Verlauf der Fließfront hat auch der gezielte Einsatz von Entlüftungsbereichen in den Formen.

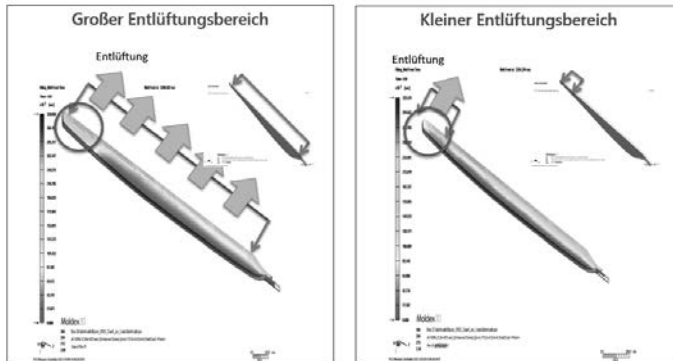


Bild 4: Entlüftungssimulation

Um die gewünschten Eigenschaften von Composite Bauteilen zu erzielen werden die verwendeten Fasermatten ganz gezielt nach Belastungsfällen im Werkstück ausgerichtet. Diese Matten weisen in ihren jeweiligen Richtungen unterschiedliche Permeabilitäten auf, welche wieder um einen starken Einfluss auf das Füllen der Bauteile haben.

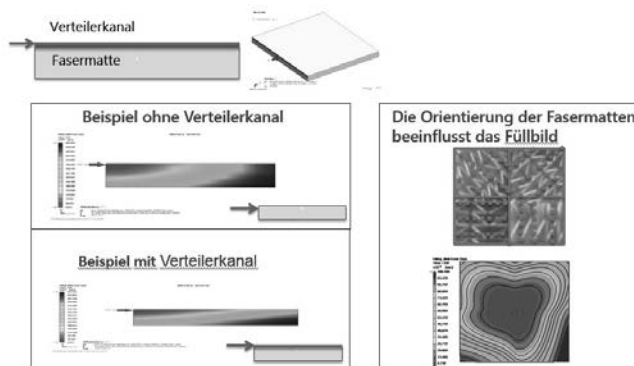


Bild 5: Einfluss der Faserausrichtung

Die in Moldex3D vorhandenen Simulationsansätze sind sowohl für den Bereich von technischen RTM Bauteilen bis hin zu Großbauteilen im Karosserie- oder Schiffsbau einsetzbar.

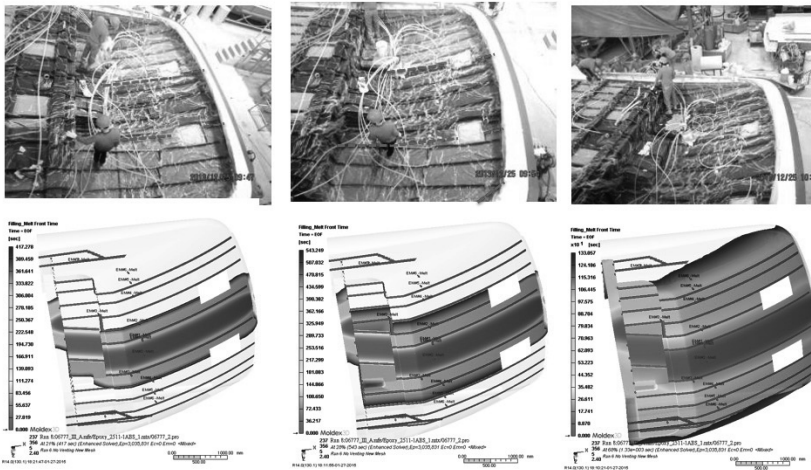


Bild 6: RTM Anwendungsbeispiel

2. Physikalisches Schäumen

Spritzgegossene technische Bauteile weisen aufgrund von Funktionselementen und geforderten Steifigkeiten oftmals große Wandstärkenunterschiede auf. Diese unterschiedlichen Dickenbereiche sind sowohl im Herstellungsprozess sehr kritisch als auch bei der Oberflächengüte und nicht zuletzt beim Bauteilgewicht.

Es gibt diverse Ansätze um Einfallstellen zu reduzieren, Wandstärken zu optimieren und Bauteile leichter zu machen.

Am Markt durchaus etabliert sind die Anwendungen des physikalischen Schäumens (z.B. durch die Technologien der Firma Trexel) bei denen ein Superkritisches Fluid in der Schmelze in Phase gebracht wird, welches später in der Kavität den Druckabfall durch die Volumetrische Schwindung durch ein expandieren von Zellen kompensiert.

Hieraus entstehen typische Strukturen in den Bauteilen

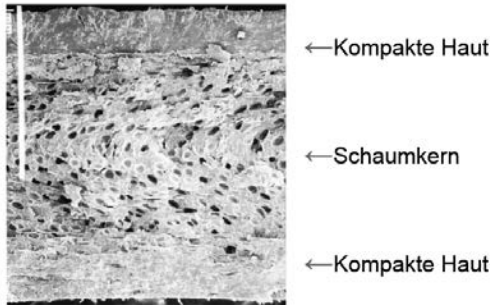


Bild 7: MuCell® Schaumstruktur im Bauteil

Moldex3D bietet für die Auslegung von Bauteilen und Werkzeugen für dieses Sonderverfahren einen vollen 3D Simulationsansatz.

Mit Hilfe von Nukleierungsmodellen, entstehen Simulationsergebnisse zur Zelldichtenverteilung in den Bauteilen.

Modelle für das Zellwachstum machen Vorhersagen über die zu erwartenden Zellgrößen in den unterschiedlichen Bauteilbereichen möglich.

Mikrozellulare Zelldichtenverteilung

Moldex3D

Cell Density
 $\times 10^4$ [cells/mm³]



Zellgrößenverteilung

Moldex3D

Cell Radius
 $\times 10^{-6}$ [m]

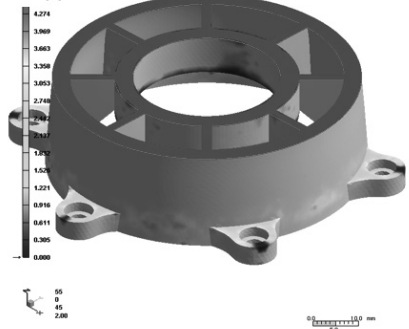


Bild 8: Zelldichte- und Zellgrößenverteilung

Zur weiteren Optimierung der Qualität bei MuCell® Anwendungen wurden eine ganze Reihe von kombinierten Prozessen etabliert welche ebenfalls in Moldex3D abgebildet werden können.

Bei speziellen Anwendungen macht es Sinn dass man trotz des Aufschäumens in der Kavität einen klassischen Nachdruck über das Spritzaggregat über eine gewisse Zeit aufrechterhalten möchte, dies ist so auch entsprechend abbildbar.

Um das vorzeitige Aufschäumen während des Füllens an der Fließfront zu reduzieren werden Anwendungen mit Gasgegendruck in der Praxis realisiert:

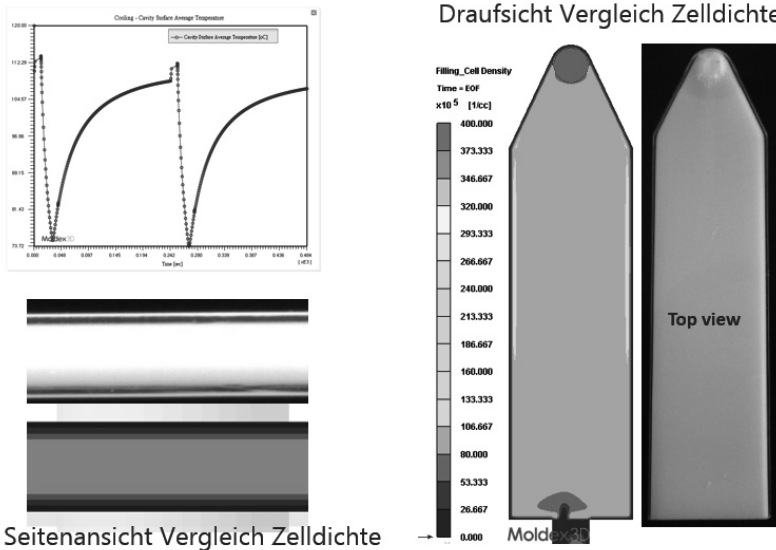


Bild 9: Simulations- Praxisvergleich Gasgegendruck

Eine weitere gängige Möglichkeit das Aufschäumen während des Füllvorgangs zu minieren sind Anwendungen mit Core-Back Hüben. In diesen Fällen steuert man ein gleichzeitiges Aufschäumen des Bauteils in der Trennebene über einen geringen Öffnungshub im Werkzeug.

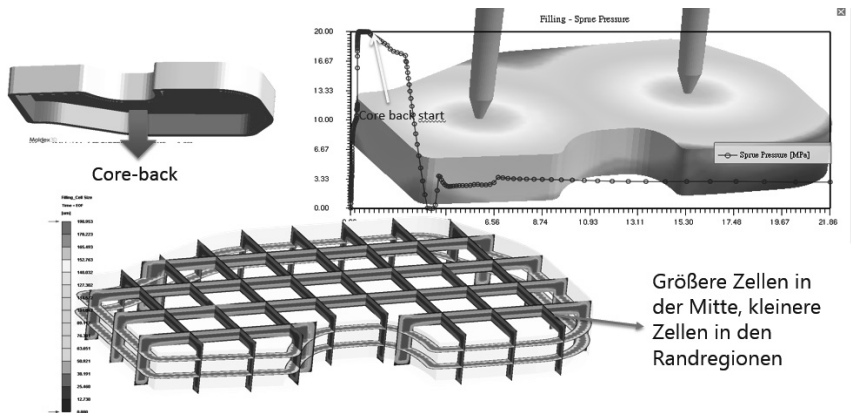


Bild 10: Ergebnis nach Core-Back Hub

All diese Variationen lassen sich dann im Folgenden auch weiter kombinieren mit den zahlreichen Möglichkeiten variotherme Prozesse in Moldex3D abbilden zu können.

3. Prozess-, Werkzeug- und Bauteiloptimierung

Neben dem Einsatz von neusten Fertigungstechnologien unterstützen Simulationsmethoden auch klassische Optimierungsansätze auf der Seite der konstruktiven Bauteilgestaltung.

Durch den konsequenten Einsatz von kunststoffgerechter Bauteilgestaltung, optimierter Werkzeugauslegung und konstruktionsbegleitender Prozesssimulation kann man aufgrund der Möglichkeiten der Funktionsintegration in Kunststoffbauteilen komplett neue Wege gehen. Hierbei lässt sich nicht nur Bauteilgewicht einsparen, durch ganzheitliche Ansätze können sogar komplette Bauteile in der Baugruppe substituiert werden, was sich auch in deutlich effizienteren Herstellprozessen widerspiegelt.

Beispielhaft möchten wir Ihnen hier den Prozess der Firma EuWe Group International aufzeigen, bei deren Überarbeitung der Golf Mittelkonsole eine Bauteil und somit ein kompletter Produktionsschritt entfallen ist.

Golf Variant



Golf Sportsvan



Angelpunkt Konzeptentwicklung:
Träger Miko in 2K-Co-Injection

Bauteil	Maschinenpark Golf Variant	Maschinenpark Golf Sportsvan
1. Träger Miko	800to PP-GF40	650to 2K – Co-Injection Kern: PP-GF40; Haut PP-T20
2. Miko Unterteil	800to (PP-T20)	1100to 2K – Mehrfarbig (PP-T20)
3. Miko Oberteil	650to (PP-T20)	650to (PP-T20)
4. Fußraum	650to (PP-T20)	800to (PP-T20)
5. Ablagefach	650to (PP-T20)	Entfallen → Kombination aus 1. Träger Miko & 2. Miko Unterteil

Golf Variant



Golf Sportsvan



Bild 11: Überarbeitung Mittelkonsole

Die Substitution eines separaten Ablagefaches wurde ermöglicht, durch die Herstellung des Trägers (Glasfaserverstärktes Polypropylen), in dem die Außenhaut/Sichtseite des Ablagefaches (Talkumverstärktes Polypropylen) bei analogem Bauteil über Co-Injektionsverfahren mit gleichen Werkzeug gebildet werden kann.

Ablauf Coinjection
Haut PP-T20 (blau)
Kern P-GF40 (gelb)

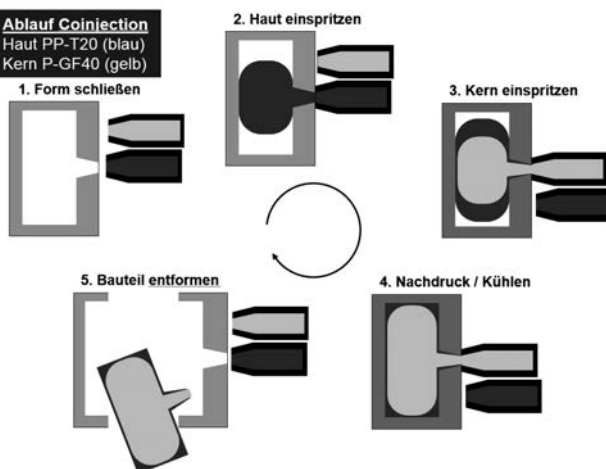


Bild 12: Ablauf Coinjection

Die komplexe Findung des bestmöglichen Anspritzpunktes bei dem an allen sichtrelevanten Stellen eine entsprechende Wandstärke des Hautmaterials gewährleistet ist und gleichzeitig entsprechenden Wandstärken der Kernkomponente für die mechanisch beanspruchten Bereiche wurde maßgeblich simulativ erarbeitet.

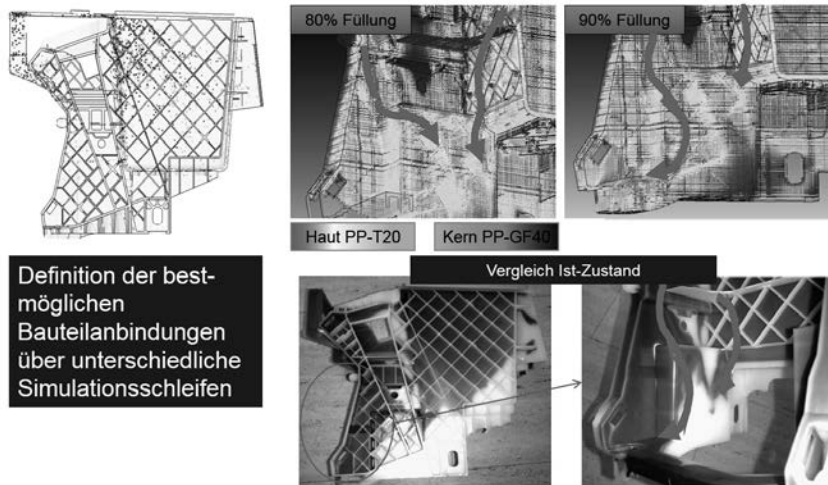


Bild 13: Simulation der Co-Injektion

4. Schnittstellen zur FEM-Simulation

Neben den Aufgezeigten Konstruktionsmethoden und Sonderverfahren bietet Moldex3D eine ganze Reihe weiterer Add-Ons mit denen auch abseits des klassischen Spritzgießens Prozesse simulativ evaluiert werden können.

All diese Simulationsmöglichkeiten bieten einen tiefen Einblick in das Geschehen innerhalb des Bauteils und auch des Werkzeugs. Hieraus resultiert eine Vielzahl von herstellungsspezifischen Produkteigenschaften, die in der klassischen FEA bisher keine oder nur sehr wenig Berücksichtigung finden.

Hierzu zählen zum Beispiel in hohem Maße die Informationen über die Orientierungen in Faserverstärkten Bauteilen. Abhängig von der Bauteilgeometrie, dem Anspritzpunkt und der Art der Plastifizierung kann es hier zu großen Unterschieden kommen, welche sich in starken anisotropen Bauteileigenschaften bemerkbar machen.

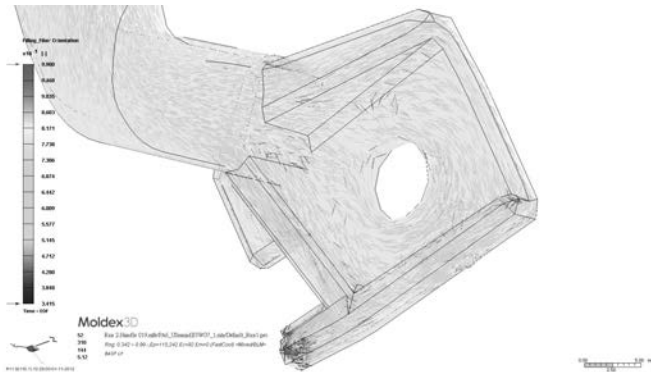


Bild 14: Beispiel Faserorientierung

Zur Berechnung dieser Effekte wurde in Moldex3D ein, mit Auszeichnungen versehenen, Fasermodell entwickelt welches eine realitätsnahe Simulation der Faserorientierung zulässt.

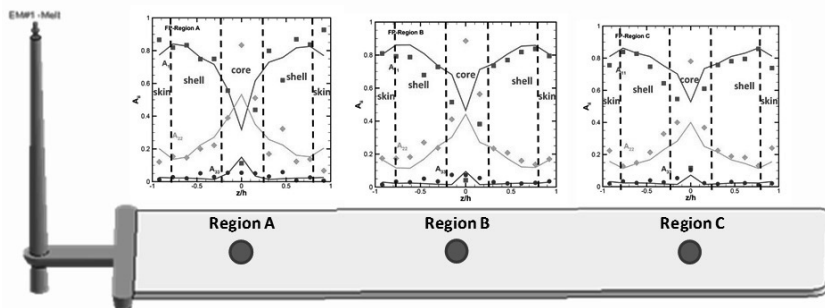


Bild 15: Evaluation Fasermodell

Die Möglichkeiten beschränken sich nicht nur auf die Orientierung, es können auch Faserkonzentrationen/Faserentmischungen und der Faserbruch mit berechnet werden. Letztes nicht ausschließlich im Werkzeug, sondern auch während der Plastifizierung.

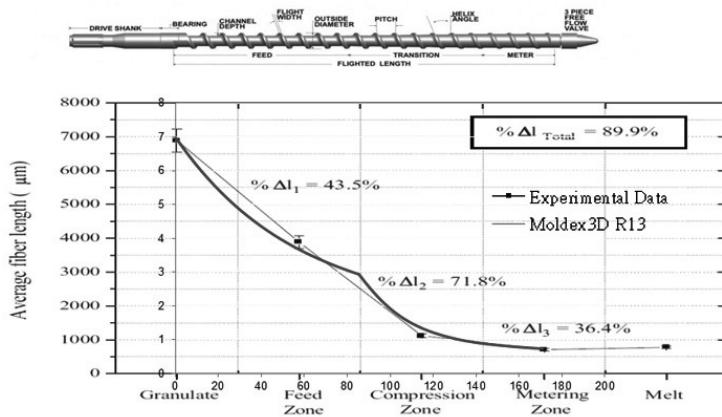


Bild 16: Abnahme der Faserlänge während der Plastifizierung

All diese Informationen, einschließlich von Temperaturen und Spannungen können über FEA- und Mikromechanik-Schnittstellen an gängige Tools übergeben werden (Ansys, Abaqus, Dyna, Pam, Marc, Radioss, Nastran).

Im Bereich der Sonderverfahren ist es in Moldex3D sogar möglich Informationen über die resultierende Porosität von geschäumten Bauteilen mit Hilfe von Digimat der Strukturmechanik zur Verfügung zu stellen.

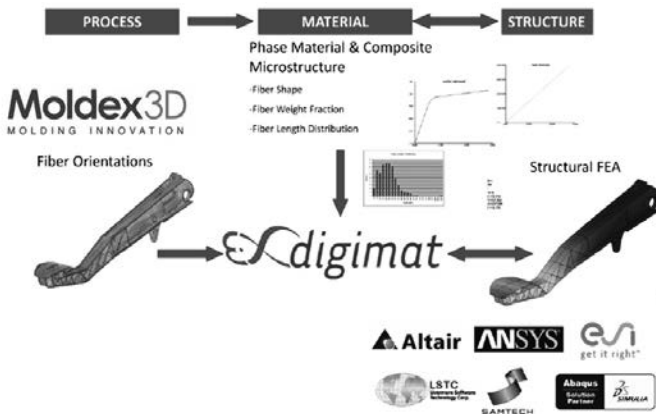


Bild 17: Prozesssimulation – Materialmodellierung - Strukturmechanik

Neuartige PUR-Oberflächen

Selbstheilend und mehr

Dr.-Ing. I. Kleba, J. Emig,
Rühl Puromer GmbH, Friedrichsdorf

Kurzfassung

Mit puroclear® wurde eine neue Generation an PUR-Beschichtungswerkstoffen für den Fahrzeuginnenraum entwickelt und erfolgreich in den Markt eingeführt, wie z.B. mit dem Edelholzklenkrad der neuen Mercedes S-Klasse. puroclear® zeichnet sich zum einen durch einstellbare selbstheilende Eigenschaften aus, die ein deutliches Mehr an Alltagstauglichkeit bieten. Die Entstehung bleibender Kratzer wird deutlich minimiert. Und wer ärgert sich nicht über die ersten Kratzer?! Zum anderen überzeugt puroclear® durch weitere Benefits wie insbesondere der Selbsttrennung während der Verarbeitung und niedrige Verarbeitungstemperaturen, die auch wirtschaftliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Technologien liefern. puroclear® ist damit zunächst prädestiniert für Edelholzbauteile im Fahrzeuinterieur. Die Beschichtung erfolgt im RIM-Verfahren, entweder durch Überfluten eines vorgefertigten Trägerbauteils oder in Form eines integrierten Prozesses mit dem Spritzgießen. Letzteres bietet gerade für Bauteile in Piano-Black-Optik eine interessante Alternative zum kostenintensiven Lackieren, sei es für reine Zierteile oder auch für komplexe Blenden im Bereich der Mittelkonsole. Aber auch Funktionsteile z.B. mit integrierten Schaltern und/oder hinterleuchteten Elementen sind möglich wie verschiedene Studien gezeigt haben. Des Weiteren laufen derzeit mittel- bis langfristig orientierte Entwicklungen, um die Vorteile von puroclear® auch Exterieur Anwendungen zugänglich zu machen – bis hin zu bionischen Funktionsoberflächen.

1. Wir als Endverbraucher – Zwiespalt zwischen Premiumanspruch und Herzschmerz

Wir als Endverbraucher sind schon eine sehr besondere Spezies. Auf der einen Seite lassen wir uns von Glanz und Glamour gerne verführen und greifen beim Autokauf gerne nach Autos mit hoch glänzenden Ausstattungselementen. Auf der anderen Seite ist uns eigentlich im gleichen Moment auch klar, dass gerade solche Oberflächen eher dazu neigen anfällig zu sein, z.B. gegen Kratzer durch Ringe, Schlüssel und Reißverschlüsse im alltäglichen Gebrauch oder durch unsere spielenden Kinder. Diesen Gedanken verdrängen wir jedoch in diesem Moment allzu gerne zugunsten eines mehr oder minder ausgeprägten Luxus-

anspruches beim Kaufentscheid. Umso mehr ärgern die meisten von uns sich dann aber, wenn die ersten Kratzer entstehen – und sie kommen meist unweigerlich.

Auch wenn der Schmerz mit zunehmender Gebrauchsdauer und auch zunehmender Anzahl an Kratzern bei dem einen früher und bei dem anderen später nachlässt, so sollten wir entlang der Wertschöpfungskette der Autoherstellung nicht müde werden, darüber nachzudenken wie wir diesen Herzschmerz zumindest lindern können. Wir als Rühl Puromer haben uns vor geraumer Zeit daher zunächst für den Fahrzeuginnenraum die Frage gestellt, was wir seitens der Werkstoffindustrie dazu beitragen können. In diesem Zusammenhang sind wir zu der Ansicht respektive Grundhaltung gekommen, dass es uns als Endverbraucher eigentlich egal wäre, wenn ein Kratzer entsteht, wenn er denn nur möglichst von selbst nach gewisser Zeit wieder verschwindet. Der bisherige Ansatz, die Oberflächen härter und noch härter zu machen ist aus unserer Sicht hier nicht zielführend. Denn polymere Werkstoffe haben nun mal eine endliche Härte weit unter manch anderen Werkstoffen und neigen gerade bei glänzenden Oberflächen zur Kratzempfindlichkeit.

Ohne Frage, auch bisherige Interieuroberflächen haben in Bezug auf die Kratzbeständigkeit einen sehr beachtlichen Status erreicht, und die Entwicklungen gehen sicherlich auch weiter. Aus unserer Sicht ist die Königsdisziplin jedoch, den entsprechenden Bauteilen wie Zierleisten, Lenkrädern, Blenden etc. eine hoch glänzende und hart anmutende Oberfläche zu verleihen, die diese bis zu einer gewissen Krafteinwirkung von außen auch beibehält. Werden die äußeren Krafteinwirkungen z.B. am Lenkrad durch einen Reißverschluss beim Aussteigen oder durch einen Schlüssel beim Ablegen in der Mittelkonsole zu groß, so lassen wir die Entstehung eines Kratzers zwar zu, sorgen aber durch einen entsprechenden Materialaufbau dafür, dass sich dieser Kratzer nach einer gewissen Zeit wieder selbst regeneriert. Selbstheilungseigenschaften sind aus unserer Sicht somit das Zauberwort für zukünftige Premium-Hochglanz- oder auch matte Oberflächen. Diese realisieren wir durch eine neue Generation an Beschichtungsmaterialien auf Polyurethan(PUR)-Basis mit der Bezeichnung puroclear®, welche vornehmlich durch Überfluten im RIM-Verfahren auf ein entweder vorgefertigtes Trägerbauteil aufgetragen (z.B. Edelholzzierteile) oder in einem integrierten Spritzgießprozess auf die Oberfläche eines (folienkaschierten) Thermoplast-Substrat appliziert wird. Das Überfluten von Composite-Bauteilen zur Oberflächenveredelung stellt eine weitere Option dar.

2. Ausgangspunkt und Funktionsprinzip der Selbstheilung

Ausgangspunkt der Entwicklung waren Erkenntnisse, die im Rahmen eines eher langfristig orientierten, öffentlich geförderten Entwicklungsprojekts namens „Nanoskin“ erarbeitet wurden. Ziel dieses Projekts war die Entspiegelung von transparenten Kunststoffteilen mit Hilfe

definierter nanostrukturierter Oberflächen. Als Demonstrator wurde am Ende des Projekts ein Armaturenelement mit entspiegelter Oberfläche realisiert. Im Zuge der Entwicklung hat sich gezeigt, dass nicht nur die hohe Transparenz und weitere optische Eigenschaften von entsprechend konzipierten PUR-Systemen für solche Anwendungen bestens geeignet sind, sondern auch die niedrigviskosen Eigenschaften bei der Formgebung. Letztere ermöglichen erst eine konturgenaue Abformung der Nanostrukturen in einer Werkzeugoberfläche, die für den Entspiegelungseffekt essentiell ist.

Ein weiterer Punkt auf der Wunschliste war eine möglichst langlebige Struktur, um den Entspiegelungseffekt im Alltagsgebrauch durch z.B. Kratzer nicht gleich wieder zu verlieren. Diesen Materialanspruch hat die Rühl Puromer als Materialpartner in dem Entwicklungsprojekt durch die Entwicklung eines hochtransparenten PUR-Systems mit selbstheilenden Eigenschaften gelöst. Genutzt wurde dabei das Charakteristikum der PUR-Chemie, dass durch die Auswahl spezieller Rohstoffe eine besondere makromolekulare Struktur geschaffen werden kann. Diese besteht auf der einen Seite aus der für Polyurethane als mehrheitlich vernetzte Kunststoffe typischen chemischen Verbindungen in einem dreidimensionalen Netzwerk (Bild 1, oben links). Auf der anderen Seite werden durch spezielle Systemkomponenten Moleküle in die Polymerketten eingebaut, die sich zu sogenannten Hartsegmenten innerhalb des Polymergerüsts mit einem hohen Anteil an stark polaren Urethan-Gruppen ausbilden. Die Kettenlänge innerhalb dieser Hartsegmente und deren Anzahl lässt sich über die Chemie einstellen, dementsprechend auch die resultierenden Eigenschaften. Durch Entmischungsvorgänge (Phasensegregation) während der Polymerbildungsreaktion im Formgebungswerkzeug lagern sich solche hochpolaren Hartsegmente zu parakristallinen Nahordnungsbereichen zusammen. Innerhalb dieser sogenannten Hartsegment-Domänen wirken vor allem Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den benachbarten Urethan-Gruppen, die als stärkste interchenare Bindungskräfte gelten. Vor diesem Hintergrund werden solche Hartsegment-Domänen auch als physikalische Vernetzungsstellen bezeichnet.

Insgesamt betrachtet entstehen durch die Phasensegregation somit parakristalline harte Mikrophasen, die durch Weichsegmente kovalent in einem dreidimensionalen Netzwerk aneinander gekoppelt sind. Die amorphe und mehr oder minder flexible Weichsegmentmatrix verleiht dem Polymerwerkstoff dabei seine elastische Verformbarkeit und seine Kälteflexibilität. Die chemischen kovalenten Bindungen innerhalb des Polymergerüsts in Kombination mit den kristallinen physikalischen Vernetzungsstellen verleihen dem Polyurethan seine Härte und Festigkeit.

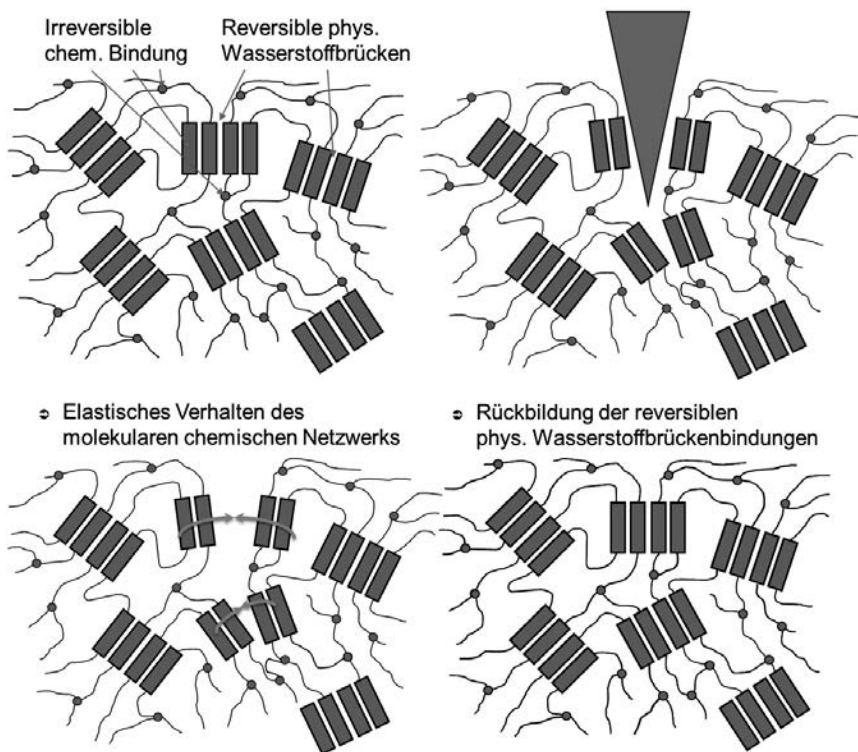


Bild 1: Funktionsprinzip der Selbstheilung

In der Folge kommt es im Bereich des Kratzers zu weiteren zeitabhängigen physikalischen Effekten. Zunächst einmal werden in den verdrängten und/oder verformten Materialbereichen die durch die äußere Kraft induzierten Spannungen im Material respektive innerhalb der Weichsegmentmatrix gespeichert. Diese inneren Spannungen sind im wahrsten Sinne des Wortes die treibende Kraft für den Selbstheilungseffekt. Die eingefrorenen Spannungen bedingen, dass sich das Material um einen Kratzer wieder in Richtung seiner ursprünglichen Lage bewegt. Sukzessive schließt sich der Kratzer also wieder (Bild 1, unten links), einhergehend mit einem Abbau der inneren Spannungen. Dieser Prozess kann mehr oder minder schnell ablaufen, je nach Materialeinstellung der *puroclear®*-Formulierung. Die Selbstheilung nutzt somit zum einen den für Kunststoffe typischen *Memory Effekt*. Ein zweites zentrales physikalisches Phänomen vollendet dann die Selbstheilung der *puroclear®*-Systeme. Rü-

cken die Makromoleküle infolge des sich schließenden Kratzers wieder hinreichend dicht aneinander, so treten sie interchenar wieder in Wechselwirkungen. Die starken Wasserstoffbrückenbindungen können sich aufbauen und die Hartsegmente der einzelnen Makromoleküle lagern sich erneut zu physikalischen Vernetzungsstellen zusammen (Bild 1, unten rechts). Es bildet sich wieder ein dreidimensionales Netzwerk bestehend aus chemischen und physikalischen Vernetzungsstellen aus. Der Kratzer hat sich selbst repariert.

Diese Erläuterung des Selbstheilungseffektes der puroclear®-Systeme zeigt nicht nur, wie durch eine ausgeklügelte Chemie physikalische Phänomene gezielt provoziert und für ein deutliches Mehr an Alltagstauglichkeit genutzt werden können. Sie zeigt auch unmittelbar die Grenzen der Selbstheilung auf. Ist die äußere Krafteinwirkung so groß, dass auch chemische Vernetzungsstellen zerstört werden, so können sich diese nicht mehr selbst regenerieren. Zwar werden dann auch weiterhin noch die oben beschriebenen Selbstheilungseffekte wirken und diese die Beschädigung dann zumindest noch reduzieren helfen. Eine vollständige Rückbildung ist jedoch nicht mehr möglich. Eine mehr oder minder stark ausgeprägte Beschädigung bleibt. Wirkt die äußere Kraft gar spanabhebend auf das Material ein, so wird sich diese Beschädigung ebenfalls nicht regenerieren. In solchen Fällen kann dann aber auch nicht mehr von einem normalen Alltagsgebrauch gesprochen werden. Dies grenzt dann schon eher an Mutwilligkeit.

3. puroclear® – eine Klasse für sich

Was in der Theorie gut klingt, muss sich natürlich auch in der Praxis erst einmal bewähren. Diesbezüglich haben umfangreiche Tests bei verschiedenen OEMs und Zulieferern für diese neue Art an Materialklasse, die hier auf Leib und Nieren getestet wurde, gezeigt, dass puroclear® einen deutlich verbesserten Schutz der Oberfläche und somit ein wesentliches Mehr an Alltagstauglichkeit bietet. Die ersten Serieneinsätze und Rückmeldungen aus dem Feld bestätigen dies zusätzlich.

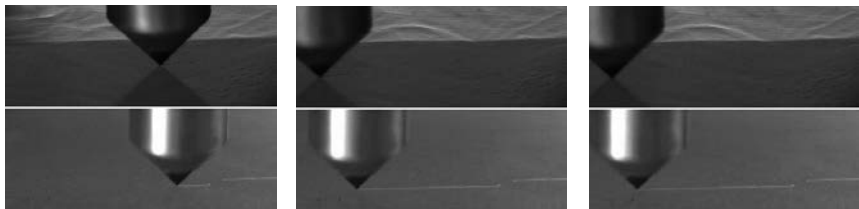


Bild 2: Ausschnitte einer abgewandelten Erichsen-Prüfung: puroclear® (oben) u. PC (unten)
(Quelle: Hochschule Heilbronn, Polymer Institut Kunststofftechnik)

Bild 2 zeigt exemplarisch das Reaktionsverhalten einer puroclear®-Variante (jeweils oben) im Vergleich zu einem Polycarbonat (jeweils unten) im Rahmen eines abgewandelten Erichsen-Tests, welcher im Rahmen des Nanoskin-Forschungsprojektes an der Hochschule Heilbronn am Polymer Institut Kunststofftechnik durchgeführt wurde. Im Rahmen dieses Versuchs beginnt sich beim puroclear® der Kratzer bereits während der Verfahrbewegung des Prüfdorns zurückzubilden. Der Anfangsbereich ist am Ende der Bewegung schon nicht mehr zu erkennen (Bild 2, Mitte). Nach Abschluss der Prüfung bildet sich der Kratzer wieder schnell vollständig zurück (Bild 2, rechts). Beim Polycarbonat bleibt der Kratzer hingegen irreversibel in voller Ausprägung erhalten.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den verschiedenen Entwicklungsprojekten hat sich puroclear® zu einer ganzen Produktfamilie entwickelt. So wird heute unterschieden in

A) harte puroclear®-Systeme

1. puroclear® Standard ohne Selbstheilungseffekt
2. puroclear® mit langsamer Selbstheilung
(ca. 1 bis 5 Tage je nach Materialeinstellung)
3. puroclear® mit schneller Selbstheilung
(wenige Minuten bis Stunden je nach Materialeinstellung)

B) weiche PU-Systeme auf puroclear®-Basis

1. puroclear®-Systeme für dynamische Beanspruchungen (z.B. Schaltfunktion)
2. (durchgefärbte) purosken®-Anwendung mit lederähnlicher Anmutung / Haptik mit hohem UV-Anspruch (z.B. Oberflächen mit hellen Farbtönen im Interieur)
3. puroclear®-Systeme für UV-stabile Anwendungen mit hoher Reißdehnung

Der Übergang zwischen den einzelnen Produktgruppen ist quasi fließend und flexibel einstellbar. DAS puroclear® wird es folglich nicht geben. Vielmehr besteht der Fokus darin, das Material individuell auf den jeweiligen Kundenwunsch anzupassen. Hier entscheiden manchmal Nuancen in der Haptik für die Auswahl der einen oder anderen Systemeinstellung, letztlich dann ein eher subjektives Auswahlkriterium.

Auch ist puroclear® wie der Namensteil „clear“ zunächst zu implizieren scheint keineswegs auf transparente Beschichtungen beschränkt. Zwar sind die puroclear®-Systeme mit ihren glasähnlichen Eigenschaften in Bezug auf eine hohe optische Transparenz und eine möglichst geringe Veränderung des Farbwertes unter Normlicht geradezu prädestiniert als nächste Generation z.B. für Edelholzzierteile und Edelholzklenkräder. Aber auch in durch-

gefärbter Form können sie ihre Vorteile klar ausspielen, z.B. als viel gefragte aber auch anfällige Piano-Black-Oberflächen. Ganz neue Möglichkeiten schaffen auch transluzent eingestellte puroclear®-Formulierungen.

4. Eigenschaften im Überblick

Der neue Selbstheilungseffekt erfordert auch ein Umdenken bei der Prüfung und Beurteilung im Rahmen der OEM-Spezifikationen. So wird die Selbstheilung heute bei den entsprechenden Prüfungen zur Kratzbeständigkeit noch nicht erfasst. Verschiedene OEMs sind aber bereits dabei, die Testprozeduren entsprechend anzupassen. Im einfachsten Fall könnte der Beurteilungszeitraum verlängert werden. Tabelle 1 zeigt im oberen Teil die Prüfergebnisse nach Erichsen, bei denen die Probe sowohl unmittelbar nach der Prüfung als auch nach 15 und weiteren 15 Minuten beurteilt wurde. In dem hier vorliegenden Beispiel einer schnell selbstheilenden puroclear®-Einstellung ist wie bei herkömmlichen PUR-Beschichtungen bis 10N sofort nach der Entlastung kein bleibender Starteindruck zu beobachten. Bei Steigerung der Belastung auf 15N hat sich der Starteindruck nach kurzen 15 min und bei 20N Lasteinwirkung, die auch von Polyesterlacken nicht mehr ertragen werden, gar nach 30 min zurückgebildet.

Tabelle 1: puroclear®-Eigenschaften im Überblick (Prüfung nach Daimler-Normen)

- » Kratzbeständigkeit / Selbstheilungseffekt (nach Erichsen, bei RT)
(abhängig von der spezifischen puroclear®-Formulierung)
 - 10 N i.O. (sofort)
 - 15 N i.O. (nach ca. 15 min ohne Starteindruck)
 - 20 N i.O. (nach ca. 30 min ohne Starteindruck)
- » Härte / Haptik:: 70 Shore A – 88 Shore D
(von weich bis hart) selbstheilend bis 80 Shore D
- » Sonnensimulation: i.O. (240h - DIN 75220-D-IN1-T)
- » Klimawechseltest: i.O. (504h: -30 – max. +90°C, 0 – max. 80%rF)
- » Medienbest.: i.O. (Crockmeter, Sonnencreme etc.)
- » VOC / FOG: < 70 / 125 ppm (Vorgabe max. 100 / 250)

Eine herausragende Kratzbeständigkeit alleine reicht aber noch nicht aus, um in das Interieur eines Fahrzeugherstellers herein zu kommen. Hier sind weitere Kriterien bei Sonnen-

simulation und Medienbeständigkeit, beim Klimawechseltest sowie bei der Emissionsprüfung zu erfüllen, um nur ein paar Beispiele zu nennen. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl entsprechender Eigenschaften, die in diesem Falle allesamt die Daimler-Normen erfüllen. Je nach OEM und Anwendung variieren dabei die zu erfüllenden Bedingungen. Bei einem Lenkrad sind sicherlich der Handschweiß- und die Sonnencremebeständigkeit ein zentraler Aspekt. Auch diese lenkradspezifischen Kriterien werden mit einer speziellen puroclear®-Einstellung erfüllt, so dass der Weg frei war für den ersten Serieneinsatz.

5. Möglichkeiten der Effizienzsteigerung mit puroclear®

Neben den Selbstheilungseigenschaften, die uns als Endanwender sicherlich am meisten interessieren und begeistern, sind es für uns als Mitstreiter der Kunststoffindustrie aber auch andere Merkmale, die über den Einsatz eines neuen Werkstoffs entscheiden. Einmal mehr sind es auch die ökonomischen Aspekte, die diese Entscheidung mit beeinflussen. Und auch hier hat puroclear® einiges zu bieten. Tabelle 2 gibt einen Überblick zu den Benefits von puroclear® für den Verarbeiter. Hier zählt es neben dem reinen Materialpreis auch nachgelagerte Einsparungsaspekte in die Kalkulation mit einzubeziehen, wie die nachfolgenden Ausführungen zeigen.

Tabelle 2: Benefits durch puroclear® für den Verarbeiter im Überblick

- » Selbsttrennend (Ziel: werkzeugfallende Teileproduktion)
 - Reduzierung von Nacharbeit und Ausschussrate
 - Einsparung externes Trennmittel, Trennmittelauftrag und Absaugung und somit auch Zykluszeiteinsparung
- » Niedrigere Verarbeitungstemperaturen von 60 - 80 °C
 - Energie- / Invest-Einsparung
 - keine Vergilbung, Maschinenabschaltung möglich
 - Bessere Fließ Eigenschaften / geringerer Druck ⇒ geringerer Ausschuss
- » Pumpfähig bei Raumtemperatur
 - Kein Vorheizen ⇒ geringerer Invest
- » Kürzere Aushärtung, Steigerung der Produktivität
- » Keine Totenkopf-Kennzeichnung

5.1 Selbsttrennung bei der Verarbeitung

Ein notwendiges Übel der PUR-Technologie ist sicherlich der Einsatz von externen Trennmitteln bei der Verarbeitung, um eine sichere Entformung der Bauteile zu erreichen. Der Einsatz externer Trennmittel

- verursacht Kosten in Form des externen Trennmittels,
- bedingt eine längere Gesamtzykluszeit,
- macht den Einsatz einer entsprechenden Absaugvorrichtung notwendig und
- erfordert einen erhöhten Pflege-/Reinigungsaufwand für Werkzeug und Produktionsumgebung.

In Summe kostet er Zeit und Geld. Hier gibt es seit vielen Jahren oder gar Jahrzehnten verschiedenste Bemühung, um diesen Nachteil zu vermeiden oder zumindest zu minimieren. Einige Entwicklungen, wie z.B. die Beschichtung der Werkzeugoberfläche sind bisher daran gescheitert, dass die Beschichtungen keine hinreichende Langlebigkeit im Alltag der industriellen Produktion haben. Auch gab es und gibt es noch immer Bestrebungen mit Folien zu arbeiten oder jüngst auch mit folienähnlichen Halbzeugen, die als Entformungshilfe dienen. Solche Lösungen sind vereinzelt im Einsatz.

Auch hat der Einsatz interner Trennmittel im PUR-System in den letzten Jahren einige Fortschritte gemacht. Hier gibt es inzwischen eine Reihe von Serienanwendungen, wo quasi selbsttrennende oder zumindest leichttrennende PUR-Systeme erfolgreich eingesetzt werden, wie z.B. in der Ladeboden- und Hutablagenfertigung z.B. mittels IT-haltiger puroreg®-Systeme. Die Eintrennfrequenz mit externen Trennmitteln reicht dabei von wenigen Zyklen (8-10) bis hin zu wenigen Produktionsschichten, in Ausnahmefällen auch mehreren Produktionstagen. Der Erfolg einer IT-Lösung hängt sehr stark von dem eingesetzten PUR-System ab. Grundsätzlich gilt, dass je höher die Dichte des PUR-Materials ist, desto besser stehen die Chancen für eine IT-Lösung.

Aber die Tücke steckt bekanntlich im Detail. So müssen neben der Selbsttrennung bei der Herstellung die Folgeschritte der Bauteilweiterbearbeitung berücksichtigt werden. In vielen Fällen ist hier eine hinreichende Haftung zu anderen Materialien wie z.B. für eine Teppichkaschierung bei der Ladebodenproduktion zu berücksichtigen. Und die Kombination verschiedener Werkstoffe zu Hybridlösungen wird in Zukunft allein aufgrund des Kostendrucks sicherlich weiter zunehmen.

Gerade bei der Beschichtung von Bauteilen – sei es durch Lackieren oder durch Überfluten – ist stets eine gute Haftung zu dem zu beschichtenden Substrat zu gewährleisten, und dies auch bei einer Materiallösung mit innerer Trennwirkung. In Bezug auf die puroclear®-Systeme wurde diese konträre Fragestellung dahingehend gelöst, dass neben dem Einsatz

sehr spezieller interner Trennmittel auch die PUR-Chemie im Hinblick auf eine gute Trennwirkung optimiert wurde, ohne dabei die Eigenschaften des Materials negativ zu beeinflussen. Mit dem Einsatz eines internen Trennmittels allein ist es somit nicht getan.

Was im Rahmen dieser langfristigen Entwicklungsaufgabe heraus kam, hat uns selbst ein wenig überrascht. Wir haben bisher Prozessserien gefahren, bei denen bis zu 1.500 Entformungen ohne zwischenzeitliches Eintrennen möglich waren. Mit Fug und Recht kann man bei einer solchen Performance von einem selbsttrennenden PUR-System sprechen. Bei der 1.500. Entformung ist dabei jedoch noch nicht Schluss, sondern die Serie wurde als erfolgreich bestanden abgeschlossen. Wie weit man diesen effizienzsteigernden Benefit der puroclear®-IT-Systemvarianten noch vorantreiben kann, werden die anstehenden Serienaufgaben zeigen.

Sicher ist jedoch, dass dieses Feature „Selbsttrennung“ für uns als Mitstreiter der Kunststoffindustrie deutliche ökonomische Vorteile mit sich bringt. Zu den harten Fakten:

1. Es wird deutlich weniger externes Trennmittel benötigt
2. Der Gesamtzyklus wird nachhaltig verkürzt
3. Weniger Invest durch reduzierten Absaugaufwand
4. Reduzierter Pflege- und Reinigungsaufwand für Werkzeug und Umgebung
5. Weniger Nacharbeit durch Reduzierung der Störquelle Trennmittel
6. Möglichkeit zur Realisierung einer formfallenden Teileproduktion, welche heute bereits für ausgesuchte Teile umgesetzt wird.

Mehr noch ist die Einführung einer solchen selbsttrennenden Materiallösung quasi eine Grundvoraussetzung, um das Überfluten mit einer PUR-Oberfläche auch mit dem Spritzgießen des Trägerbauteils in einem integrierten Prozess effizient kombinieren zu können. Der Wegfall des störenden Eintrennschritts, der einem Spritzgießer ohnehin dubios erscheint und ein Dorn im Auge ist, lässt die Zykluszeiten der beiden dann möglichst simultan ablaufenden Prozessschritte Spritzgießen des Trägerbauteils und Überfluten immer näher zusammenrücken. Ein solcher integrierter Prozess, der je nach Maschinenhersteller als ColorForm- bzw. clearmelt-Verfahren bezeichnet wird, bietet heute damit eine sehr interessante Alternative z.B. für Piano-Black-Bauteile zum fehleranfälligen klassischen Lackieren. Die sehr niedrige Viskosität der puroclear®-Systeme bei lediglich 60-80°C Verarbeitungstemperatur trägt ihr Übriges dazu bei, um auch sehr dünne Beschichtungen zu ermöglichen. Und erinnern wir uns noch einmal an das Nanoskin-Projekt als Ausgangspunkt der Entwicklungen. Beim Einsatz eines externen Trennmittels wäre jede Nanostruktur bereits ver-

schwunden, bevor auch nur der erste Tropfen Beschichtungsmaterial ins Werkzeug fließen kann. Zur konturgenauen Abformung strukturierter Oberflächen leistet die Selbsttrennung folglich auch einen großen Beitrag.

5.2 Kürzere Aushärtezeiten und niedrigere Verarbeitungstemperaturen

Blieben wir bei dem integrierten Prozess Spritzgießen und Überfluten. Bild 3 zeigt ein auf diese Weise hergestelltes Demonstratorbauteil. In diesem konkreten Fall waren Aushärtezeiten für das puroclear® von lediglich 40s möglich. Man liegt damit schon nahe an den Kühlzeiten des Trägerbauteils und kann durch Einsatz einer Wendeplattentechnik Taktzeiten von unter 60s realisieren. Zugegeben, das hier vorliegende Bauteil ist vergleichsweise einfach aufgebaut, z.B. mit relativ wenig Verrippung auf der Rückseite. Je komplexer das Trägerbauteil jedoch wird, desto näher kommt man mit der Kühlzeit an die Aushärtezeit für die Oberflächenbeschichtung heran, die immer vergleichsweise einfach aufgebaut ist. Im Zuge der Abmusterungen verschiedener Bauteile lagen dabei auch Anwendungen vor, bei denen der Spritzgießprozess zykluszeitbestimmend war.



Bild 3: Hochwertige Piano-Black-Optik im Spritzguss durch Überfluten mit puroclear®

Sicherlich spielen bei der Aushärtezeit auch die Dicke der Beschichtung und der Aufbau des Trägerbauteils eine wesentliche Rolle. So werden bei Edelhölzerteilen mit Schichtdicken von etwa 1mm, die dem Endbauteil respektive der Echtholzstruktur seine hohe Tiefenwirkung verleiht, Reaktionszeit von 90-100s erzielt. Hier ist auch dem natürlichen Werkstoff Holz als direktem Untergrund Rechnung zu tragen. Auch wenn diese Zeiten im Vergleich

zum obigen Beispiel höher liegen, so bringen sie dennoch eine ordentliche Einsparung von etwa 25% im Vergleich zum Überfluten mit bisher gängigen Überflutungssystemen.

Die mit puroclear® zu realisierenden Aushärtezeiten ermöglichen folglich sowohl direkte Einsparungen bei bestehenden Technologien als auch die Umsetzung neuer integrierter und damit hocheffizienter Verfahren, insbesondere als Alternative zur klassischen Lackierung mit ihren hohen Ausschussraten. Dabei ist nicht nur die hervorragende Selbsttrennung von Bedeutung, sondern auch die vergleichsweise moderaten Verarbeitungstemperaturen mit lediglich 60-80 °C leisten hier ihren Beitrag, da sie im Hinblick auf die Werkzeugtemperatur der des Thermoplastspritzgusses ähneln. Insofern lassen sich die Prozesse gut koppeln.

In den niedrigen Werkzeugtemperaturen findet sich ein weiterer Vorteil. So liegen diese Temperaturen im Vergleich zu den heute üblichen Werten von etwa 90-110°C bei der Fertigung von Edelmetallteilen deutlich niedriger und dies bei gleichzeitig kürzeren Aushärtezeiten. Dies spart nicht nur Energie, sondern ist zudem auch angenehmer für den Werker. Mehr noch führen die hohen Temperaturen bei längerer Einwirkung zum Vergilben des Materials. Vor diesem Hintergrund muss die Maschine bei längeren Produktionspausen oder Produktionsunterbrechungen von mehr als 2-3 Tagen gespült werden. Dies kostet Zeit und Material. Puroclear®-Systeme vergilben aufgrund der niedrigeren Temperaturen und der chemischen Zusammensetzung über einen langen Zeitraum nicht, so dass Produktionsunterbrechungen von mehr als 1 Woche bei geeigneter Maschineneinstellung (z.B. Aussetzkreislauf) möglich sind. So ist ein vergleichsweise einfaches Einfahren nach den Werksferien z.B. über Weihnachten möglich.

5.3 geringere Investitionen

Die Verarbeitungstemperatur spielt auch beim Maschineninvest eine Rolle. So reduziert sich bei Temperaturen unter ca. 80°C der Maschinenaufwand, da ab dieser Temperatur spezielle Maschinenelemente und Baugruppen eingesetzt werden müssen. Zudem steigt der Aufwand zur Gewährleistung einer konstanten Temperaturführung mit zunehmender Verarbeitungstemperatur.

Investeinsparungen werden weiterhin dadurch ermöglicht, dass die puroclear® Systemkomponenten (Polyol und Isocyanat) bei Raumtemperatur pumpfähig sind. Vor diesem Hintergrund kann auf die bisher notwendige Vorheizstation verzichtet werden. Darüber hinaus reduziert sich der Aufwand für die Absaugung am Werkzeug sowie das Equipment für den Trennmittelauftrag durch die selbsttrennenden Eigenschaften entsprechender puroclear®-Systeme.

6. Anwendungsbeispiele und Zukunftspotenzial

Das erste Serienteil, bei welchem sich die selbstheilenden Eigenschaften der puroclear®-Systeme nach umfangreichen Tests und Prüfungen im Vorfeld für diese neue Materialklasse nun in der Praxis beweisen mussten, ist das Lenkrad der neuen Mercedes S-Klasse. Seit geraumer Zeit ist als weitere Anwendung ein Edelholzlenkrad mit puroclear®-Oberfläche in der gehobenen C-Klasse in der Modellreihe CLS im Einsatz. Und weitere Anwendungen in diesem Bauteilsegment werden sicherlich folgen.



Bild 4: Edelholzlenkrad der neuen Mercedes S-Klasse: Selbstheilung in der Königsdisziplin
(Hersteller: Quin)

Neben dem Einsatz im Bereich Lenkrad sind jüngst weitere Serienanwendungen für Edelholzteile dazu gekommen. Hier werden zunächst primär die Vorteile der Selbsttrennung genutzt. Es ist allerdings nur eine Frage der Zeit, wann auch in diesem Bereich puroclear®-Systeme mit stärkerem Fokus zusätzlich auf selbstheilende Eigenschaften zum Einsatz kommen. Prädestiniert sind hier Bauteile im Bereich der Mittelkonsole, wo doch der eine oder Schlüssel einmal abgelegt wird und zu Beschädigungen führen kann.

Aber auch jenseits der Edelholzanwendungen im Fahrzeuginnenraum gibt es verschiedene Entwicklungsprojekte und Studien in dem großen Feld der Bauteile mit Piano-Black-Optik, für die die hohe Nachfrage ungebrochen zu sein scheint. Naheliegend ist zunächst der Einsatz für entsprechende Zierteile als kostengünstigere Alternative zum Lackieren, was derzeit intensiv evaluiert wird. Als eher mittelfristige Konzeptstudien wurden hier bis dato aber auch z.B. komplexe Blenden für die Mittelkonsole mit gleichzeitig hoch glänzenden und matten Bereichen sowie zahlreichen Durchbrüchen für Schalterelemente realisiert (Bild 5).

hochglänzende und matte Oberfläche in einem Fertigungsschritt



Bild 5: Komplexe Schalterblende als Demonstrator (Skintec® Firma Kostal, Bild: Kostal)

Weiterhin wurde der Einsatz von puroclear® für verschiedene Funktionsbauteile erfolgreich erprobt. So z.B. in einer etwas weicheren Einstellung für vollständig überflutete Schalterblenden mit entsprechendem haptischem Feedback. Weitere Projekte umfassen Bauteile mit hinterleuchteten Funktionsanzeigen und kapazitiven Schaltern. Darüber hinaus kann die hohe Konturgenauigkeit bei der Abformung genutzt werden, um nicht nur ein mattes Erscheinungsbild zu realisieren, sondern auch andere Oberflächenstrukturen. Langfristig orientiert sind sicherlich Entwicklungen in Richtung Funktionsstrukturen, wie sie mit dem Projekt Nanoskin zur Entspiegelung von Oberflächen bereits gestartet wurden. Man darf also gespannt sein auf die nächsten Serienanwendungen.

7. Fazit und Ausblick

Mit puroclear® wurde eine neue Generation an Beschichtungswerkstoffen entwickelt und erfolgreich in den Markt eingeführt, die durch die einstellbaren selbstheilenden Eigenschaften nicht nur ein Mehr an Alltagstauglichkeit bieten, sondern durch weitere Benefits wie insbesondere der Selbsttrennung auch wirtschaftliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Technologien bieten. Das Innovationspotential der puroclear®-Produktfamilie reichte dabei soweit,

dass die Jury der SPE (Society of Plastic Engineers, Inc.) im Jahr 2015 hierfür der Rühl Puromer GmbH mit ihren Partnern den **SPE Innovation Award 2015** im Bereich Fahrzeuginterieur verlieh. Als Krönung wurden hier ausgewählte Bauteile mit einer bionischen Oberfläche in Form einer Haifischstruktur ausgestattet (Bild 6).



Bild 6: Bauteile mit Haifischoberfläche im Interieur und Exterieur als Demonstrator im Rahmen der SPE Preisverleihung 2015

Der Fokus lag zunächst auf dem Fahrzeuginterieur. Aber auch für das Exterieur kam schnell die Frage nach den Einsatzmöglichkeiten, um die Selbstheilungseigenschaften und/oder die Selbsttrennung auch dort zu nutzen. Auch hier gibt es verschiedene Entwicklungsprojekte - eines zusammen mit der Audi AG, das auf die Nutzung spezifischer Eigenschaften des puroclear® als Lackträgerschicht auf CFK-Bauteilen abzielt und damit das Messeprojekt der K2013 von KraussMaffei zusammen mit Rühl Puromer, Henkel und weiteren Partnern aufgreift. Andere Entwicklungen zielen auf die direkte Nutzung der puroclear®-Oberfläche als Sichtteil im Außenbereich ab. Eine Reihe von Anforderungen sind hier auch bereits erfüllt, wie u.a. mit Bravour die Kratzfestigkeit im Waschstraßentest, die Medienbeständigkeit z.B. gegen Baumharz und die Sonnensimulation in Bezug auf Glanz und Farbe. Dennoch bedarf es einer intensiven Weiterentwicklung der puroclear®-Systeme, um auch hier das Lastenheft vollständig zu erfüllen. Dieser Aufgabe stellen wir uns, um die Vorteile der puroclear®-Beschichtungswerkstoffe zukünftig auch dem Exterieur zugänglich machen zu können – vielleicht dann auch für bionische Oberflächen mit Haifischstruktur im Exterieur zur nachweis-

lichen Verbesserung der Aerodynamik, für die es auf der letzten SPE-Preisverleihung gleich einen weiteren Innovationspreis gab - in diesem Fall für die Firma Frimo mit Rühl Puomer als einem der Partner.

Mono-polymer lift-gate solution cuts CO₂ emissions

G. Liraut, Renault sas, Guyancourt Cedex, France;

A. Tebib, Trinseo, Paris La Défense, France

Abstract

Trinseo (NYSE: TSE), a global materials company and manufacturer of plastic, latex and rubber, has developed a full thermoplastic lift-gate solution in a joint development project with Renault, the Paris-based automaker. This new solution has been commercialized and implemented in the series production of the 2015 Renault Espace. Renault is using the same material and design process for the front-end carrier of the Espace, which allows the car manufacturer to better rationalize material sourcing and leverage injection-molding technology in-house to produce lighter parts. The material selection and design methodologies from this project are not only limited to this vehicle model, but will be applied to the Renault Megane, the Talisman and other car models.

Through virtual process simulations—from testing the materials' specific requirements to analyzing their performance in the final part design—Trinseo contributed its expertise to solve various material challenges involved in designing a full thermoplastic structural part.

- This resulted in the first thermoplastic lift-gate solution for the Renault Clio in 2012. Both teams collaborated closely in the engineering phase to design the actual structural part of the lift-gate. Trinseo also applied its expertise in the material development implementation phase to select and test the materials required to fulfill the specific requirements for a lift-gate. To achieve this, extensive process simulation has been conducted at Trinseo's global Application Engineering & Design Centre (AEDC).
- The design and material development expertise of the Renault Clio was leveraged in developing the lift-gate for the new Renault Espace in 2015 which required a larger plastic part resulting in new technical challenges.

1 Introduction: building on long-term partnership and expertise

Vehicle weight reduction is one of the most important ways of improving fuel efficiency and reducing CO₂ emissions. Safer and environmentally sustainable vehicles are a priority for European authorities. This is why the automobile industry has been searching for an efficient alternative to steel components for a long time. To stay ahead of market demands and meet these sustainability priorities, Renault has been partnering with Trinseo for many years to explore how material development can contribute to the car manufacturer's strategic light-weight projects.

With the fourth generation of the Renault Clio, introduced in autumn 2012, the French car manufacturer was able to reach its ambitious target of reducing the weight of the lift-gate part by approx. 15%. Functional and design specifications and current recycling requirements tightened the project parameters further.

For the lift-gate of the Clio, the use of a lightweight polymer was proposed by Renault. The automobile manufacturer started working with Trinseo to initiate the engineering phase of this research and development effort. The following overview of the development project for this lift-gate solution illustrates the synergies that are possible when newly developed polypropylene materials are combined with improved part geometry and processing technologies.

2 Technical challenges encountered in both lift-gate projects

2.1 Creating a good fit with high durability

A complex car part like the lift-gate must meet high standards for visual appeal, have good dimensional tolerances and fit throughout the in-use temperature cycle and be able to invisibly accommodate many hidden elements such as hinges, lock mechanisms and electrical wiring. At the same time, expansion and durability (in particular of the structural support part of the lift-gate) are critical factors, since the lift-gate is subject to mechanical and climatic forces. Finally, the lift-gate must be able to fulfill its function while remaining stable and watertight.

Up until 2012, common metal / plastic combinations for lift-gate constructions included:

- Metal exterior and structural support, combined with a thermoplastic interior (TF-PP and ABS)

- Duroplast¹ exterior and structural support, combined with thermoplastic interior (TF-PP, ABS)
- Thermoplastic exterior (TF-PC/ABS, TF-PP) on steel-reinforced thermoplastic structural support (LFG-PP) with thermoplastic interior (TF-PP, ABS).

The fourth-generation Renault Clio, with its novel, almost entirely thermoplastic three-part lift-gate solution, marked a turning point when it was introduced in 2012. A 15% TF-PP was used for the interior, which is UV-stable and shows high scratch and impact resistance, as well as low gloss. Compared with other interior TF-PP materials, its low density (only 1.01 g/ccm) and good flow characteristics permitted thin walls and lower weight while still fulfilling all mechanical requirements.

The major challenges were:

- **Assembly and fit and finish**
- **Durability**

2.1.1 Assembly and fit and finish

This manufacturing challenge was definitely the most daunting aspect of creating the lift-gate which the project team had to solve. Two major aspects are to be considered:

- The assembly of the two different parts (the structural part and the inner skin) of the lift-gate. The two plastic parts had to be assembled together in such a way that they formed one final part. This is extremely challenging because both plastic parts have different shrinkage and warpage behavior which meant iterations in the part and tool design. The individual injection-molded parts needed to fit in a fixture in order permit a robust, durable laser weld between the two parts. This was addressed through selective rib placement. Ribbing created a part which deforms less after molding. Process simulation also permitted the use of ribs for adding strength and rigidity and to ensure that the final part had very low warpage. It was equally important that the connection between the glass window and the structural part fitted as well. Ultimately, the final part had to be acceptable for Renault's assembling process.

¹Duroplast is a composite thermosetting plastic, a close relative of formica and bakelite. It is a resin plastic reinforced with fibers (either cotton or wool) making it a fiber-reinforced plastic similar to fiberglass [Wikipedia].

- The fit and finish of the lift-gate part with respect to the car's body in white (BIW): another key requirement is to have a good fit between the lift-gate and the BIW. In other words: when going through temperature cycles, the lift-gate must retain its dimensions to prevent water entering the interior of the car. Accordingly, significant effort was devoted to obtaining a good connection between the lift-gate and the BIW by means of additional mechanical simulations and experiments. Due to the stiffness of the glass, the window introduces additional rigidity and durability to the assembled part.

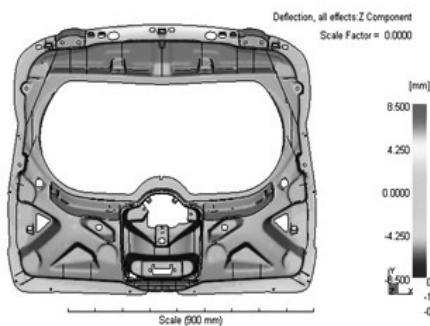


Fig. 1: Rib placement to create a part which deforms less

2.1.2 Durability

Another important manufacturing challenge was the durability of the final part. Durability has two aspects:

- The durability of the part needed to guarantee a perfect seal between the lift-gate and the body in white. Given that the part was going to be subjected to different temperature cycles, it had to be watertight under all temperature conditions. In addition, it was also important to create space and apply design solutions to ensure that expansion and shrinking of the part due to temperature was possible.
- Perceived durability of the lift-gate by the end consumer – haptics. Renault conducted several consumer tests amongst users to measure the perceived touch and feel of the plastic-lift gate. The part was perceived as more durable than the incumbent metal version.

2.2 Meeting performance and process needs

The development challenges of the Renault Espace project primarily centered on achieving the required dimensional stability of the lift-gate's assembly at different points of the production process, including the laser welding process as well as a temperature cycle that impacted the rubber seal's watertightness and visual perception of the gap between the lift-gate and BIW (body in white). The team also needed to design the lift-gate using plastics which would be suitable for laser welding. During the development process, the project partners therefore used process simulation to visualize and anticipate the behavior of the polymer materials. This method allowed the teams to not only optimize the large structural part's dimensional stability, but also meet the project's overall weight reduction goal.

3. Conceptual phase: the prototype and specific simulation technology used

When developing the Renault Clio lift-gate, Trinseo supported Renault in the engineering phase with process simulations to obtain the right design concept for developing a thermoplastic lift-gate. As mentioned previously, a lift-gate is a complex application for several reasons: it needs to fit perfectly onto the car and has numerous functions that must be accommodated. Additionally, it is subjected to many external influences. Exposure to high or low temperatures in a humid environment can cause deformation issues which must then be addressed to guarantee watertightness. To help improve impact resistance, expansion and durability of the structural part of the lift-gate, Trinseo's engineers introduced a long-glass-fiber-filled polypropylene resin (LGF-PP) to meet such requirements. By increasing the glass content of the molding material, the lift-gate is able to gain improved stiffness.

To select the right materials, extensive experience in producing thermoplastic solutions for automotive applications is required. The Application Development and Design Center of Trinseo supported Renault with their process simulation expertise.

The CAE tools of the AEDC group played an important role in the process optimization including improving the design of the hot runner system and the placement of the injection gates. These factors have a significant influence on optimizing the length distribution of the glass fibers in the final injection-molded part. The lower portion of the structural component needed special attention because of the gap dimensions. Here, it comes down to the finest details, so virtual prototyping was used to calculate the expected part warpage using LGF-PP models. Based on the findings from virtual prototyping, the strategic placement of additional

ribs in the design succeeded in reducing warping by 50%, thereby significantly improving dimensional stability.

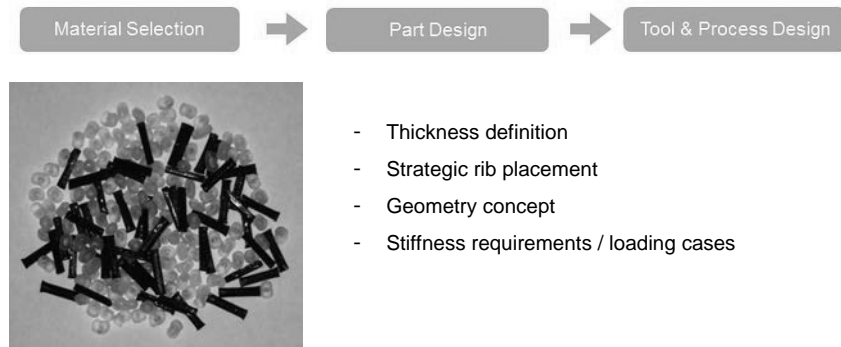


Fig. 2: Material selection



Fig. 3: Part design

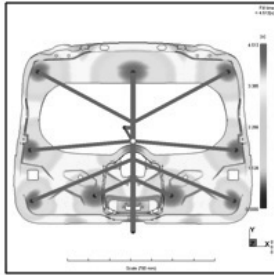


Fig. 4: Tool design and process optimization

3.1 Proven advantages of LGF-PP

LGF-PP provides a number of benefits. LGF-PP such as Trinseo's INSPIRE™ long-glass-fiber-filled polypropylene resin helps to meet the automotive component's stiffness and durability requirements while enabling significant lightweighting. As the automotive industry evolves, so do industry demands and requirements. In the past, resin manufacturers provided materials that satisfied the demands and requirements for the specific part. Today's industry is more focused on meeting the same requirements but at a minimal weight and cost. There is unanimous agreement in the industry that using LGF-PP is an interesting concept to examine. For instance, when producing a structural part such as the lift-gate using INSPIRE™ LGF-PP, a 15 to 20% weight reduction potential can be achieved, as opposed to producing it in steel. The glass content of the molding material determines the basic stiffness of the component, and increasing glass content will result in a higher part stiffness. The stiffness and the low density of the polymer not only enables lightweighting but also results in cost reduction.

In addition to the fact that it enables lightweighting, an added benefit is that fillers in a polymer such as LGF-PP also reduce the shrinkage of the material compound, making the part produced with these filled PP's fit more easily next to adjacent parts than an unfilled polymer would. This structural part fits into the car's metal structure (i.e. BIW) and therefore needs to have an excellent fit with acceptable gaps between parts. By adding the LGF to the polymer, engineers have a better control over the thermal expansion and can guarantee a tighter gap control.

3.2 Limitations tied to LGF-PP

A common challenge is the delicateness of the fibers: when LGF-reinforced PP is being processed, it is important to incorporate the longest possible fibers into the final part because that will result in the best mechanical properties. However, during the injection-molding process, most of the long fibers break during plastification and before injection of the material into the mold. Understanding this phenomenon is crucial to ensuring that sufficiently long fibers remain intact in the final molded part. Renault closely collaborated with Trinseo during the development of the lift-gate concept to resolve these types of manufacturing challenges.

3.3 Understanding fiber distribution and orientation

Consequently, understanding fiber distribution and their orientation in the final part is essential. Through extensive R&D, Trinseo has achieved a fundamental understanding of the effect of adding long glass fibers to polymer and how processing methods have an effect on the performance of the final part. By taking fiber orientations and length into account as calculated by process simulation, the quality of the mechanical simulations improves correspondingly. That is how Trinseo's R&D and Engineering departments developed virtual prototypes using optimized Computer-Aided Engineering (CAE) tools. Using the customer's part geometry (CAD) in simulations, Trinseo can predict the mechanical behavior of the part including calculated fiber orientations and length and can recommend further optimization of the part design with regard to, for instance, wall thickness.

As experienced firsthand by Renault, the molding process greatly affects fiber length. By analyzing the fiber length distribution using Trinseo's proprietary technique, it was possible to link this to the plastification screw of the injectionmolding machine more than to the mold and/or part design. By using a so-called 'soft' screw, the fiber length could be optimized on Renault's machine

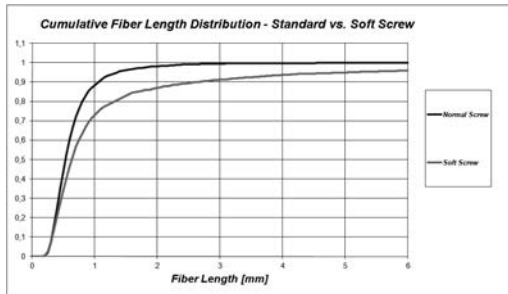


Fig. 5: Optimization of fiber length by using a 'soft' screw

4 Production phase: fine-tuning materials to Renault's production process

In 2002 Renault was already aware of the engineering capabilities of Trinseo from prior projects using LGF-PP, such as the structural development work that Trinseo performed on the front-end carrier (FEC) of the VW Golf. For that application, the functional design and production requirements presented similar complexities, with metal and thermoplastic to be combined into a single solution.

In the realization / production phase of the Renault Clio lift-gate, Trinseo offered both material development and processing support. In the selection of the materials, Trinseo was confronted with several challenges due to the complexity of the part. The selected materials were tested and fine-tuned to Renault's specific production process including injection molding, painting, bonding and welding. The final lift-gate design consisted of three parts:

- The inner skin is injection-molded using a talc-filled polypropylene compound from Trinseo and connects via laser welding to the structural part.
- The structural part is produced using a long-glass-fiber-filled polypropylene (LGF-PP) concentrate developed by Trinseo. This concentrate is diluted directly in the molding machine with the appropriate PP co-polymer resin.
- The outer skin was proposed to be made using Trinseo's INSPIRE™ At-Press talc masterbatch concept. The final material is made into plastic through blending of the three components, these being polypropylene impact co-polymer, specifically formulated 70% talc masterbatch and the required color concentrate, allowing for a tailored mechanical performance to meet the OEM-specific application requirements.



Fig. 6: The three-part construction that forms the Clio's lift-gate



Fig. 7: Full thermoplastic lift-gate solution of the Renault Clio

Building on the success of the Renault Clio lift-gate, the team started working on the Renault Espace's lift-gate. The desired performance attributes, dimensional stability, and weight savings were achieved through a combination of factors, starting with the selection of the optimal combination of Trinseo's long-glass-fiber-filled polypropylene (LGF-PP) and PP compounds. To best utilize the material properties and to meet all necessary performance requirements, while also minimizing its weight and cost, the lift-gate design was engineered with this thermoplastic material selection in mind. Following the Clio part- and tool-design concept, construction of the tool and part geometry was made similar in order to ensure the necessary molding productivity and part quality while optimizing warpage of this larger lift-gate.



Fig. 8: Trinseo's LGF-PP used to build a durable yet lightweight lift-gate for the Renault Espace

5 Specific material characteristics of Trinseo's LGF-PP

For both lift-gates a long-glass-fiber polypropylene (LGF-PP) material system was introduced for the structural part. By increasing the long-glass-fiber content the robustness and stiffness of the injection-molded parts could be increased. Renault also worked with the plastics producer to optimize the part construction, tool design, and injection-molding screw selection suitable for producing this LGF-PP lift-gate.

The LGF-PP solutions from Trinseo are designed for lightweight optimization and customer flexibility when developing structural car components. For the lift-gate of the new Renault Espace, Renault is using a 60% glass concentrate system, which is diluted with neat polypropylene to achieve the direct proportion of glass needed.

6 Process of using LGF-PP

Processing LGF-PP materials is challenging. For dilution systems, the dosing of a cylindrical LGF-PP glass concentrate (60%) and a spherical dilution PP material must be conducted in a consistent way in order to achieve stable glass contents of, for example, 40% glass in the final part. Basically, fluctuations in the dosing unit are directly translated into fluctuations in the produced parts. The differences in geometry and thus flow properties within the dosing unit between a cylindrical granule and a spherical one can lead to unwanted fluctuations in the resulting parts. In contrast, when dosing is measured through weight properties, it allows for a better control of the produced parts, with a stable glass content as well as a good total weight ratio.

Another potential issue can be the stability of the glass concentrates. The higher the glass content, the more critical the stability of the granules becomes. Due to the large number of plastic lift-gates Renault needed to produce, Renault asked for Trinseo to transport its LGF-PP material for silo storage in bulk. Being the first time Trinseo's LGF-PP concentrate had been delivered in bulk via trucks a close technical follow-up was required to ensure high product quality at any time from production in Trinseo's plant until processing at Renault. To achieve this, Trinseo tested the product quality after production, after bulk loading and unloading, at several stages within the conveying system at the Renault plant and right before use in the injection-molding machine.

In addition, conveying glass-filled material also usually creates dust due to friction. To overcome this, the right hardware set-up, together with a material that withstands even harsh conveying set-ups, were selected by Renault to ensure a clean and stable production process.

7 Results of the project: decreased weight for increased sustainability

Replacing metal with thermoplastics enabled Renault to achieve a 15% weight saving over its metal version and offered the company more design freedom with less upfront investments. In addition, because the base polymer of the lift-gate solution as a whole is the same for all components, the part can be easily recycled. All these factors taken together result in the benefit of this lighter weight assembly lowering the fuel consumption and CO₂ emissions of Renault cars and 'driving' towards a more sustainable future.

This approach also permits bonding of the structural and inner part using laser welding, which is novel considering the large size of the assembly. Regarding the handling and quality perception of the assembly, Renault's thermoplastic lift-gate solution is perceived by the user as outperforming its metal alternative when in use. This solution also provided improved NVH (noise, vibration, and harshness). In addition, Renault's manufacturing department was able to fully commercialize this solution by implementing a robust production process, which has resulted in a cluster-free LGF-PP part, while using the masterbatch approach for this high volume of parts.

The material selection and design methodologies from this project are not limited to only this particular vehicle model. Renault have confirmed that they will also apply this technology to the Renault Megane, the Renault Talisman and other planned car models.



Fig. 9: Renault Clio model and full thermoplastic, developmental lift-gate solution



Fig. 10: New Renault Espace 2015 model with full thermoplastic lift-gate

8 Summary and outlook: the road ahead for lightweight solutions

Through close collaboration over the past five years between the material supplier and the car manufacturer, an innovative lift-gate concept has been designed and produced, paving the way for commercialization in the Renault Espace 5 and other vehicles in the near future. Weight savings, styling freedom, recycling and function integration are the main objectives. With the full thermoplastic lift-gate solution, Renault not only contributes to weight reduction for optimal fuel efficiency but also responds to waste management recycling guidelines, promoting recyclability without disassembly of the application. Knowing that the lift-gate solution is made with the same base polymer, the part can be easily recycled and used in other future applications.

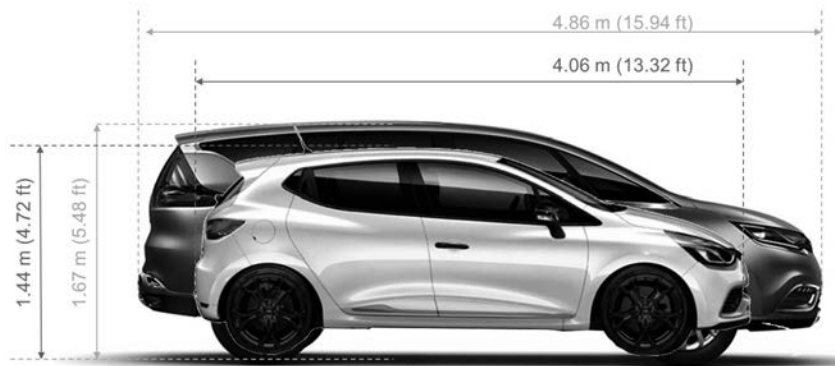


Fig. 11: From a small to a larger structural part with the Renault 2015 full thermoplastic lift-gate

Key results of the project were the following:

- The all-thermoplastic lift-gate offers a **15% weight saving** over its metal equivalent
- Easier **recyclability**
- Bonding of the structural and inner part using **laser-welding for a large part thereby avoiding non-recyclable adhesives**
- **Excellent fit and finish allowing for small gaps between body panels**
- **Material selection and design methodology** can be leveraged **on future models and other parts** (front-end carrier)

Key benefits of LGF-PP for semi-structural applications are the following:

- Weight reduction of 15% or more
- Cost efficiencies - reduced material, production, application costs
- Dimensional stability - stiffness, low coefficient of thermal expansion
- Durability - impact, scratch and mar, long-term thermal aging strength
- Appearance - low gloss, UV stability
- High level of dimensional stability
- Processing flexibility - Trinseo At-Press technology
- Recycling by regrounding and re-processing

Class A Compression-Molded Carbon-Fiber Hood

Development and production of the Cadillac ATS-V and CTS-V Hood

Dr. J. J. Laux, Magna Management, Cham, Switzerland;

H. Moore, Polycon Industries, a Division of Magna Exteriors Corp.,
Guelph, ON, Canada;

J. Ingram, Magna Exteriors Corp., Concord, ON, Canada;

J. Kowalski, Magna Exteriors Corp., Troy, MI, USA

Abstract

The development and volume production of a Class A, Painted Carbon-Fiber Hood, presented challenges to both the Magna Exteriors development and the production teams. Global collaboration, geographical proximity to our customer and visible, shared objectives enabled completion in a relatively short time.

1. Introduction

Cadillac has been a leading luxury auto brand since 1902. In recent years, Cadillac has engineered a historic renaissance led by artful engineering and advanced technology. Since its inception in 2004, Cadillac's V-Series has driven remarkable power and performance capability into the brand's growing luxury car range. Building on the strengths of the award-winning ATS and CTS product lines, the V-Series adds impressive track capability to what was already the lightest and most agile-driving car in the luxury class. The result is a dual-purpose luxury performer – a car with true track capability right from the factory that is also a sophisticated luxury car on the road. Power-to-weight ratio is substantially improved with the selective and precise use of carbon fiber. A lighter hood is a major contributor to the ideally balanced weight ratio that a high-performance vehicle requires. Cadillac V-Series – where the racetrack meets the road. Inspired by top-of-the-line, race-ready vehicles, they are tailor-made to bring stunning performance to everyday driving. “Cadillac's V-Series is the best example of Cadillac's emerging product substance – and the purest expression of the passion at the core of the brand,” said Johan de Nysschen, Cadillac President [1].

2. Functional design

Almost every exterior panel on the Cadillac V-Series is unique, from the fascias and fenders, to the hood, rear spoiler and rocker moldings – and every one was designed to support the car's capability. "All of the design elements have a purpose," said Andrew Smith, executive director, Cadillac Global Design. "They contribute to lift reduction, enhanced cooling, reduced mass or all of the above." [1]

The unique elements include:

- A lightweight carbon-fiber hood using heavy tow unidirectional carbon-fiber epoxy prepreg material
- An air-extracting vent that not only pulls hot air out of the engine compartment, but helps reduce lift, at speed, by channeling air pulled through the radiator out and over the top of car rather than allowing trapped air to exit under the car.

When Cadillac gave the go-ahead to Magna Exteriors, in January 2013, to manufacture a Class A, Painted Carbon-Fiber Hood for the 2016 ATS-V Coupe (Fig. 1), the 2016 ATS-V Sedan (Fig. 2) and the 2016 CTS-V Sedan (Fig. 3), they clearly specified basic requirements that included excellent surface quality, lightweight and high dimensional stability. This is reflected in the use of clearly defined materials and processes to yield a product that is significantly lighter than the previous product, while meeting all quality, performance and safety targets. The use of innovative technologies and lightweight materials had a significant influence on the performance of the vehicle.



Fig. 1: Cadillac 2016 ATS-V Coupe. Picture courtesy of General Motors (GM)



Fig. 2: Cadillac 2016 ATS-V Sedan. Picture courtesy of GM



Fig. 3: Cadillac 2016 CTS-V Sedan. Picture courtesy of GM

3. Enter Magna Exteriors

Starting in 2009, Magna Exteriors had embarked on a broad-based technology push for lightweight carbon-fiber-based composites. One of the new technologies to emerge from this advanced development effort was an out-of-autoclave Class A carbon-fiber epoxy composite that was produced by compression molding a unidirectional carbon-fiber epoxy prepreg, in a matched metal tool, at elevated temperature, with a cycle time that had never been previously achieved. At the same time, General Motors (GM), one of our largest customers, was looking for a Class A-capable, carbon-fiber composite for future car models. Based on the preliminary outcome of this development of compression-molded Class A parts, GM nominated Magna Exteriors for the hoods of the all-new Model Year 2016 Cadillac ATS-V and CTS-V.

4. Material selection and development

With regard to Materials of Construction, we chose a low-cost 50K industrial carbon fiber from Zoltek [2] for our Class A unidirectional carbon-fiber epoxy prepreg. This became the selection of choice due to a good balance between cost and performance. Our advanced studies had shown that a low areal weight, wide width format, unidirectional carbon-fiber prepreg gave us the best surface quality versus alternatives such as bond-stitched textiles or woven products.

As for a matrix system, together with our prepreg supplier Barrday Advanced Material Solutions, based in Cambridge, Ontario, Canada [3], we developed a fast-cure, high T_g (180°C) epoxy prepreg resin system that was fine-tuned to yield a prepreg with excellent fiber spreading and uniformity. To aid processing, the prepreg also had to have a sufficient level of tack that balanced the need for handling and cross-ply production, yet be capable of preforming and loading by automated transfer.

The next attribute that required attention was prepreg resin viscosity. At the time, most prepregs on the market were tailored for an autoclave process. Magna's compression molding process, in matched metal tooling, presented new challenges, namely melt characteristics, gel time and final cure cycle that took place over a time scale of minutes and not hours. Prepreg resin viscosity was modified to minimize bleed of the resin system during melt, gel and compression phases.

Finally, not only did the resin have to deliver a rapid cure, to allow high volume production from one mold, it also had to exhibit a very high level of ductility and fracture toughness, which was more important for the inner reinforcing panel. Furthermore, a high level of resin and color clarity was required for the exposed-weave inner panel variant.

The carbon-fiber composite development was supported by a number of material design and characterization loops. Typical material design loops included: 0 / 90 ply book development and optimized cross-ply design. These were then assessed using numerous material characterization methods such as tensile and compressive testing at room, hot and cold temperatures, G_{1c}/G_{2c} fracture toughness measurements and DMA.

5. Process development

Magna's out-of-autoclave process employs compression molding in matched metal tooling to ensure a high-quality part with molded surfaces on both sides of the carbon-fiber composite. Compression tool design for unidirectional carbon-fiber prepreg had to be developed for maintaining thin-wall stock, achieving required tolerances, and tool seal-off. To this end, a large database of best practices was generated from trials in 2D and 3D prototype molds. Magna invested in a modified tool that was cut to 50% scale, to allow for early phase development.

In moving towards our ultimate goal of producing 3D parts with an automated process, the development of an End of Arm Tool (EoAT) for achieving both pick-up and release of the prepreg was required. While part demolding uses standard high-temperature suction cups, material loading of the uncured prepreg blank in the compression tool required a far more sophisticated EoAT. The need for picking-up and preforming the 2D blank was addressed in the design of the EoAT. Creating an 80% preform became one of our many early development efforts.

At this point in the development, we faced a number of difficult design challenges, especially in the area of the Hood Scoop on the Class A outer panels. To solve these issues, Magna Exteriors developed engineering capability using Siemens Fibersim [4] for drapability analysis of carbon and glass laminate projects. Evaluation of forming capability and evaluation of trimmed blanks are estimated based on the desired 3D design geometry. This is then turned into flat patterns for use in cutting the 2D blanks. Additionally, the Fibersim outputs are used for our CAE predictive models. The ply tables are generated and mapped to the mesh model with full orientation data included. Magna Exteriors uses both LS-Dyna [5] and Abaqus [6] for laminate modeling. Dyna has been the primary package we have used for in-house generated design studies.

For the Cadillac V-Series hood projects, Magna Exteriors was sourced on a build-to-print basis. General Motors developed the design contours, and ply stacks were generated in global [0/90/0]_s and global [0/90]_s configurations. We applied Fibersim primarily to evaluate potential flat patterns, and then looked at the hot spots created based on various aggressive

contour regions. The manufacturing process is difficult to map, due to multiple plies being stacked, then formed under pressure at elevated temperature. The drapability analysis focuses on one ply at a time, and assumes various hold points that may or may not be consistent with the production process.

Without being able to change any of the existing build-to-print data, we were able to manage any of the cut-away lightening holes and detail items such as the Hood Scoop areas. We focused on manipulation of the cutout geometry to help influence the drapability of the 'areas of concern'. Fibersim was used to create the blanks, and these were subsequently optimized for scrap reduction. By identifying regions of concern, and looking at the effect of darts, slits and other features, the engineering group was able to help the manufacturing team to develop process improvements (Fig. 4).

Siemens Fibersim Simulation Cadillac ATS-V Hood Outer

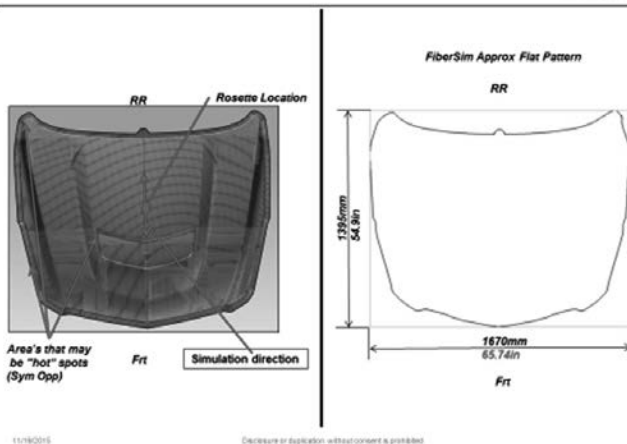


Fig. 4: Draping simulation example from the ATS-V Class A hood outer

An additional concern, through all these trials was the development of an external mold release. This presented a major challenge to both solvent and water-based external mold-release suppliers, as very few carbon-fiber-reinforced part molders use matched metal tooling and the number of parts produced per day was previously very low. Hence, external mold-release optimization for a high-volume environment that would provide multiple releases per tool, still needed to be developed.

After demolding the parts and cooling to room temperature, our next challenge was to develop a trimming process to deliver the final trimmed parts. After a dedicated development program that investigated attributes such as nesting, robotic versus 5 axis CNC milling, router bit type, design and coating optimization, together with trim-edge quality versus speed and CNC programming, we chose to go with a 5-axis CNC router process.

The last area of our process development efforts focused on developing a paint process based on a high-bake (121°C) paint system that required specific surface preparation, film build and temperature profile optimization.

6. Production

In our Polycon Industries production division [7] we operate a fully automated preforming and molding operation to produce the required Class A outer panels and structural inner panels for the Cadillac ATS-V and CTS-V (Fig. 5). Tools were sourced from Century Tool & Gage Co. [6]. Post molding, we employ a 5-axis CNC machine to create critical design features. The adhesive is a robotically applied 2K structural adhesive. The final assembly is achieved using an automated bond cell. The adhesive is fully cured as it moves through the paint shop. The hoods are body-color-matched, using a traditional North American high-temperature bake paint system utilizing a 1K / 2K (BC / CC) in 6 colors and fully assembled. Inner panel versions are produced in body color as well as exposed-weave carbon.

The outer Class A panels are produced with a 1.2 mm [0/90/0]_s configuration, while the structural inner panels are produced with a 0.8 mm [0/90]_s configuration. The exposed-weave inner on the CTS-V uses an additional layer of twill to produce the exposed-weave look. Due to the high exotherm associated with the processing of epoxy resin prepregs, special efforts were devoted to develop a very unique and efficient way to remove heat from the mold. Polycon chose high pressure, hot water over steam or oil as the heat transfer media.



June 2016

Disclosure or duplication without consent is prohibited

21

Fig. 5: Carbon-Fiber Class A Production Cell Layout at Polycon. [7]

7. Conclusion

Overall, Magna Exteriors reduced weight from the previous models by a 20% mass savings over an aluminum hood. This decrease in weight is directly correlated with a vehicle performance increase (e.g., Weight Reduction, Reduced Aero Load Deflection). A reduced effort in opening and closing these hoods was also noted. Furthermore, these carbon-fiber hoods meet Pedestrian Safety Standards (Ped Pro).

References

- [1] Cadillac Pressroom. <http://media.cadillac.com/media/us/en/cadillac/vehicles.html>
- [2] ZOLTEK Corporation. <http://zoltek.com/>
- [3] Barrday Advanced Material Solutions. <http://www.barrday.com/materials.html>
- [4] Fibersim. http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/fibersim/
- [5] LS-Dyna. <http://www.lstc.com/products/ls-dyna>
- [6] Abaqus. <http://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
- [7] Polycon Industries a Division of Magna Exteriors Corp., Guelph, ON, Canada. <http://www.magna.com/capabilities/exterior-systems/about-magna-exterior/location>

Perspektiven der polymeren Verglasung im Automobil

Potenziale von Polycarbonat ermöglichen den Einsatz in Seiten- und Heckscheiben

H. Schmidhuber,
Webasto Roof & Components SE, Stockdorf

Kurzfassung

Die Mobilität immer nachhaltiger zu gestalten, ist eine kontinuierlich stärker werdende gesellschaftliche Forderung, die einen festen Platz in den Lastenheften von Automobilherstellern und -zulieferern gewonnen hat. Webasto konzentriert sich dabei im Dachbereich vor allem auf das Thema „Leichtbau“. Vor dem Hintergrund immer schärferer Grenzwerte für die CO₂-Emissionen und durch die Verbreitung der Elektromobilität erhält die Gewichtseinsparung eine ständig wachsende Bedeutung.

Als Faustregel gilt, dass eine Gewichtseinsparung von 100 Kilogramm eine Reduzierung des Kohlendioxid-Ausstoßes um 3,5 g/km bei Fahrzeugen mit Ottomotor und um 3,0 g/km bei Dieselfahrzeugen bewirkt – und zusätzlich Agilität und damit mehr Fahrvergnügen gewonnen wird. Bezieht man ein, dass bei unverändertem Gewicht für diese zusätzliche Agilität höhere Fahrleistungen erforderlich wären (sog. Fahrleistungskompensation), ergibt der Vergleich sogar eine Reduktion des Kohlendioxid-Ausstoßes um rund 8,5 g/km.

Polycarbonat (PC) ist ein Leichtbauwerkstoff, der in Automobilen schon seit einiger Zeit eingesetzt wird. Aktuell liegt der Anteil von Kunststoffen im Auto bei etwa 15 Prozent, wovon knapp ein Drittel auf Polycarbonate entfällt. Dabei handelt es sich allerdings vor allem um Anwendungen in Blenden oder im Innenraum. Transparente Polycarbonatteile sind bislang nur wenige im Fahrzeug verbaut. Das Polymer ist grundsätzlich transparent wie Glas, lässt sich aber beliebig färben. Die Potenziale dieses Hightech-Werkstoffs sind in den vergangenen Jahren allerdings etwas aus dem Blickfeld der Fachöffentlichkeit geraten. Besonders als Werkstoff für Scheiben hat Polycarbonat seine Zukunft noch vor sich. Mit ihm lässt sich das Gewicht von Scheiben um mehr als 40 Prozent reduzieren. Zudem ist es absolut bruchsticher und praktisch frei formbar.

Webasto hat in Entwicklung und Produktion von Polycarbonat-Bauteilen mehr als ein Jahrzehnt lang Erfahrungen gesammelt. Nun sind Materialien und Prozesse für eine deutliche

Ausweitung des Polycarbonat-Einsatzes nicht nur im Dachbereich, sondern auch für die Rundumverglasung von Pkw bereit.

Webasto – Fortschritt aus Tradition

Webasto mit Sitz in Stockdorf bei München ist einer der 100 größten Automobilzulieferer der Welt und zählt in Deutschland zu den Top 15 dieser Branche. Das Unternehmen befindet sich seit der Gründung im Jahr 1901 im Familienbesitz. Der Zulieferer ist in drei Geschäftsfeldern tätig: Dachsysteme, Cabriodachsysteme und Thermosysteme. Mehr als 10.000 Mitarbeiter an über 50 Standorten erwirtschafteten 2014 einen Umsatz von etwa 2,5 Mrd. Euro.

Innovation hat bei Webasto buchstäblich Tradition: Firmengründer Wilhelm Baier Senior, der zunächst Fahrradzubehörteile wie Felgen, Schutzbleche oder Kettenschützer fertigte, stieg in die Automobilbranche ein, als in den 1930er Jahren das Automobil endgültig seinen weltweiten Siegeszug antrat. 1932 konstruierte Wilhelm Baier das erste Auto-Faltdach, das mit wenigen Handgriffen geöffnet oder geschlossen werden konnte. Nur drei Jahre später entwarf er eine sogenannte „Auto-Frischluftheizung“ für wassergekühlte Maschinen. Sie wurde später unter dem Namen „Flüstertüte“ bekannt.

Der Geschäftsbereich Thermosysteme steht für Heiz-, Kühl- und Lüftungssysteme für Pkw, Nutz-, Spezial- und Schienenfahrzeuge, Reisemobile sowie Boote. Neben kraftstoffbetriebenen Pkw-Zuheizern und Standheizungen ist auch die Elektromobilität ein wichtiger Pfeiler der Wachstumsstrategie von Webasto. Dafür wurde ein hoch effizientes, elektrisch betriebenes Heizsystem für Hybrid- und Elektrofahrzeuge entwickelt, das während der Fahrt den Innenraum beheizt. Die Serienproduktion des Gerätes startete 2015 im Werk Neubrandenburg.

Als Zulieferer für Cabriodachsysteme hat Webasto sich ab 2000 etabliert. Heute verfügt der Zulieferer über das breiteste Verdeckportfolio am Markt. Technologische Standards setzen beispielsweise die neuartigen elektrischen Verdeckantriebe, die sehr leise arbeiten und sich durch geringes Gewicht auszeichnen. Um das Gesamtgewicht der Verdecke zu reduzieren, setzt Webasto aktuell auf Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium und Magnesium.

Im Bereich der Dachsysteme fertigt Webasto etwa Schiebe- und Panoramadächer sowie Solardächer. Neben klassischen Werkstoffen kommt dabei auch Polycarbonat zum Einsatz. 2003 begann das Unternehmen ein eigenes Kunststoff-Kompetenzzentrum in Schierling bei Regensburg aufzubauen. Dort werden seit 2007 innovative Dachelemente aus Polycarbonat gefertigt, etwa das transparente Dach für den Smart. Insgesamt wurde bislang ein dreistelliger Millionenbetrag in Schierling investiert. Die Produktionskapazität beläuft sich auf gut eine Million Bauteile aus Polycarbonat pro Jahr.

Durch vielfältige innovative Technologien versteht es Webasto bei Dachsystemen immer wieder Maßstäbe zu setzen. So wurde etwa das vom Unternehmen entwickelte Solardach von der Europäischen Union als Öko-Innovation anerkannt. Es ist (Stand November 2015) die effizienteste Öko-Innovation am Markt. Solche, durch die EU anerkannten Öko-Innovationen, erlauben dem Automobilhersteller eine Gutschrift auf den CO₂-Ausstoß. Eine weitere, ebenfalls ausgezeichnete Innovation, stellt das von Webasto entwickelte transparente Polycarbonat-Dachsystem mit Infrarot-Absorption dar, welches dem Aufheizen des Innenraums effektiv entgegen wirkt.

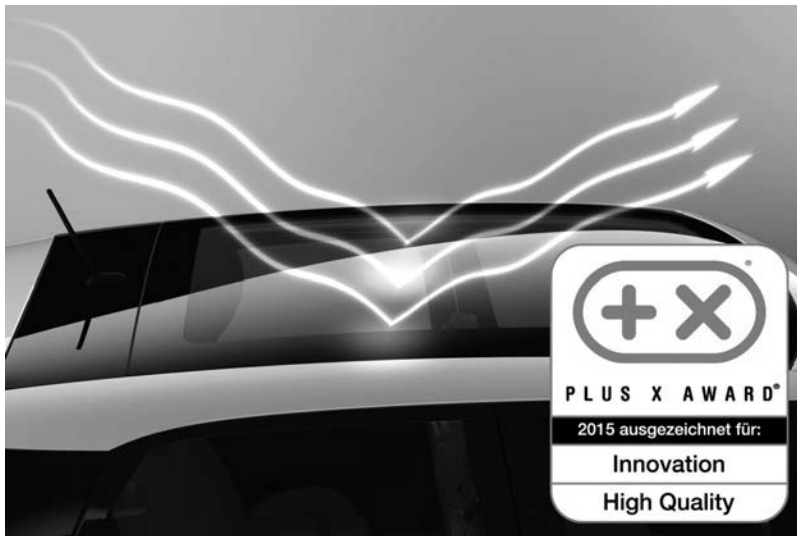


Bild 1: Polycarbonat-Dachsystem mit Infrarot-Absorption

Innovationshistorie

Meilensteine der Entwicklung von Kunststoffen in der Autoverglasung

Schwächen von Glas – Vorteile von Polymeren

Scheiben in Automobilen bestehen bis dato aus Glas. Ihr Anteil in Fahrzeugen hat in den vergangenen 20 Jahren kontinuierlich zugenommen. Waren es 1985 im Durchschnitt ca. 3,5 m², sind es heute rund 4,6 m² pro Personenkraftwagen. Die Gründe hierfür sind vielfältig: einer der beiden wesentlichen Aspekte ist eine gestiegene Fahrsicherheit durch eine verbesserte Rundumsicht. Zweiter wesentlicher Aspekt ist der unverändert zunehmende Kundenwunsch nach einem gesteigerten Wohlbefinden während der Autofahrt durch mehr Licht im

Fahrzeuginnenraum. So sind vor allem die Front- und Heckscheiben großflächiger geworden und transparente Panoramadächer eröffnen dem Insassen einen ganz neuen und nahezu ungehinderten Blick nach oben.

Jedoch: Glas hat sein Gewicht. So wiegen die aktuell durchschnittlich vorhandenen 4,6 Quadratmeter Glasfläche 53,9 Kilogramm – bei einer Hälfte der Fläche aus Verbundsicherheitsglas (mit einer Dicke von 5,5 mm) und der zweiten Hälfte aus Einscheiben-Sicherheitsglas (mit einer Dicke von 4,3 mm). Bei den zu Grunde liegenden Glas-Stärken handelt es sich um Mittelwerte aus verschiedenen, von Automobilherstellern real eingesetzten Gläsern. In Zeiten, in denen Ressourcenschonung, Verbrauchs- und Emissionsreduzierung die automobilen Entwicklung stark beeinflussen, ist der strategische Leichtbau einer der wichtigsten Technologietrends bei den Automobilherstellern und ihren Systempartnern in der Zulieferindustrie. Bedingt durch die hohe Position der Glasscheiben im Fahrzeug, liegt der Schwerpunkt weit oben. Dies beeinträchtigt u.a. die Fahreigenschaften des Automobils nachhaltig.

Bestimmte transparente Kunststoffe bieten sich für die Verglasung als alternative Leichtbauwerkstoffe an. Sie sind glasklar und nahezu beliebig einfärbbar sowie, schlagzäh und wiegen trotzdem weniger als das bislang verbaute Glas. Würde man die oben genannten 4,6 m² durchschnittliche Glasfläche im Pkw durch Polycarbonat ersetzen, würde das Gewicht von 53,9 auf 30,6 kg sinken – eine Ersparnis von über 40 Prozent.

Mit Polymeren wie Polycarbonat lassen sich aber nicht nur Gewichtsreduzierungen erreichen. Sie bieten gegenüber Glas den großen Vorteil, dass sie als Thermoplaste nahezu beliebig formbar sind. Das bietet einerseits neue Freiheiten und Möglichkeiten sowohl für Designer als auch für Techniker und bringt andererseits auch wirtschaftliche Vorteile. Der hohe Grad an Funktionsintegration bietet die Möglichkeit, die Zahl der bis dato notwendigen Einzelteile zu reduzieren und somit die Prozess- und Produktionskosten zu senken.

Einen bislang nicht erwähnten Aspekt, der jedoch gerade im Automobilbau von großer Bedeutung ist, stellt die Sicherheit dar. Gerade hier spielt Polycarbonat eine seiner größten Stärken aus: Anders als Glas splittert das Material nicht. Polycarbonat ist kaum zu zerstören, weshalb dieser Werkstoff bereits heute in vielen hoch sicherheitsrelevanten Feldern zum Einsatz kommt. Die Sicherheitsbehörden weltweit nutzen schon lange transparente Schutzschilder aus Polycarbonat. Und gerade dort hat dieser Werkstoff bereits Einzug in den Fahrzeugbau gehalten: zahlreiche Einsatzfahrzeuge der Polizei verfügen schon heute - zum effektiven Schutz Ihrer Insassen vor möglichem Glasbruch - über Scheiben aus Polycarbonat.

Verfügbare Anwendungen im Gesamtmarkt bis heute

Neben dem Smart-Dach von Webasto und den bisher vorgestellten Anwendungen, finden sich zahlreiche weitere Polycarbonat-Anwendungen in Serie, von denen viele auch nicht-transparent sind. Mit Blick auf den Automobilbau findet man Polycarbonat beispielsweise in feststehenden hinteren Seitenscheiben, Abdeckungen von Scheinwerfern und Fahrtrichtungsanzeigern, Spoilern, Säulenverkleidungen, Zierleisten sowie diversen Applikationen im Bereich des Armaturenbretts und der Lenksäule.

Innovationshistorie Kunststoffe in der Autoverglasung – Meilensteine der Entwicklung

Als innovativer Zulieferer hat Webasto bereits 2003 begonnen, transparente Polymere als Alternative zur Verschiebung mit Glas zu untersuchen. Konkret wurden die Eigenschaften von Polycarbonat (PC) und Polymethylmethacrylat (PMMA, umgangssprachlich: Plexiglas) verglichen.

Beide Werkstoffe wurden dabei auf Basis von vier Entscheidungsebenen untersucht:

1. Design (Formbarkeit)
2. Funktionsintegration
3. Sicherheit und
4. Qualität

Nach umfassenden und gründlichen Untersuchungen fiel bei Webasto damals die Entscheidung, sich ganz auf Polycarbonat zu konzentrieren. Zeigten beide Werkstoffe in Bezug auf Design (Formbarkeit) und Funktionsintegration kaum bzw. nur geringfügige Unterschiede, so zeigten sich deutliche Vorteile des Polycarbonats in Bezug auf Sicherheit (Schlagzähigkeit, Bruchsicherheit, thermische Beständigkeit) und Qualität.

Technische Grundlage Polycarbonat

Bei Polycarbonaten handelt es sich um amorphe, thermoplastische Kunststoffe. Polycarbonate sind eine noch relativ junge Werkstoffgruppe. Entwickelt wurde das erste zu Bekanntheit gelangte Polycarbonat unter dem Namen Makrolon® in den 1950er Jahren von Bayer. Polycarbonate sind glasklar, schlagzäh und bruchsicher. Ihre Bruchdehnung liegt bei 120 Prozent; der Vergleichswert für Einscheiben-Sicherheitsglas ist kleiner als 5 Prozent.

Ihre Lichtdurchlässigkeit liegt mit über 90 Prozent fast genauso hoch wie bei Glas. Ihre Dichte ist mit 1,2 g/cm³ nur etwa halb so hoch wie die der in Fahrzeugen in der Regel verwendeten Gläser (etwa 2,5 g/cm³). Webasto setzt das speziell für die Automobilverschiebung und Dachmodule entwickelte Makrolon® AG2677 von Covestro (ehemals Bayer MaterialScience) ein.

Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Polycarbonat liegt mit $0,65 \times 10^{-4}/K$ (Temperaturbereich von 23° C bis 55° C) deutlich höher als jener von Einscheiben-Sicherheitsglas ($0,09 \times 10^{-4}/K$ im Temperaturbereich von 20° C bis 300° C).

Schichtaufbau

Transparente Polycarbonatscheiben haben beispielsweise im aktuellen Smart-Dach eine Dicke von 5,25 mm und werden mit einer schwarzen Komponente aus Polycarbonat/Acrylnitril-Butadien-Styrol Blend (PC/ABS) hinterspritzt. Diese sind beidseitig jeweils mit Primer und Lack (Hard Coat) beschichtet. Die Primerschicht dient als UV-Schutz und hat eine Dicke von 1,2 bis 4,0 µm (zulässiger Toleranzbereich in der Fertigung). Die Lackschicht ist 4,0 bis 12,0 µm dick.

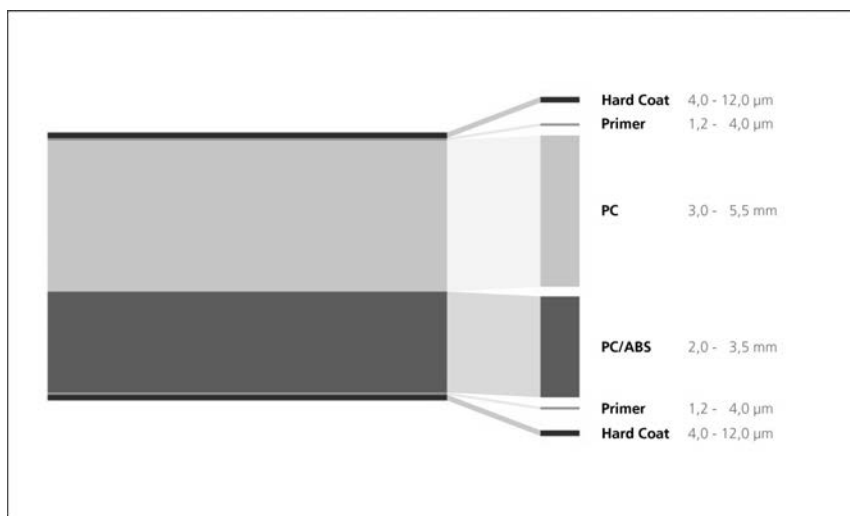


Bild 2: Schichtaufbau einer Polycarbonatscheibe

Herstellverfahren

In Kombination mit dem Makrolon® AG2677 setzt Webasto die aktuelle Generation eines Lacksystems von Momentive ein. Es besteht aus einem Primer (SHP 470 FT 2050) und der eigentlichen Schutzschicht (AS 4700F). So erhält das Polymer eine glasartige Oberflächenstruktur, die kratzfeste Class-A-Oberflächen garantiert. Dies stellt eine hohe und langlebige Qualität nach Automotive-Standards sicher.

Damit der Lack seine Schutzfunktion erfüllt und zusammen mit dem Polycarbonat einwandfreie Transparenz und Oberflächenqualität bietet, steuert Webasto in der Produktion eine Vielzahl von Parametern mit höchster Präzision. Denn die Schichten von Primer und Hard Coat besitzen gemeinsam eine Dicke, die etwa einem Viertel bis Achtel des Durchmessers eines menschlichen Haares entspricht.

Eine besondere Herausforderung besteht darin, dass ein solches Lacksystem keine Nacharbeit erlaubt. Die exakte Dicke und die Gleichmäßigkeit der Beschichtung müssen daher zu 100 Prozent durch die Prozessentwicklung und -steuerung sichergestellt werden. Und dies auf Flächen von bis zu 1,3 m², etwa beim Smart-Dach.

Ein Produktionsverfahren, das diese Anforderungen erfüllt, entwickelte Webasto ab 2004 im neuen Werk Schierling bei Regensburg. 2007 begann die Serienfertigung mit dem ersten, transparenten Smart-Dach. Aktuell wird in Schierling die zweite transparente Dachgeneration für den Smart gefertigt. Bislang wurden annähernd 630.000 Dächer für den Smart ausgeliefert. Mit den kontinuierlich verbesserten Prozessen, die in Reinräumen ablaufen, entstehen in Schierling neben transparenten Polycarbonat-Dächern auch verschiedene Blenden.

Webasto formt großflächige Bauteile in einem besonderen Spritzpräge-Verfahren, einer Spezialform des Spritzgusses. Der Nachteil des klassischen Spritzguss-Verfahrens für derartige Bauteile liegt darin, dass diese von inneren Spannungen durchzogen sind. Diese Spannungen wiederum führen oft zu Verwindungen des Bauteils im nachfolgenden Lackier- und Einbrennprozess. Sichtbare Folge wären inakzeptable Risse im Lack. Das Spritzprägen von Webasto hingegen liefert weitgehend spannungsfreie Bauteile, weil das Material in ein 2 bis 5 mm geöffnetes Werkzeug gespritzt wird und entsprechend geringere Spritzdrücke erforderlich sind. Das Werkzeug schließt erst, wenn sich die gesamte Schmelze im Werkzeug befindet.

Wird ein Dachsystem wie das für den Smart gefertigt, so entsteht im ersten Schritt das reine Glazing-Element. Anschließend werden auf der Unterseite beispielsweise Befestigungselemente, Abstandshalter, Führungsschienen, Sichtblenden und Positionierungspins angespritzt. Danach erhält das Bauteil 24 Stunden Zeit, um nach der schnellen Abkühlung auf Raumtemperatur zu relaxieren. Dabei werden die Restspannungen abgebaut, die nach den Temperaturschwankungen und der damit verbundenen thermischen Schrumpfung des Materials noch vorhanden sind.

Reinraumbedingungen sind unabdingbar erforderlich, da jede Verunreinigung im Lackierprozesse mit mehr als 5,0 µm Größe das Dach zu Ausschuss werden lassen würde. Partikel, die sich nach dem Spritzprägen noch auf den Bauteilen befinden, werden letztlich entfernt bevor die Beschichtung beginnt.

Die Lackierung stellt den sensibelsten Teil des gesamten Prozesses dar. Sowohl Primer als auch Hard Coat müssen in allen Bereichen des Bauteils exakt mit der richtigen Schichtdicke aufgebracht werden. Beim Primer, der die UV-Beständigkeit des Polycarbonat-Elements sichert, liegt der Toleranzbereich zwischen 1,2 und 4,0 µm. Die zweite Schicht, der Hard Coat, sichert die Kratzfestigkeit und darf nur zwischen 4,0 und 12,0 µm Dicke schwanken.

Webasto führt die Beschichtung mit einem selbst entwickelten und patentierten Verfahren per Fluten durch: Roboter lassen aus Schläuchen den Lack auf die Bauteile fließen. So wird auf genau festgelegten Bahnen zuerst die Unter- und dann die Oberseite geflutet. Die Präzision hängt dabei vom Ablauf- und Trocknungsverhalten des Lackes ab – beides steuert Webasto durch vielfältige Parameter. Schließlich wird der Lack eingebrannt.

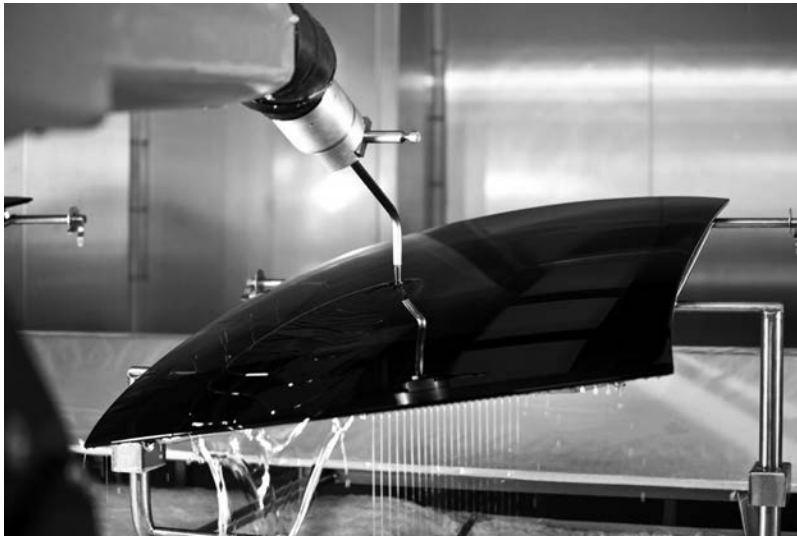


Bild 3: Beschichtung eines Polycarbonat-Elements durch Fluten

Der gleiche Prozess wiederholt sich schließlich mit dem Hard Coat. Insgesamt dauert dieser Beschichtungsprozess knapp 5 Stunden. In der abschließenden Endkontrolle wird nochmals sichergestellt, dass jedes Bauteil die hohen Qualitätsanforderungen von Webasto und seiner Kunden erfüllt. Dazu wird jedes Bauteil sowohl automatisiert vermessen als auch durch einen Mitarbeiter optisch überprüft, da hierfür noch keine prozesssicheren Verfahren existieren.

Polycarbonat-Anwendungen von Webasto im Markt

Basierend auf diesem umfassenden Know-how bietet Webasto seinen Kunden bereits heute im Dachbereich vielfältige Polycarbonat-Lösungen an: so werden für diverse Modelle unterschiedlicher Hersteller beispielsweise U-förmige Blenden hergestellt, die Schiebe- oder Ausstelldächer umgeben und aus nur einem Stück ohne Fugen gefertigt sind. Diese Blenden zeichnen sich durch geringes Gewicht aus und umschließen die Schiebe- und Panoramadächer vorne und an den Seiten. So entsteht ein fugenloser Übergang zum Fahrzeugdach und die gesamte Dachfläche erscheint in hochwertiger Vollglasoptik. Für den VW Beetle entwickelte Webasto erstmals eine sogenannte O-Blende, die das Dach an allen vier Seiten einfasst.



Bild 4: VW Beetle mit O-Blende

Für die dritte Generation des smart fortwo liefert Webasto seine zweite Generation des Panoramadachs aus Polycarbonat. Dieses Dachsystem lässt viel Licht in den Innenraum und schafft so ein angenehmes, großzügiges Raumgefühl für die Fahrzeuginsassen. Optisch ist es eine perfekte Verlängerung der Frontscheibe. Seit dem Start der zweiten Dachgeneration absorbieren alle transparenten Smart-Dächer Sonnenenergie und wirken somit dem Aufheizen des Fahrzeuginnenraums entgegen. Dadurch muss die Klimaanlage seltener eingesetzt werden. Erreicht wird dies durch die in das Polycarbonat integrierten Infrarot-Absorber.

Herausforderungen und Chancen

Auf Basis der Materialeigenschaften von Polycarbonat und der aktuellen Situation ergeben sich eine Vielzahl von Herausforderungen. Gleichzeitig entstehen hierdurch aber auch Chancen. Diese beleuchten wir vor dem Hintergrund von vier maßgeblichen Dimensionen:

Dimension 1: Kunde

Dimension 2: Technik

Dimension 3: Ökonomie

Dimension 4: Gesetz

Herausforderungen und Chancen – Kunde

Der Wunsch des Kunden, nach mehr Tageslicht durch das Dach im Fahrzeuginnenraum, ist ungebrochen. Das Polycarbonat-Schiebedach, das Webasto derzeit entwickelt, wird einen Durchbruch bei diesem Bestreben bringen und mehr Licht in das Fahrzeuginnere lassen. Gleichzeitig wird das Gewicht spürbar reduziert.

Ebenso wird die Anforderung nach mehr Sicherheit durch die hervorragenden Eigenschaften von Polycarbonat-Scheiben erfüllt. Selbst bei einem sich überschlagenden Fahrzeug splintern Polycarbonat-Dächer wie auch Polycarbonat-Seitenscheiben nicht und schützen somit effektiv die Insassen.

Auch für die Formensprache der Designer ermöglicht Polycarbonat neuartige Elemente, die mit einer Glasapplikation nicht möglich sind. So könnten etwa Sicken oder Kanten in die hinteren, feststehenden, Seitenscheiben hinein verlängert werden. Weitere Funktionsintegrationen, wie etwa unsichtbar in Heckscheiben oder Spoiler integrierte Bremsleuchten, werden hierdurch ermöglicht.

Durch die immer weiter verschärften CO₂-Grenzwerte werden Automobilhersteller gezwungen, generell noch mehr Wert auf Leichtbau zu legen. Hinzu kommen spezielle Aspekte:

In den bislang vorgeschriebenen Testzyklen zur Ermittlung von Kraftstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß werden Sonderausstattungen wie etwa schwere Glasdächer nicht berücksichtigt. Sie steigern also nicht den Normverbrauch. Im künftig geltenden WLTP-Verfahren (Worldwide harmonized Light Vehicle Test Procedures) werden dagegen auch Sonderausstattungen einbezogen. Daher steigt auch bei Sonderausstattungen der Druck zur Gewichtseinsparung.

Das Ziel, die Elektromobilität für möglichst viele Autofahrer attraktiv zu machen, gibt dem Leichtbau ebenfalls eine noch größere Bedeutung. Denn die – meist noch sehr geringe – elektrische Reichweite und die Kosten für die Batterien stellen hier die größten Hürden dar. Jedes Kilogramm Gewichtseinsparung erlaubt entweder eine größere Reichweite oder aber Einsparungen bei den Batterien.

Mit dem Einsatz von Polycarbonat über das Dach hinaus in Seiten- und Heckscheiben, erreicht der Automobilbau eine neue Qualität der Gewichtseinsparung. Durch den Einsatz von Polycarbonat in diesem Bereich steigt der Gewichtsvorteil für die gesamte Fahrzeugflotte deutlich.

Herausforderungen und Chancen – Technik

Auch im Bereich der technischen Möglichkeiten bieten sich heute neue Möglichkeiten, insbesondere mit Blick auf eine verbesserte Qualität von Polycarbonat-Bauteilen. Grundsätzlich ist ungeschütztes Polycarbonat wenig kratzfest und zudem empfindlich gegenüber UV-Licht und Witterungseinflüssen. Kratzer in Bauteilen müssen vermieden werden, weil sie unabdingbar die Qualitätsanmutung in der Draufsicht beeinträchtigen. Handelt es sich um Verscheibungen, würde zudem der freie Blick der Insassen gestört werden. Ziel ist es daher, die Polycarbonat-Elemente vor Vergilbung und Eintrübung zu schützen.

Alle drei Herausforderungen werden durch die von Webasto eingesetzten Materialien und Prozesse bewältigt. Die Beschichtung mit Primer und Hard Coat schützt das Polycarbonat zuverlässig und garantiert eine dauerhaft hohe Qualitätsanmutung, die den hohen Standards der Automobilhersteller und von Webasto ohne Abstriche entspricht.

Weitere Maßnahmen erfordert die starke Wärmeausdehnung. Erwärmt sich ein 1 m langes Polycarbonatdach von 20 auf 90 °C, dehnt es sich in der Länge um 4,6 mm aus. Bei feststehenden Elementen stellt Webasto durch geeignete Verklebungen sowie durch spezielle Geometrien sicher, dass trotz der Wärmeausdehnung höchste Anforderungen an Optik und Funktion erfüllt werden. Zudem arbeitet Webasto mit Covestro daran, durch spezielle Additive schon im Rohmaterial die Wärmeausdehnung zu reduzieren. Für bewegliche Polycarbonatelemente wie Schiebedächer wird die Wärmeausdehnung durch spezielle Kinematiken komplett kompensiert.

Die im Vergleich zu Glas geringe Eigenstabilität des Polycarbonats kann für große, bewegliche Polycarbonat-Elemente zur Herausforderung werden. Der E-Modul des Polymers liegt bei 2.400 MPa. Für Einscheiben-Sicherheitsglas beträgt der Wert 70.000 MPa. Bei der aktuell laufenden Schiebedach-Entwicklung legt Webasto die Anforderungen aber sogar noch höher: Da sich eine Eins-zu-Eins-Substitution von Glas durch Polycarbonat wirtschaftlich nicht lohnen würde, wird das nun entstehende Polycarbonat-Schiebedach auf Blechrahmen und Umschäumung – wie sonst bei Glas üblich – verzichten. Durch spezielle Verfahren gelingt es Webasto, sowohl die geringere Eigenstabilität des Polycarbonat als auch den Wegfall dieser Versteifungen (Blechrahmen und Umschäumung) ohne Qualitätsverlust auszugleichen.

Herausforderungen und Chancen – Ökonomie

Der bereits beschriebene Herstellungsprozess verdeutlicht den hohen Aufwand, den die Fertigung von Polycarbonat-Bauteilen erfordert. Dazu zählen auch sehr hohe Kosten für die extrem komplexen und großen Werkzeuge. Bezogen auf das einzelne Bauteil wäre Polycarbonat daher bei den Kosten nicht konkurrenzfähig zu Glas.

Erweitert man jedoch das Blickfeld und bezieht in die Kostenrechnung weitere relevante Faktoren ein, ändert sich das Bild deutlich. Fügt man der Rechnung bspw. den Aspekt „Gewichtsreduzierung“ hinzu und berücksichtigt, dass ein Bauteil aus Polycarbonat über 40 Prozent leichter ist als ein vergleichbares Bauteil aus Glas, wiegt dies einen deutlichen Teil der Mehrkosten auf. Als grobe Richtgröße gilt in der Automobilindustrie: ein Kilogramm Gewichtseinsparung entspricht 5 Euro Mehrkosten.

Durch zunehmend schärfere CO₂-Grenzwerte gewinnt die Gewichtseinsparung weiter an Bedeutung. Der Leichtbau ist in Dächern und Scheiben sogar noch kostbarer als bei anderen Elementen, weil die Gewichtseinsparung relativ weit oben im Fahrzeug erfolgt und dadurch der Schwerpunkt spürbar abgesenkt wird.

Zudem ermöglichen Konstruktionen aus Polycarbonat, wie bereits erwähnt, eine umfangreiche Funktionsintegration, wodurch Kosten an anderer Stelle reduziert werden. Sind es bislang etwa oft Befestigungselemente, die beim Spritzprägen direkt in Bauteile integriert werden, so bieten sich künftig Lösungen an, die deutlich weiter gehen. Dazu zählt beispielsweise die Integration einer dritten Bremsleuchte in eine Heckscheibe oder eines Spoilers aus Polycarbonat. So können Polycarbonat-Systeme bei den Kosten noch wettbewerbsfähiger gegenüber Glas werden.

Eine weitere Reduktion der Prozesskosten durch weitere Vereinfachungen ist durchaus möglich. So versprechen neue Lacksysteme einen großen Fortschritt. Die Härtung könnte „kalt“ erfolgen und somit deutlich effizienter. Eine weitere Vereinfachung ist von Ein-Komponenten-Lacken zu erwarten, die ohne separaten Primer auskommen. Der inzwischen bei Webasto und seinen Partnern angesammelte Erfahrungsschatz lässt auch kostensenkende Optimierungen im Werkzeugbereich zu.

Herausforderungen und Chancen – Gesetz

Auch im Bereich der vierten Dimension, den gesetzlichen Rahmenbedingungen, sind Veränderungen auf dem Weg.

Momentan beschränken die Normen UN ECE R43 (Europa) und ANSI Z26.1 – 1996 (USA) sowie die in der Regel deutlich strengeren Anforderungen der Automobilhersteller den Einsatz von Polycarbonat in der Fahrzeugverschiebung auf einzelne Bereiche. In Dächern sind Kunststoffscheiben beispielsweise generell erlaubt. Bei den hinteren Seiten- und Heckscheiben gehen die Vorgaben jedoch auseinander. Zwar sind in diesem Bereich des Fahrzeugs je nach Region/Land ebenfalls Kunststoffscheiben generell zugelassen. In ausgewählten Gebieten jedoch, wird die Zulassung erst nach einer individueller Prüfung erteilt.

Die schärfsten Vorgaben gelten für Front- und vordere Seitenscheiben. Da diese für die Sicht des Fahrers am wichtigsten sind, müssen sie die höchsten Anforderungen erfüllen. Windschutzscheiben sowie vordere Seitenscheiben aus Kunststoffen ließen beide Normen bislang grundsätzlich nicht zu. Doch in diesem Punkt hat sich die ECE R43 im Herbst 2015 geändert: Seit Oktober sind Kunststoffe als Material für Windschutzscheiben erlaubt, wenn bestimmte Tests bestanden werden. Vermutlich ab Mitte 2016 wird die europäische Norm auch vordere Seitenscheiben aus Kunststoff erlauben.

Mit der im Herbst erfolgten ECE-Änderung in Bezug auf Windschutzscheiben wurden auch neue Prüfverfahren eingeführt und damit eine wesentliche Schwäche der bisherigen Systematik beseitigt. Sowohl die europäische als auch die US-amerikanische Norm forderten bislang den sogenannten Taber-Abraser-Test, der in den 1970er Jahren zur Bewertung von Glas-scheiben entwickelt worden ist. Dabei rotiert die Materialprobe, während von oben Reibräder mit definierter Kraft auf die Probe drücken. Maßstab für die Güte des Materials ist die Trübung (Haze) nach einer definierten Zahl von Umdrehungen.

Bei für die Fahrersicht relevanten Scheiben – Frontscheibe und vordere Seitenscheiben – muss die Trübung nach 1.000 Zyklen unter 2 Prozent bleiben. Bei anderen Scheiben sind Werte unter 10 Prozent nach 500 Zyklen zulässig – was sich mit aktuellen Scheiben aus Polycarbonat bereits erfüllen lässt.

Allerdings spiegeln die aktuellen Testverfahren die realen Belastungen, denen Pkw-Scheiben ausgesetzt sind, nur unzureichend wider. Darüber hinaus sind die Ergebnisse, die mit Polycarbonat-Scheiben erzielt werden, in diesen Tests nicht ausreichend reproduzierbar.

Angestoßen durch die Informal Group of Polymer Glazing finden sich daher nun in der veränderten UN ECE R43 neue Testverfahren für Windschutzscheiben. Der Taber-Abraser-Test ist zwar weiterhin Bestandteil der Norm. Doch dürfen nun alternativ drei andere Prüfungen angewandt werden: Nach dem Sandrieseltest muss die Trübung unter 5 Prozent liegen, nach dem

Waschanlagentest (Amtec Kistler Test) sowie dem Wischertest muss sie kleiner als 2 Prozent bleiben. Allerdings können nur diese drei Tests gemeinsam die bisherige Prüfung ersetzen. Für die vorderen Seitenscheiben sollen die ECE-Regelungen Mitte 2016 analog geändert werden.

Diese neuen Verfahren liefern erstmals belastbare Aussagen dazu, wie sich die Scheiben im realen Betrieb tatsächlich verhalten. Speziell bei den Lackherstellern könnte die neue Situation auch für einen Schub bei der Suche nach weiteren Verbesserungen sorgen. Denn da die großen Windschutzscheiben nun grundsätzlich aus Polycarbonat hergestellt werden dürfen, ergibt sich für die Lackhersteller ein großes wirtschaftliches Potenzial. Bei Tests, die Webasto durchführte, bestanden mit AS 4700F beschichtete Musterplatten aus Polycarbonat die drei neuen Prüfungen. Dennoch wird von den Automobilherstellern eine weitere Verbesserung gefordert werden. Für derartige Anforderungen entwickelt Webasto mit seinen Partnern die Polycarbonat-Systeme kontinuierlich weiter.

Webasto Polycarbonat 360

Für Webasto bieten die dargestellten Entwicklungen großes Potenzial. Einerseits geben die oben genannten Trends den Vorteilen von Polycarbonat-Scheiben nun einen viel höheren Stellenwert als bislang. In gewisser Weise bot Polycarbonat bisher Lösungen für Probleme, die noch nicht akut waren. Das ändert sich. Der Bedarf, die Vorteile des Materials zu nutzen, wird weiter zunehmen.

Zum anderen kann Webasto dann die passenden Produkte für diese Anforderungen liefern. Nach weit mehr als einem Jahrzehnt Entwicklung und langjährigen Produktionserfahrungen beherrscht das Unternehmen Materialien sowie Prozesse und arbeitet daran, beides mit seinen Partnern kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Die aktuelle Roadmap von Webasto im Bereich von Polycarbonat weist derzeit folgende Entwicklungsschritte aus:

- 1.) offenbare Dächer
- 2.) feststehende Seitenscheiben (hinten)
- 3.) Heckscheiben mit integrierten Funktionen wie Heckleuchten, Scheibenheizungen
- 4.) bewegliche Seitenscheiben (hinten und vorne)
- 5.) Windschutzscheibe



Bild 5: Webasto PC 360 – Polycarbonatanwendungen rund um das Auto

Diesen Ansatz hat Webasto unter der Bezeichnung „Webasto Polycarbonat 360“ zusammengeführt. Webasto ist offen, die Entwicklung gemeinsam mit einem OEM als Technologiepartner weiter zu forcieren; man ist bereit, sämtliche Glasflächen durch Polycarbonat zu ersetzen.

Carbon Core – Composite Einsatz in der Karosseriestruktur des BMW 7er

Dipl.-Ing. (FH) **M. Derks**, BMW AG München

Kurzfassung

Der Beitrag beschreibt das CFK-Mischbaukonzept Carbon Core in der Karosserie des neuen BMW 7er im Kontext aller Leichtbaumfänge des Fahrzeuges. Aufgezeigt werden die hierzu erarbeiteten Bauweisen und Fertigungskonzepte für Composite-Strukturbauteile in der Großserie. Durch intensive Prozesskettenzusammenarbeit der Konstruktions-, Werkstoff-, und Technologiebereiche sowie des Lieferantennetzwerkes konnten die vorgestellten Werkstoffkonzepte in den konventionellen Karosseriebau integriert werden.

1. Die Ableitung des Leichtbaukonzeptes für den BMW 7er aus den Erwartungshaltungen unserer Kunden.

Elegante Formensprache mit exklusiven Materialien, hoher Fahrkomfort und ansprechendes Ambiente im Innenraum stehen schon immer im Fokus der Kundengunst in der automobilen Luxusklasse. Innovationen wie Fahrassistenzsysteme, Infotainment und neue Bedienelemente werden in Zukunft immer wichtigere Auswahlkriterien für die Kaufentscheidung werden. Durch ein agiles und gleichzeitig komfortables Gesamtfahrzeugkonzept mit niedrigem Schwerpunkt und guter Achslastverteilung nimmt der Käufer die Attribute Fahrkomfort, Dynamik und Effizienz wahr. Die vollumfängliche Erfüllung aller Gesetzes- und Sicherheitsanforderungen in den unterschiedlichen Märkten hierbei ist natürlich selbstverständlich in der BMW AG.

Trotz vieler neuer Innovationen, gesteigertem Komfortangebot und der Erfüllung zusätzlicher Gesetzesanforderungen hat der neue BMW 7er einen niedrigeren Schwerpunkt als der Vorgänger, eine Achslastverteilung von genau 50:50 und mit 4,5 l Verbrauch (730d Limousine) ist er aktuell der „CO₂-Champion“ in seiner Klasse. Ein wesentlicher Beitragsleister hierzu ist, dass das Gewicht durch ein fahrzeugübergreifendes Leichtbaupaket deutlich zum Vorgänger reduziert werden konnte.

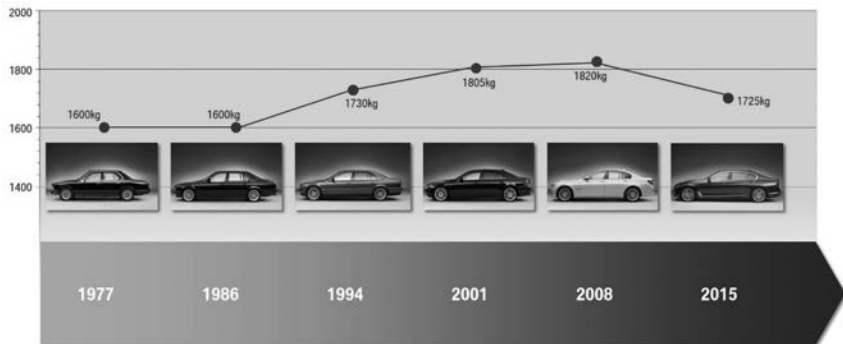


Bild 1: Gewichtseinsparung zum Vorgänger beim aktuellen BMW 740i [2]

Ein zentrales Element ist die als Carbon Core bezeichnete Karosseriestruktur. Das intelligente Karosseriekonzept erreicht durch den Mischbauansatz von CFK, höchstfesten Stählen und Aluminium eine Steigerung von Festigkeit und Steifigkeit in der Fahrgastzelle bei gleichzeitig deutlich reduziertem Fahrzeuggewicht.

Das Leichtbaukonzept umfasst zudem einen gezielten Einsatz von Aluminium im Karosserie- und Fahrwerksbereich sowie eine konsequente Detailoptimierung. Neben den Türen besteht erstmals auch die Gepäckraumklappe aus Aluminium. Durch konsequente Leichtbauoptimierung an Radaufhängung, Bremsen und Rädern konnten die für die Fahrwerksauslegung maßgeblichen ungefederten Massen um bis zu 15 Prozent im Vergleich zu den Vorgängermodellen reduziert und der Federungskomfort auf ein neues Niveau gehoben werden.[2] Hinzu kommen gewichtsoptimierte Verbindungstechnologien sowie eine quellennahe Wärme- und Akustikabschirmung für den Motor, durch die der Gesamtumfang und damit das Gewicht der erforderlichen Dämmmaterialien reduziert werden kann – gleichzeitig sorgt das innovative Dämmkonzept für einen nochmals verbessertes Akustikkomfort.

NEW BMW 7 SERIES – CARBON CORE. WEIGHT REDUCTION BY UP TO 130 KG.

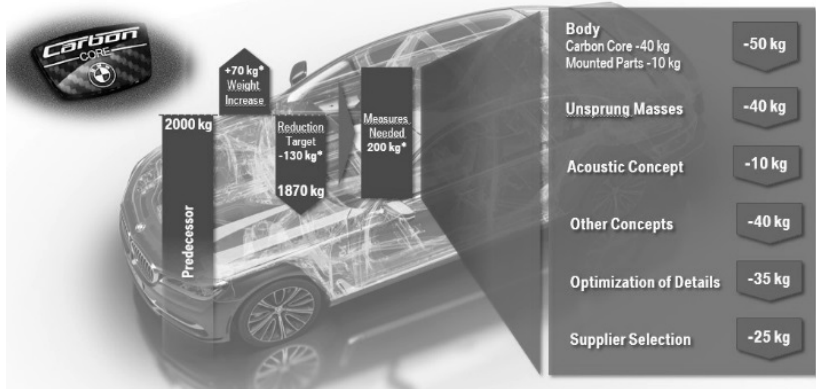


Bild 2: Aufschlüsselung der Leichtbaumaßnahmen beim aktuellen BMW 750Li xdrive [2]

2. Das Mischbaukonzept in der Karosserie des BMW 7er

Erstmalig setzt BMW im konventionellen Karosseriebau die Werkstoffe Stahl, Aluminium und CFK in Kombination für eine Großserie ein. Zur Verfeinerung des Werkstoffkonzeptes wurden vier verschiedene CFK- und drei Aluminium-Technologien eingesetzt. Das Gesamtgewicht der Karosserie beträgt hierdurch nur 331 kg, da durch die angeführten Maßnahmen eine Gewichtsreduzierung von 40 kg erzielt werden konnte.[2] Insgesamt werden 11 Aluminiumbauteile und 16 CFK Bauteile je Karosserie verwendet. Die Verwendung von Sekundäraluminium und die Herstellung der Karbonfaser mit 100 % erneuerbaren Energien schlagen sich hierbei deutlich positiv in der Nachhaltigkeitsbilanzierung nieder.



Bild 3: Carbon Core Karosserie

Die Werkstoffintegration aus prozessualer Sicht stellt, neben der klassischen funktionalen Auslegung der Karosserie für Faserverbundwerkstoffe, eine wesentliche Herausforderung bei der Serienentwicklung eines solchen Mischverbundes dar.



Bild 4: Prozesskette für wärmhärtende Klebstoffe im Carbon Core Produktionskonzept [4]

Adäquate Verbindungstechniken, die die unterschiedlichen Längenausdehnungen der Werkstoffe im Durchlauf der Lackierereiföhen kompensieren können, sind ebenso wichtig wie das passende Korrosionsschutzkonzept. Der CFK-Einsatz bietet sich deshalb vorrangig in Tro-

kenzonen der Karosserie an, wobei die galvanische Trennung der Werkstoffe prinzipiell ausschließlich von den verwendeten Strukturklebstoffen gewährleistet wird. Während bei der Aluminium \ Stahl Verbindung ein fest fixiertes Nietkonzept verwendet wird, setzt man beim CFK \ Metallverbund ein schwimmendes Nietkonzept ein. Hintergrund hierfür ist, dass die Verbundfestigkeit im Aushärteprozess beim Durchlauf im KTL-Ofen aufgrund unterschiedlicher Längenausdehnungen der Werkstoffe über die Verbindungselemente sichergestellt werden muss. Der Nietverbund stellt im Wesentlichen die Handlingsfestigkeit der Verbindung sicher, bis die Karosserie durch alle Reinigungsbäder gelaufen und im KTL-Prozess ausgehärtet worden ist.

3. Carbon Core – CFK-Werkstoffe, Herstellprozesse und Anwendungen

Für den automobilen Leichtbau optimiert die BMW AG seit zwei Jahrzehnten ihre Prozesse und Bauweisen um den Einsatz von Composites möglichst effizient zu gestalten. Bild 5 zeigt hierzu die wesentlichen Grundgeometrien, die alle ihren Einsatz im Karosseriekonzept des 7ers finden. Jede Bauweise hat hierbei ihre Berechtigung im Sinne einer gesamthaften Zielerfüllung in der geometrischen, funktionalen sowie kosten- und effizienzgerechten Umsetzung der Gesamtfahrzeugziele.

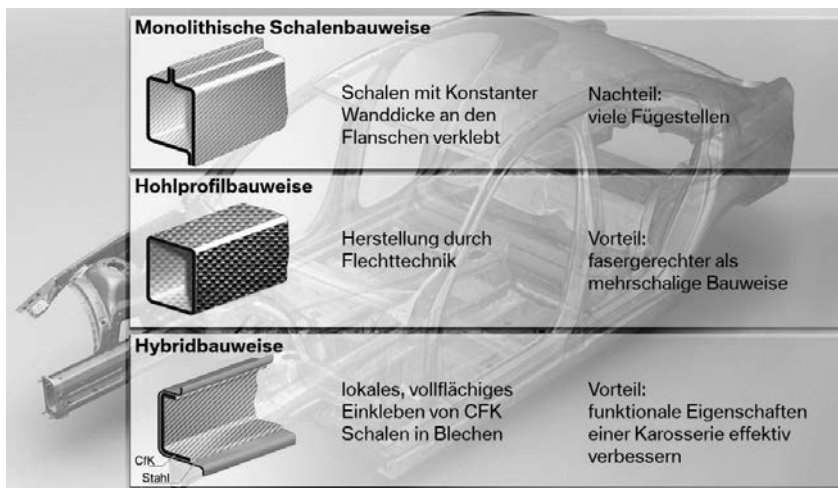


Bild 5: Grundbauweisen für Composites im Automobilbau [3]

Die 16 Bauteile werden hierzu mit vier verschiedenen Technologien hergestellt. Die im folgendem vorgestellt werden. Bild 6 zeigt im Detail welche Bauteile mit welcher Bauweise\Technologie eingesetzt werden:

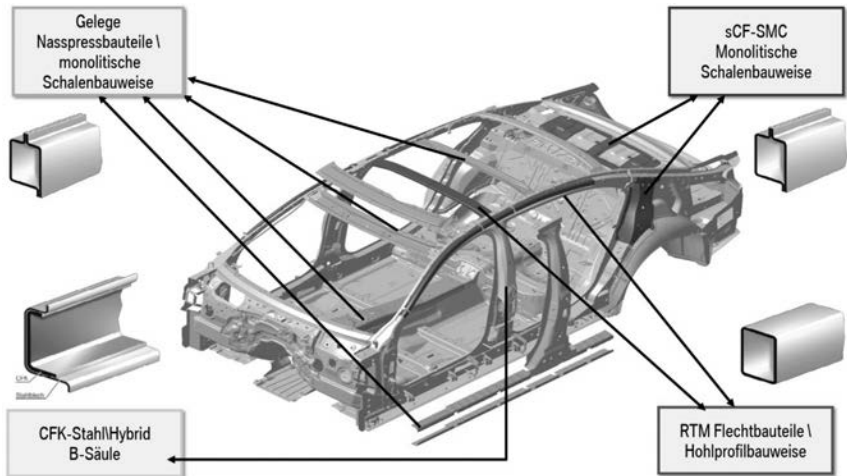


Bild 6: Technologien, Werkstoffe und Bauweisen

Im Karosseriebau werden viele flächige und monolithische Bauteile eingesetzt. Schon für die BMW i Fahrzeuge wurde hierfür das Nasspressverfahren entwickelt. Für den neuen 7er wurde hierzu im Werk Dingolfing eine neue Fertigung mit fünf Pressen auf ca. 19.000 m² aufgebaut, für die die Werkstoffsysteme bezüglich beschleunigter Taktzeit und anschließendem Fräsprozess für das Produktionskonzept des 7ers optimiert wurde. Bild 7 zeigt hierzu einen Überblick dieser neuen Fertigung ausgehend vom Handlingskonzept der Textilien bis zum Beschnitt der Bauteile.

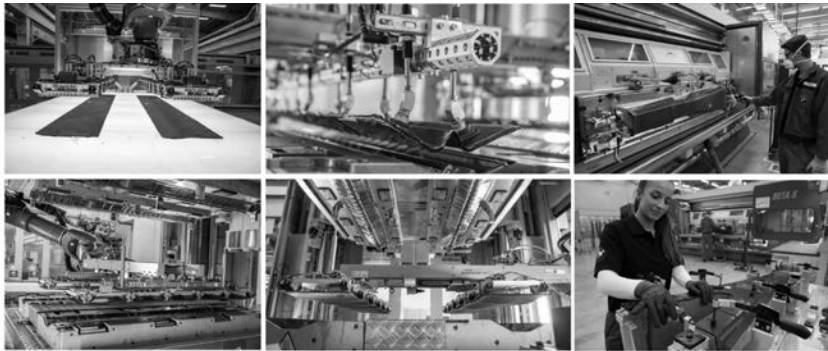


Bild 7: Fertigung der Nasspressteile im Werk Dingolfing [1]

Durch die optimierten Prozesse konnte auch die Materialeinsatzquote für CFK wesentlich verbessert werden. Parallel hierzu wurden die Recyclingkonzepte aus den BMW i Projekten kontinuierlich weiterentwickelt, um den Einsatz der textilen Verschnitte in Strukturbauteilen zu ermöglichen. Die Werkstoffentwicklung und das Industrialisierungsteam fokussierten hierfür das SMC-Pressverfahren, das adäquate Stückzahlen für die Großserienfertigung ermöglicht. Bild 8 zeigt hierzu den Prozessablauf: Die anfallenden Wertstoffe aus den textilen Prozessen werden hierbei so aufbereitet, dass die Fasern ideal aufgeschlossen werden, um in den nachfolgenden Schritten eine ideale Durchtränkung und Ausrichtung als Halbzeug für den Pressprozess zu generieren.

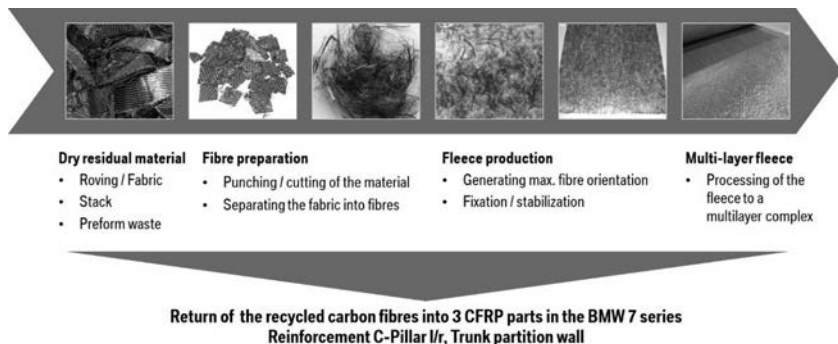


Bild 8: Recycling-Konzept CF-SMC für Strukturbauteile [1]

Durch die Hohlprofilbauweise der Verstärkung des Dachrahmens und des Spiegels B-Säule wird in der Karosserie hohe Steifigkeit und Festigkeit bei minimalem Gewicht erzielt. Die Herausforderung in der fertigungstechnischen Machbarkeit war, die sehr langen Geometrien und Fließwege mit variablen Querschnitten im RTM-Prozess darzustellen. Für die Herstellung von 500 Bauteilen pro Tag wurde die Industrialisierung des Flecht- und Injektionsprozesses u.a. durch den Einsatz von thermoplastischen Kernen wesentlich beschleunigt und zusätzlich ein Prozess entwickelt, bei dem die Kerne aus dem RTM-Teil gezogen und anschließend recycelt werden. Bild 9 zeigt hierzu das Bauteil im Verbund des Dachrahmens.



Bild 9: RTM-Flechtbauteil Verstärkung Dachrahmen

Der Verbund Stahl\CFK als Hybridwerkstoff leistet in der B-Säule einen wesentlichen Beitrag zur passiven Sicherheit und zum Leichtbau. Die Außenseite der B-Säule wird im Automobilbau oft aus warmumgeformten Stahl hergestellt. Hierzu wird ein Blech, das aus mehreren Platinen, Stahlgüten und Dicken besteht, so warmumgeformt, dass ein Bauteil mit Wanddicken von 1,3 - 2,2 mm entsteht. Durch das Hinterpressen mit einem speziell für die Fertigungsprozesse optimierten CFK-Prepreg werden die Stahlwandungen partiell mit CFK aufgedickt und damit gezielt optimiert. Durch diese effektive Verstärkung des Bauteils konnte über beide Seiten der Karosserie 2,8 kg eingespart werden, da die Stahlwanddicken deutlich reduziert wurden.



Bild 10: Stahl/CFK Hybrid B-Säule

2. Zusammenfassung und Ausblick

Der erstmalige Einsatz von CFK als Leichtbauwerkstoff im konventionellen Karosseriebau im Kontext eines Großserienprojektes ist ein Meilenstein in der Karosserieentwicklung.

Es wurden hierzu die Synergien aus den karbonintensiven Bauweisen der i-Fahrzeuge genutzt um diese Leichtbautechnologien für den CFK-Einsatz im Werkeverbund der BMW AG deutlich flexibler und effizienter zu gestalten. Im Kontext des vorgestellten neuartigen Mischbaukonzeptes ergeben sich vielfältige Chancen für unsere externen Partner in der Material- und Technologieentwicklung. Es bestehen für die Zukunft z.B. Bedarfe für Simulation und Auslegung von verbesserten Verbindungskonzepten für Composite-Werkstoffsysteme im konventionellen Karosseriebau. Großserientaugliche Werkzeugkonzepte und Herstellprozesse erfordern kosten-, taktzeit- und funktionsoptimierte Harzsysteme sowie schnellere textile Herstellprozesse. Im Bereich des CFK-Recyclings wurden ebenfalls große Fortschritte erzielt. Diese erlauben es Sekundärwerkstoffe in vielerlei Anwendungen und Prozessen im Automobilbereich einzusetzen. In Kooperation mit dem externen Partnernetzwerk aus Forschung, Prozess- und Materialentwicklung bestehen beste Aussichten für zukünftige Anwendungen in Karosseriestrukturen.

- [1] M. Ahlers, Klaus Sammer, New BMW 7 series – Carbon Core, EuroCarBody Oktober 2015 Bad Nauheim
- [2] F. Schek, Wie Leichtbau die Herausforderung in der Luxusklasse meistert – Am Beispiel des neuen BMW 7ers, ATZ-Tagung Leichtbau, Oktober 2015 Stuttgart
- [3] M. Derks, F. Birzle, H. Pfitzer, CFK bei der BMW AG – Heute\Zukunft, VDI-K Tagung Mannheim, März 2007.
- [4] J. Sczepanski, BMW 7 Series – Carbon Core. Challenge to the Paint Shop, Bad Nauheim November 2015

Injection-Molded Carbon-Fiber Grille Opening Reinforcement

Development and production of the 2016 Ford Mustang Shelby GT350 GOR

Dr. **J. J. Laux**, Magna Management, Cham, Switzerland;

L. Vanin, Plastcoat, a Division of Magna Exteriors Corp.,
Brampton, ON, Canada;

S. Grgac, Magna Exteriors, Concord, ON, Canada;

G. Schalte, Magna Exteriors, Troy, MI, USA

Abstract

First to market, this injection-molded carbon-fiber composite grille opening reinforcement (GOR) for the 2016 Ford Shelby GT350 Mustang utilizes Magna's patented resistive implant welding (RIW) technology. The 20% carbon-fiber PA 6.6 resin offers a weight reduction of 25-30% over current glass-fiber-composite metal hybrid bolsters. The advanced joining technologies utilize electrical currents in the joint line. This unique bonding technology allows for a closed box section to increase the stiffness and structure of the product.

1. Introduction

One of the most iconic performance Mustang nameplates of all time is returning, Ford confirmed recently with the unveiling of the all-new Shelby GT350 Mustang. The Shelby GT350 Mustang is the latest in an all-new line of Mustang fastback and convertible models, including the specially designed 50th Anniversary Edition Mustang. More than 9.2 million Mustangs have been sold since the car's 1964 debut [1].

The original Shelby GT350 introduced in 1965 established Mustang's performance credentials. The all-new 2016 Shelby GT350 Mustang, in which Ford shed weight by using a lot of carbon fiber, is a world-class performance vehicle, designed to tackle the planet's most challenging roads – an all-day track car that's also street legal [2].

The new GT350 builds on Carroll Shelby's original idea – transforming a great everyday car into a dominant road racer – by taking advantage of a dramatically improved sixth-generation Mustang to create a truly special driving experience. Driving enthusiasts behind the wheel of a Shelby GT350 can expect to be treated to the most balanced, nimble and exhilarating production Mustang yet.

Ford engineers took an innovative approach with the GT350. Rather than develop individual systems to perform well independently, every component and shape is optimized to work in concert; balance is the key. While paying rigorous attention to detail, the team pushed the envelope with cutting-edge materials and technologies.

“When we started working on this car, we wanted to build the best possible Mustang for the places we most love to drive – challenging back roads with a variety of corners and elevation changes – and the track at weekends,” said Raj Nair, Ford group vice president, Global Product Development. “Every change we made to this car was driven by the functional requirements of a powerful, responsive powerplant – nimble, precise handling and massive stopping power [1].”

2. Balanced dynamics

The new Mustang platform is the strongest in the history of the brand, with torsional stiffness increased 28% over the previous model. That stiff structure ensures the suspension geometry remains consistent, even under hard driving on back roads and tracks. Front stiffness is further improved on the GT350 with a cutting-edge injection-molded carbon-fiber composite grille opening and optional lightweight tower-to-tower brace. The front track has been increased while spring rates and bushings have been recalibrated all around, with ride height reduced compared to Mustang GT [1].

3. Obsession with detail

“Everything we changed on the GT350 is purely functional-driven design, with the goal of improving the overall performance of the car,” said Chris Svensson, Ford design director, The Americas. “We optimized the aero shape of the car, and then fine-tuned what was left to increase downforce and cooling airflow.” All bodywork from the windshield forward is unique to this high-performance model and up to 50 mm lower than the Mustang GT [1].

“We took the best Ford Mustang yet and massaged every aspect of the car that affects the performance driving experience,” said Jamal Haredi, chief engineer, Ford Global Performance Vehicles. “We tested endlessly on the most challenging roads and tracks in the world, and we believe serious drivers will love the Shelby GT350 Mustang.” [1].

4. Description of the component

Grille opening reinforcements are used to structurally tie the upper rails (shotguns) to the lower frame rails, provide the general shape of the front end, absorb energy during a frontal impact, provide a rigid mount for crash sensor, and facilitate attachment schemes for

components such as headlights, hood latch, and front fascia assembly. The GOR increases the overall body stiffness at the front of the vehicle and can be easily unbolted to remove the engine if necessary.

5. Drivers for innovation

When Ford chose Magna Exteriors in early 2013 to manufacture a lightweight carbon-fiber GOR for the 2016 Shelby GT350 Mustang (Fig. 1), they clearly specified the basic requirements that had to be met.

These requirements included:

- Significant reduction in weight due to CAFE standards, higher performance and lower total cost of ownership
- Equivalent stiffness, NVH modal targets and dimensional stability
- Deliver impact pulse to sensor
- Need for a package-efficient design to fit reduced space due to 10 mm lowered hood surface that required an all-new design
- Meet under-hood appearance requirements
- Minimize tooling investment.

This is reflected in the use of clearly defined materials and processes to yield a product that is significantly lighter than the previous product, while meeting all quality, performance and safety targets. The use of innovative technologies and lightweight materials had a significant influence on the performance of the vehicle.



Fig. 1: The all-new 2016 Shelby GT350 Mustang

6. Design methodology

Packaging a new, lightweight GOR in a predetermined packaging space, meeting or exceeding the vehicle performance requirements, and maintaining the same mounting locations and features, required an extensive amount of CAE and CAD work using the latest proprietary techniques. After evaluating a number of preliminary design variations, Magna settled on a 'First to Market' two-piece box section, all-plastic GOR design.

Due to fit and function in areas around the shotgun and a 10 mm lowering of the hood to improve aerodynamics, the size of boxed sections was limited in certain areas. This required additional ribbing and higher local thickness in the part. In addition, crash pulse signal management was very important in the development of the new design. The system needs to offer energy transfer to crash sensors in crash events. The stiffness of the structure is able to meet this requirement. Once the crash pulse signal and air bag deployment is understood better, additional weight savings can be achieved.

For the GOR, Magna designed a multi-cavity tool, in which both the upper and lower structures were molded simultaneously. This large-family mold was designed with multiple hot-runner drops to reduce the required clamp tonnage and to improve processing. With this injection-mold tooling design, we were able to capture all design features that were previously in metal. Overall, we were able to realize up to 75% reduction in capital

investment due to the elimination of metal stamping tools and reduced injection-mold complexity in comparison with the previous GOR design. Furthermore, we did not need to rework the tool to achieve the required part dimensions.

7. Manufacturing process

A 20% carbon-fiber-reinforced PA 6.6 resin was chosen as the substrate material to mold the two components of the Shelby GT350 Mustang GOR assembly. This material provides high strength properties at a low material density resulting in lightweight but very strong components. Warpage simulation, coupled with material characterization, was used to predict molded-part warpage. Due to our historically low confidence in warpage simulation, we were driven to build the tool to nominal position. After final processing in the molding operation, the top shotgun mounts exhibited warpage, outboard, of approximately 2 – 3 mm. Final tuning to nominal position, the result of extensive studies on how best to stabilize parts after demolding while still warm, was successful. Warpage study versus actual part exhibited correlation to within 85% accuracy.

To combine the two components into an enclosure assembly, Resistive Implant Welding (RIW) was chosen as the ideal welding process. The welded enclosure forms part of the structure used for stiffness and rigidity necessary to meet hood-latch slam tests. Enclosed geometries are an efficient means of optimizing material usage to minimize part weight and costs.

In designing the part with ability to create closed profiles with the RIW process, Magna Exteriors and BASF used the latest methods of topology optimization to fit the limited and predetermined packaging space based on multiple vehicle load cases. Once the rough CAD shape was determined, Magna Exteriors created a design that was feasible to manufacture. An initial manifold and runner system was designed and a mold-filling simulation was carried out. BASF implemented their proprietary ULTRASIM software to map the fiber orientation of the carbon-fiber composite [3]. This required a large amount of material characterization as an input to generate the map. This map of the fiber orientation through the thickness and over the entire part is used to create a variable material card. The material card is used to complete final simulation to show effects of injection molding on physical part performance.

As already described, the RIW process is a new patented process from Magna which is a key enabler of this success [4] [5]. Destructive testing shows strong cohesive bonding for coupons welded using the RIW process. Conventional methods used to RIW-weld two components together were only partially effective for welding carbon-fiber-filled materials. Issues with stray current leakage across the part were observed during initial weld trials.

Alternative implant materials and processing parameters were developed specifically for carbon-filled resins to ensure a proper weld along the entire part length.

Resistive Implant Welding is a welding process that makes use of placing a consumable wire mesh material between two composite substrates (Fig. 2).

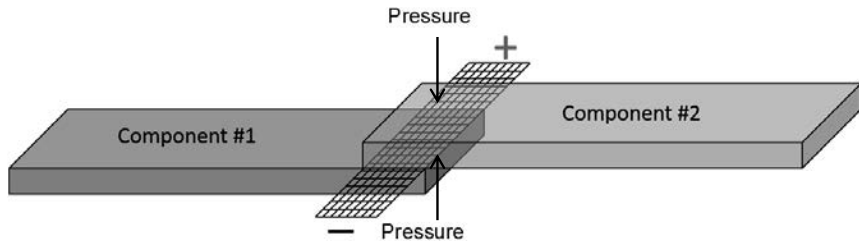


Fig. 2: Resistive Implant Welding (RIW)

A current is applied to opposite ends of the wire mesh while contact pressures are applied above and below the weld joint interface. In a short period of time, the wire mesh heats up due to resistance heating, melting both mating surfaces of components #1 and #2. The pressure applied to the outside surfaces of the joint interface force the molten material of the two components to flow through the wire mesh and mix with molten resin from the opposing surface. After sufficient heat and pressure are applied to ensure resin flow through the mesh, the current is removed from the circuit to allow the molten resin to solidify at the joint interface while still under pressure. The parts are then removed from the welding cell (Fig. 3) following a short cooling cycle. The technological advancements developed for the Resistive Implant Welding are patented [4].



Fig.3: The GT350 GOR Welding Cell

Resistive Implant Welding is a unique process which allows very discrete and controlled heating of mating surfaces. Sufficiently high pressures applied to the joint interface ensure homogenous mixing of both parent materials through the joint interface. Sections through a RIW joint show no joint interface distinction, implying that the joint strength is as strong as parent substrate. A section through an RIW joint is shown in Fig. 4. The three dark circular objects are sections through 0.23 mm diameter wire used in the mesh material at the joint interface. The smaller white lines and dots illustrate the fiber distribution throughout the resin substrate.

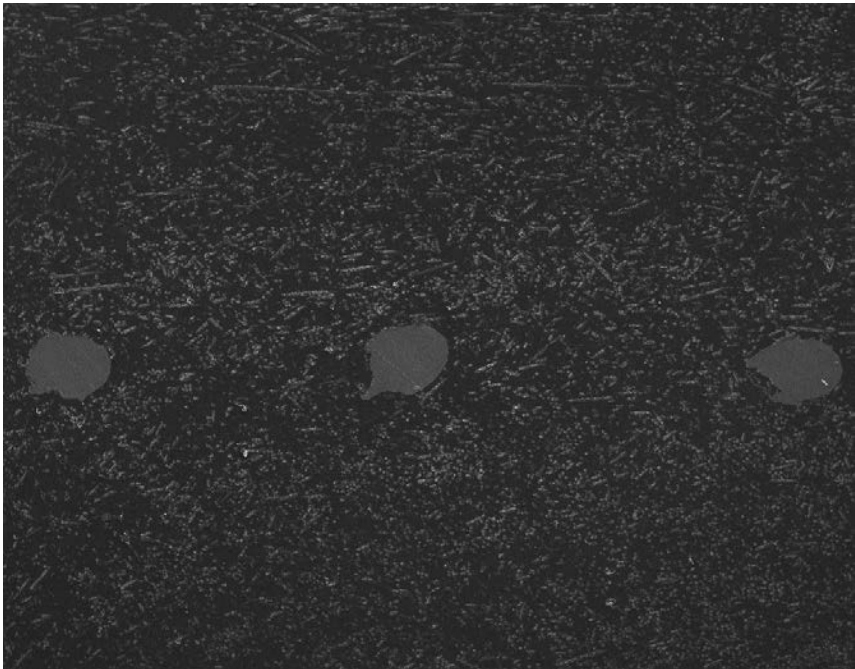


Fig. 4: A section through an RIW joint

Parts such as the GT350 GOR are located relative to one another and held in dimension during the welding process ensuring finished parts are very dimensionally repeatable. Welding fixtures with compliance mechanisms have been developed to accommodate for part warpage ensuring mating surface conform to one another and to nominal dimension. It has been found that enclosed structures welded using RIW are more dimensionally stable and require less adjustment than any other manufacturing process used to generate structure. This includes other common technologies in production today such as Plastic Metal Hybrid.

To speed up the RIW process, an automated mesh dispenser was developed (Fig. 5). The robotic mesh dispenser heat-stakes the wire mesh onto a molded component precisely where the joint interface is designed into the part. This development speeds up the entire welding process so it can be operated in the same cycle time as the injection-molding machine. A complete welding cell situated alongside an injection-molding machine can weld parts as they are removed from the machine. This reduces overhead costs and improves

quality because it does not require an offline manufacturing cell which would need extra part transportation, WIP storage, and additional handling. A patent was granted outlining the technological advancements for automated mesh dispensing [5].

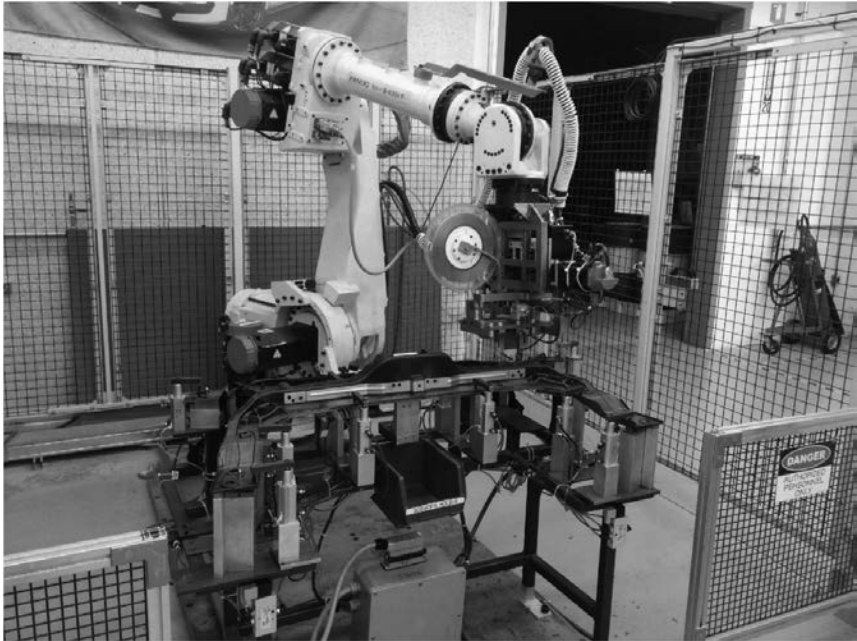


Fig. 5: The Shelby GT350 Mustang GOR Mesh Dispensing Cell

Another key development for the GT350 GOR was establishing methods to accommodate the complex weld geometry. Wire mesh has a maximum bend angle of 45° before the mesh openings become too small to allow molten material to pass through. In order to accommodate the 80° bend angle requirements of the part, a new method of stacking wire mesh at intersection points was developed to allow the desired angle to be incorporated into the part design. This proved to be very effective in the GT350 GOR where a total of 6 different weld circuits were employed to meet complex design requirements (Fig. 6).

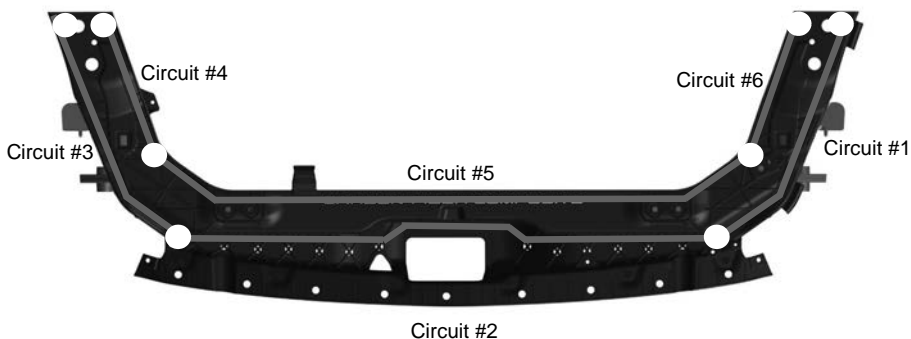


Fig. 6. The 6 different weld circuits required to weld the GT350 GOR.

8. Conclusion

The two-piece box section design and the properties of the carbon-fiber PA 6.6 resin eliminated the need for five steel stampings, while achieving a 24% mass reduction, and improved aesthetics, leading to the elimination of the beauty cover and associated part and assembly costs. The combination of the RIW process and structural application of this resin has not been implemented in a serial production previously. Hence, this is the first component to employ a two-piece design that is joined using the RIW process and this resin. The previous design utilized five different metal stampings with the injection-molding process commonly referred to as Plastic Metal Hybrid. The secondary RIW joining process required additional fixtures to apply pressure to the two parts during the welding process. The RIW implant was modified to accommodate the carbon-fiber reinforcement in the resin. Carbon-fiber material anisotropic data were developed for higher accuracy in the full-vehicle predictive structural simulations. Direct weight savings of 1.2 kg (24%) versus the previous design, and a total of 2 kg system weight reduction with the elimination of the beauty cover, which provides a more technical appearance as an added benefit, was achieved.

This new GOR for the 2016 Shelby Mustang GT350 has an overall system weight of 3.6 kg versus the previous version of 4.8 kg for direct part-to-part baseline system comparison. Elimination of multiple stamping tools and a simpler injection tool reduced tool capital investment cost up to 75%. Additional efficiencies in the part could be achieved, if more package space were available in the initial design. The current part is designed around an existing vehicle architecture. The key enablers for the weight savings are the Magna

patented RIW process [4] [5], Ultramid A3WC4, a 20% carbon-fiber PA 6.6 resin from BASF [6], and a two-piece box section design.

This solution is transferrable to vehicle platforms with a removable front-end structure (such as a GOR or a Front-End Module) which are currently using all-metal, metal overmolded with plastic, or plastic with bolt-on reinforcements. The RIW process grants the ability to economically create closed profiles using the injection-molding process. Other plastic manufacturing process such as extrusion, and blow molding are limited in shape, detail, dimensional stability and overall part size. This coupled with an ultralight carbon-fiber composite material opens the door to lightweighting many conventional structures such as liftgate modules, cross-members, door modules, front-end carriers, tailgates, step bumpers, running boards, etc. The technology creates the ability to create additional content in these systems.

In addition to meeting stiffness and modal performance of the prior design with stamped inserts, this part offers better aesthetics, resulting in elimination of the beauty cover. All design features which were captured from the previous design were captured in the all-carbon-fiber composite design as well as other additional features, such as the retaining feature for the hood prop rod. An all-composite structure offers better acoustic performance as well, like composite engine mounts, the composite offers an order of magnitude higher coefficient of damping than steel which would translate to less noise for the engine compartment.

The RIW welding process provides an economical and quick method to structurally bond two large injection-molded parts. The RIW process allows two plastic components which are in contact with one another and a conductive implant at the intended weld seam to be joined by passing an electric current via resistance heating. The material properties of the PA 6.6 20% carbon-fiber resin allows the GOR to achieve a weight saving while meeting functional requirements. As a result of the RIW process, designers and engineers can develop a closed-box section in the very limited and predetermined design space. The closed box section was critical in meeting the system engineering requirements. Total cost of ownership for the system results in cost savings for low production volume vehicles, and has the potential to mitigate or lower most of the carbon-fiber cost in the vehicles with higher production volumes. If elimination of the beauty cover is applied to the total system cost, there are additional capital cost savings. Since the new part is mostly made of composite thermoplastic material, it can be reground and recycled.

References

- [1] The Ford Motor Company Mediacenter.
<https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/products/cars/mustang/shelby-gt350-mustang.pdf>
- [2] The Ford Motor Company Mediacenter.
<https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/products/cars/mustang/shelby-gt350-mustang.html>
- [3] BASF ULTRASIM. <http://performance-materials.basf.us/ultrasim>
- [4] US-P 8,361,583 B2
- [5] US-P 8,323,444 B2
- [6] BASF Ultramid. <http://product-finder.basf.com/group/corporate/product-finder/en/brand/ULTRAMID>

Determination of thermal damages undergone by plastic parts in stochastic environments: application to air ducts

L. Gervat, M. Lacuve, J. M. Fiard, G. Gauge, F. Bekaert,
Renault Technocentre, Guyancourt, France

Abstract

Two important levers to reduce CO₂ emissions are weight reduction and more efficient powertrains. More efficient powertrains means smaller, lighter and hotter engines. High-temperature-resistant plastics are therefore a useful tool to achieve these objectives. However plastics have two limitations: they are expensive and sometimes, despite their ever-higher resistance, they fail to meet the requirements set by classical design methods to replace metal in high temperature environments, i.e. ageing at the maximum temperature seen by parts during their expected lifetime.

This paper describes a more accurate way of estimating the real damage suffered by plastic parts in environments with stochastic exposures, typical of the under-bonnet environment.

As an example of applications, we show how the method allows a secure use of polyamide in a turbo outlet duct.

Plastics: a chance and a challenge

The automotive industry has always been very proactive in embarking on new technologies. This trend has always been highly valued by customers. Until recently improved comfort and safety features were simply added to the previous model, resulting in an ever-increasing weight, compensated by ever-increasingly powerful engines. Growing environmental concerns have changed this situation. Cars must also reduce their CO₂ emissions, hence every effort must be made to reduce weight and to improve the efficiency of powertrains. This means hotter engines because of downsizing, twin-turbo, EGR, stop & start, and so on.

Plastic and composites are helpful in reducing weight, but, unlike metals, plastics are very sensitive to heat: engineers must learn how to use them efficiently in these new challenging environments.

Heat and polymers

Most of the properties of plastics are very dependent upon temperature: modulus, tensile strength, impact strength, CLTE, shrinkage, melting, etc. These changes can be character-

ized and predicted thanks to well-known transitions such as the glass transition or the ductile/brittle transition. But polymers also age. They age physically by reorganizing their amorphous phase and sometimes their crystalline phases. But they also age thermally – in fact, they degrade.

In many – but not all – cases, the degradation consists in a thermo-oxidation which leads ultimately to a dramatic change in molecular weight. These degradations affect – and may be characterized by – many criteria such as visual, mechanical properties, smell, warpage, chemical composition, etc.

In our industry, it is usual to characterize the aging of polymers by their so-called half-life, which is the time at a given temperature after which the polymer loses half of a property. The most common property used to determine the half-life of polymers is tensile strength or unnotched Charpy. Unnotched Charpy is more sensitive to surface degradation, hence can detect degradations at an earlier stage than tensile strength, but on the other hand, it is often less representative of characteristics that may lead to part failure, and is also more likely to undergo large standard deviations. In this paper, the half-time, or $t_{50\%}(T)$, will refer to the time of continuous exposure after which dumbbells lose 50% of their tensile strength, as measured by ISO 527-2/1A/5.

The effect of thermal degradation on mechanical properties

The degradation starts by a chemical reaction that ultimately often leads to either chain scission or crosslinking. It usually does not significantly impair the macroscopic mechanical properties of the plastic until the molecular weight reaches a critical value, M_c , below which mechanical properties degrade rapidly (Fig. 1):

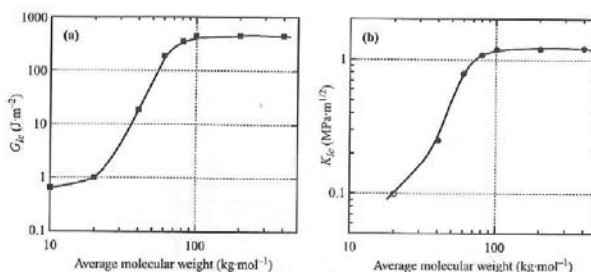


Fig. 1 : Effect of the molecular weight on the value of (a) GIC and (b) KIC for PMMA [1]

Macroscopically, despite the fact that observed phenomena are usually consequences of multiple microscopic causes, it is often possible to follow and predict their evolution with a similar equation. In particular their half-life $t_{50\%}$ which often follows the following equation:

$$t_{50\%} = k e^{\frac{E_a}{R.T}}$$

E_a being the apparent activation energy.

The 'law' is not universal. In particular, the apparent activation energy depends strongly on the characteristics followed [8]. Fig. 4 shows for instance the Arrhenius evolution of several characteristics during the aging of a polyamide 6: each one has a different apparent activation energy!

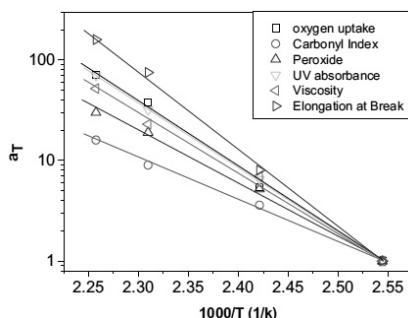


Fig. 4: Evolution of Arrhenius laws as a function of temperature for different methods for a PA6 [7]

However, for many polyamides, if we stick to one characteristic - the tensile strength for instance in our case - the apparent Arrhenius law taken from $t_{1/2}(T)$ is usually well respected (cf. for instance Fig. 5):

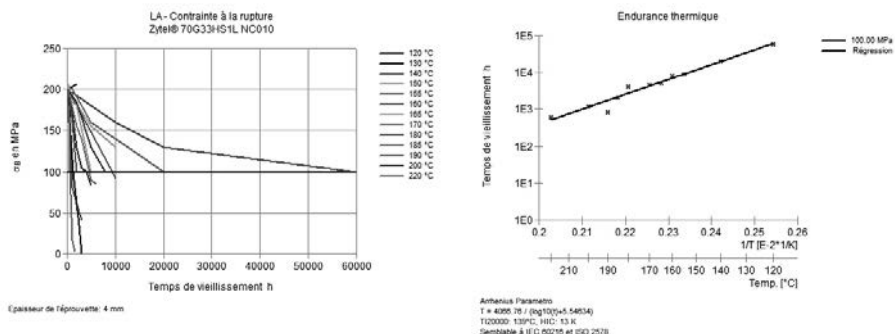


Fig. 5: Arrhenius law drawn from tensile strength data of a PA66-GF30 from CAMPUS® [9]

For many chemical reactions involving covalent bonds, the activation energy is close to 80 kJ/mol. At $\sim 100^\circ\text{C}$, this value complies with the well-known rule of thumb: $+10^\circ\text{C} \cong \times 2$ t, t being the exposition time (but $\times 1.5$ @ 200°C). For polyamides, all the grades in our study have an apparent activation energy between 55 and 115 kJ/mol.

How to predict thermal degradation in a random environment?

Once the kinetics of degradation of a plastic under exposure to a continuous high temperature is known, how do we take the information into account in order to design under-hood parts subjected to a stochastic thermal environment? Mechanical engineers just need to be sure that the characteristics of the plastic will still be good enough to ensure the part functions up to its required service life.

As it happens, every engineering plastic brochure cites a continuous temperature up to which it is supposedly safe to use the product. For automotive engineers, the continuous temperatures correspond to the maximum temperature at which a part may be maintained for a long and continuous period. But what precisely does it mean for chemists? We have questioned our major raw material suppliers about the definition they use. Table 1 summarizes their answers:

Table 1: Definitions of the maximum continuous temperature according to seven major raw material suppliers to the automotive industry

Supplier	Max continuous T° definition
A	Flex. strength, 50%, 1000h
B	Tensile strength, 50%, 3000h
C	Elastic modulus, tensile strength, tensile elongation, 50%, 2000h
D	Tensile strength, 50%, 20 000h
E	« it depends on the part the material is used for »
F	Tensile strength, 50%, 2000h
G	Tensile strength, 50%, 1000h
H	Tensile strength, 75%, 1000h

The conclusion is that there were as many different answers as chemists questioned. It is therefore necessary to ask for actual data by a known and agreed criterion in order to be able to compare materials on a fair and comparable basis.

From our end, we decided to choose the same criterion as chemist 'B': a polymer is suitable for a continuous temperature T_c , if $t_{50\%}(T_c) \geq 3000h$. Actually, it is very easy to reconcile these data with the traditional way parts designers estimate the thermal requirement of parts *i.e.* an exposure to T_c during an estimated total time of service τ_e (usually 2000 or 3000 hours). This is very straightforward, but is it an optimized way of characterizing the thermal degradation of a polymer? In many cases it leads to a highly over-engineered part, but, in some cases, as we shall see later, it may also paradoxically lead to some risk-taking.

Let $d(T)$ be the rate of degradation of the polymer at a temperature T , defined as the ratio of the consumed degradation time to $t_{50\%}$:

$$d(T) = t/t_{50\%}$$

If we let $\tau(T)$ denote the total duration for which the plastic is exposed at any temperature T . The elementary degradation undergone by the polymer at T is thus:

$$d(T) = \frac{t(T)}{t_{50\%}(T)}$$

If the part is continuously exposed to a unique temperature T during a total period τ , then the total damage would be:

$$D(T, \tau) = \frac{\tau}{t_{50\%}(T)}$$

When a part is designed to function properly up until the tensile strength of the plastic is halved, then the polymer should be chosen so that $D(T_n, \tau_n) = 1$

Let us now calculate the real damage suffered by the plastic at the end of its lifetime. With the same notation, the actual damage suffered by the plastic is:

$$D = \int_0^{\tau} \frac{dt}{t_{50\%}(T(t))} \cong \sum_T \left(\frac{\tau(T)}{t_{50\%}(T)} \right)$$

Each elementary damage $d(T)$ is easily obtained from half-life times given by apparent Arrhenius plots as shown in Fig. 5.

As an example, Fig. 6 illustrates the calculation for a polyamide 66. Here, for instance, at 170°C , $t_{50\%}$ is 10 000 hours, so if the total time of exposure at this temperature is $\tau(170)$, that is 1 000h, then the elementary damage is: $d(170) = \frac{\tau(T)}{t_{50\%}(T)} = \frac{1\,000}{10\,000} = 0,1$

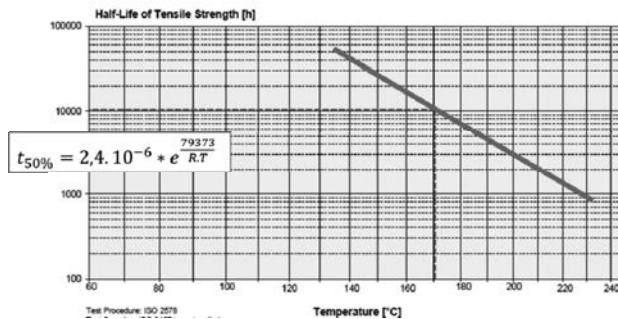


Fig. 6: Example of a half-life calculation at 170°C for a PPA: $t_{50\%}(170) = 10\,000\text{h}$

Once the elementary damages is known for each class of temperature, the total damage at the end of the life of the part can be estimated by adding together the elementary damage of each temperature segment.

Of course, there are numerous ways of driving a car. Each car will experience a different temperature profile. For some parts, the most severe temperature profile will correspond to a car mostly driven at a high speed on a (German) motorway, whereas other parts will suffer more in a car often stuck in traffic jams of a hot and busy city, and yet others in a car driven by a caravan owner in a mountainous region. To take all these possible situations into account, Renault simulate a large number of the temperature profiles experienced by parts in various situations. The results are called the t-T curves, which give, for each temperature T, the duration $\tau(T)$ during which the part is exposed to this temperature. For instance, Fig. 7 gives the temperature distributions for different profiles of frequent motorway drivers.

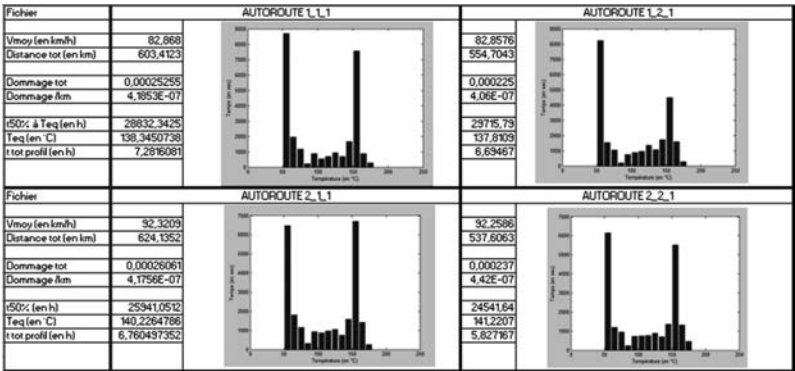


Fig. 7: Temperature distribution for 4 different driving profiles on a motorway

Each profile leads to damage. After calculating the damage for the various other environments, a damage distribution diagram is drawn, from which the percentage of drivers who may reach a given level of damage is estimated (Fig. 8).

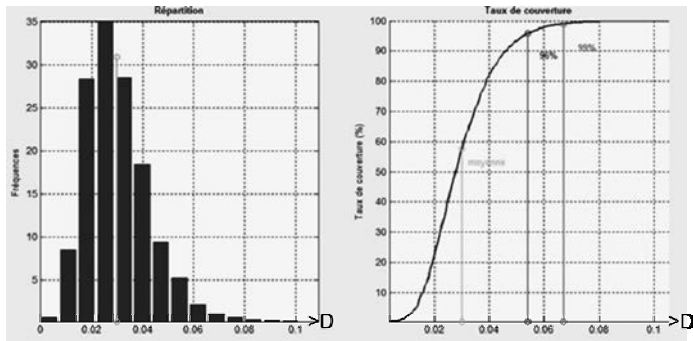


Fig. 8: Damage for various combination of profiles

Here again, when a part is designed to properly function until the tensile strength of the plastic is halved, then the polymer should be chosen so that $D = 1$ for 100% of the profiles. If $D < 1$, the part has been over-engineered, whereas if $D > 1$, the part may fail before its expected life duration. In the example given in Fig. 8, the 1% harshest drivers will use only 6.7% of the thermal lifetime of the plastic, *i.e.* 1/15 of the total time the part could have stayed in operation.

On the other hand, the damage calculated with the traditional approach at T_c during τ_{eq} would give:

$$D(T_c, \tau_{\text{eq}}) = \frac{\tau_{\text{eq}}}{t_{50\%}(T_c)} = 2.1$$

This plastic would therefore not have been accepted for this part, whereas the more refined analysis has shown it is in fact over-engineered 15-fold.

Experimental

To test the theory, we retrieved two turbo air ducts in glass-reinforced PA66 and PPA: 196 thousands of kilometers for the PA66 and 65 thousands of kilometers for the PPA. We asked Pr. Lemaire and his team at CNEP to analyse them, and to compare them to a virgin material but also to the same material aged in a controlled way (in an oven at set temperatures).

The methodology used was described in a paper presented by PSA a few years ago to SFIP [10]. The analysis is based upon quantitative measurement by infra-red spectroscopy (IRTF-

PAS and μ -IRTF) of the carboxylic acid concentration across the thickness of aged samples, as shown in Fig. 9 and Fig. 10.

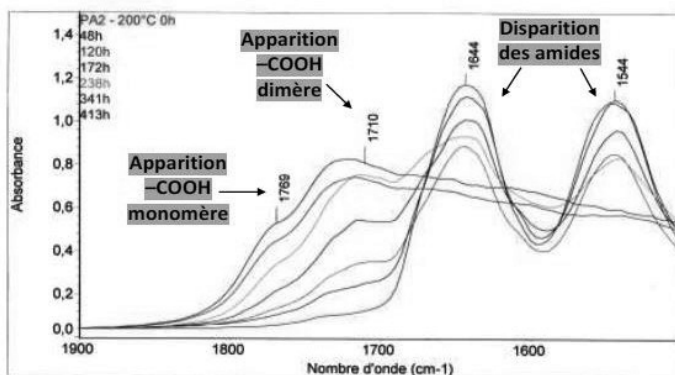


Fig. 9: Evolution of characteristic bands during PA66 ageing [10]

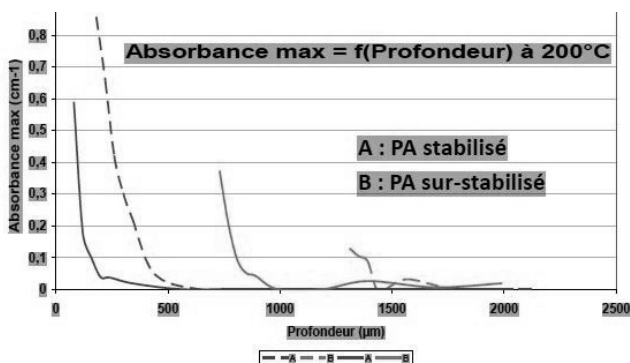


Fig. 10: Carboxylic acid absorbance across the thickness of different types of polyamide samples aged at 200°C

The study is not yet finalized, but the first infra-red profiles are already available. Fig. 11 shows the complete μ -IRTF spectra obtained by transmission through ten 40 μ m microtomic slices sampled through the thickness of the aged (196,000 km) air duct made of PA66-GF20: As expected, the meaningful evolution is concentrated in the 1500-1800 cm^{-1} region, as detailed in Fig. 11: The increased concentration of carboxylic acid is significant but limited to the first 40 μ m of the duct (cf. bands at 1710 cm^{-1} (dimer) and at 1771 cm^{-1} (monomer) – the band at 1730 cm^{-1} being attributed to esters of possibly burnt oil).

Fig. 13 shows the measurements taken on the 65,000 km PPA duct. The oxidation signature of the 1710 cm^{-1} carboxylic acid band is already detectable on the surface, but is almost undetectable in the 40 μm thick first microtomed layer. Pr. Lemaire estimates that the IRTF-PAS used in these measurements may analyse the first 10 to 15 μm of the surface. So it is estimated that the extent of oxidation was limited to this thickness. Preliminary results on the PPA, suggest that this thickness of oxidation is obtained approximately at $1/50$ of τ_e , so a rough estimation of the degradation factor D would be around 2%, in perfect accordance with our prediction above.

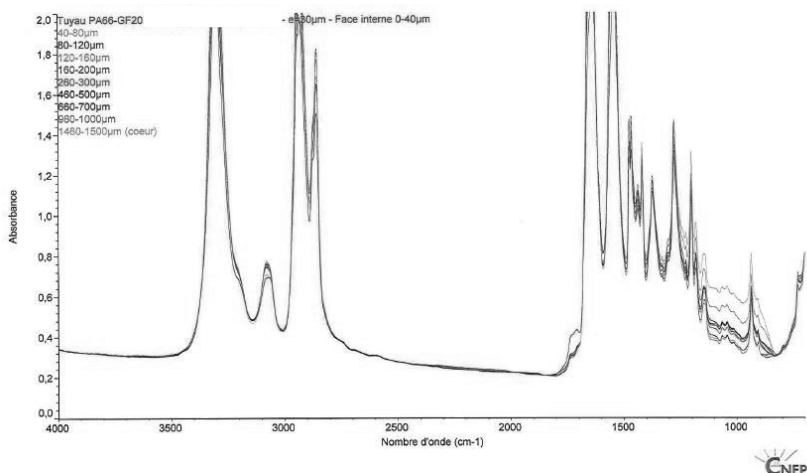


Fig. 11: μ -IRTF across the thickness of a 196,000 km PA66-GF20 turbo air duct

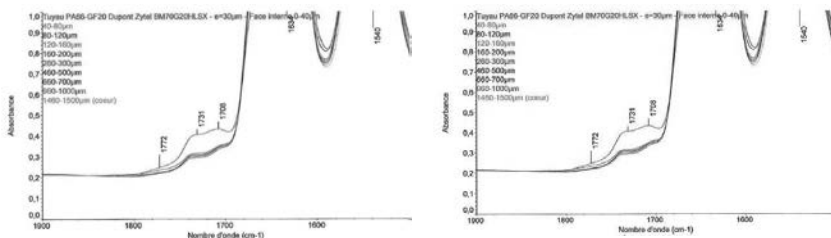


Fig. 12: IRTF-PAS and μ -IRTF of respectively the internal surface and the first 40 μ of the aged PA66 air duct (196,000 km)

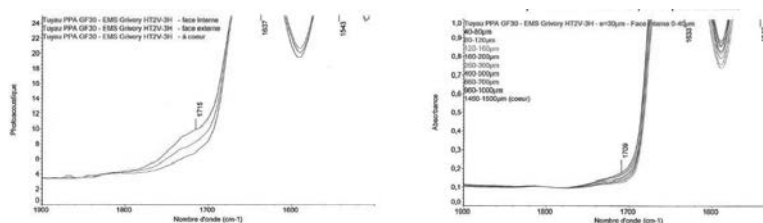


Fig. 13: IRTF-PAS and μ -IRTF of respectively the internal surface and the first 40 μ of the aged PPA air duct (65,000 km)

Discussion

Depending upon the polymer and the temperature range to which it is exposed, the predominant degradation mechanism may come from a unique chemical reaction within the entire temperature range considered, but it may also vary depending upon the temperature. Pr. Celine has for instance calculated that the thermal degradation of polypropylene follows two very different Arrhenius processes with a crossover temperature (temperature at which the two processes equally contribute) of 83°C [10]. In such cases, a sound lifetime prediction requires a slightly more complicated mathematical treatment.

Polyamides may also have two or three different Arrhenius processes along the usual range of temperatures observed under the bonnet for plastic parts, and curvature may occur at high and low temperatures (Fig. 14). A similar approach would therefore be beneficial. However, it would be more difficult to apply and the extra gain would not be so significant. Indeed, at low temperature, the actual kinetic is often higher than extrapolated from the Arrhenius line of the middle temperature range, but the amount of degradation undergone is negligible. At high temperatures, the extrapolation also sometimes deviates from reality, and it leads to an overestimation of the damage, resulting in an extra safety margin. However, this margin is

negligible compared to the 30-fold over-engineering found when comparing the Arrhenius to the traditional T_c -based approach.

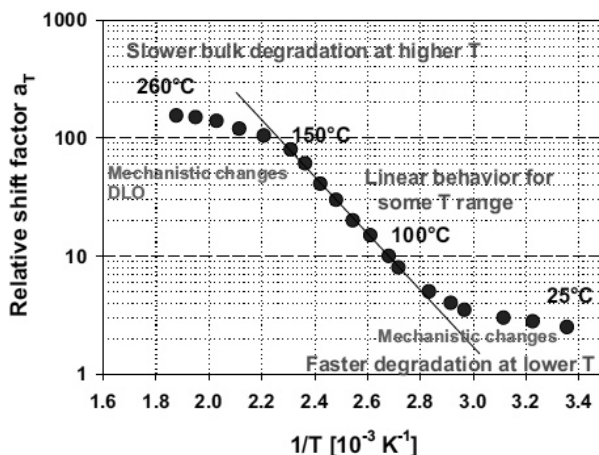


Fig. 14: Kinetic of polyamide degradation as a function of reciprocal temperature [8]

Among polyamides that may exhibit several Arrhenius processes are the ones stabilized with a recently introduced so-called 'shield technology'. This technology is based on the idea of forming a crust on the surface that can act as a barrier against oxygen. To achieve it, chemists add various additives which aim at triggering the formation of enough radicals at a given temperature to favor crosslinking over chain scission (cf. Figure 2). This technology was gradually introduced during the last decade by several major polyamide suppliers. It works very well for pass in the traditional heat-aging test at very high continuous temperatures. However, at slightly lower temperatures, or under cyclic conditions more representative of real life, the additives might adversely create radicals that would increase the rate of degradation. A later publication will show that even with such singular products, the Arrhenius approach can be used to detect and prevent possible early degradation at lower temperatures.

Conclusion

Traditional material testing based on a continuous exposure to a single high temperature may be misleading if applied in random environments such as under-hood parts.

It has been demonstrated that an Arrhenius approach is a safe alternative which allows a more precise selection of polymers according to the real thermal needs of parts.

References

- [1] L. Monnerie, F. Lauprêtre and J.-L. Halary, *Polymer Materials*, Wiley, 2011.
- [2] H.Kausch, *Matériaux polymères. Propriétés mécaniques et physiques. Principes de mise en oeuvre*, Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2001 .
- [3] B. Fayolle, *Polymer*, vol. 45, p. 4323–4330, 2004.
- [4] S. Wu, *Journal of Polymer Science : Part B: Polymer Physics*, 27, 723, 1989.
- [5] C. El-Marzy, Thesis : "Durabilité de produits innovants de robinetterie en polyamide 6,6"» 2013.
- [6] P. Cerruti, «Thermal-oxidative degradation of polyamide 6,6 containing metal salts» 2010.
- [7] P. G. W. Dong, «Influence of temperature on thermo-oxidative degradation of polyamide 6 films» 2010.
- [8] M. Celina, «Review of polymer oxidation and its relationship with materials performance and lifetime prediction» 2013.
- [9] «CAMPUS(r),» [on-line]. Available:
<http://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Zytel%C2%AE+70G33HS1L+NC010/DuPont/52/05ca06e9#page26336>.
- [10] M. Celina, «Accelerated aging and life time prediction: Review of non-Arrhenius behaviour due to two competing processes» 2005.

Berechnung von Kunststoffen im Crash bei Volkswagen

Anforderungen an sicherheitsrelevante Kunststoff-Bauteile

Dipl.-Ing. (FH) **E. Glas**, Dr.-Ing. **L. Greve**,
Dipl.-Ing. **O. Steiln**, **J. Čopík** (M.Sc.),
Dipl.-Phys. **R. Flögel**, Volkswagen AG, Wolfsburg

Kurzfassung

Simulationen haben sich in den letzten Jahren zu einem zentralen Entwicklungsinstrument für fast sämtliche Anforderungen des Fahrzeuges, besonders aber für die Auslegung von Eigenschaften der passiven Sicherheit entwickelt. Das mechanische Verhalten von Kunststoffbauteilen wird allerdings in der Simulation bei dynamischer Beanspruchung teilweise noch unzureichend abgebildet. Damit ist die rechnerische Auslegung sicherheitsrelevanter Bauteile erschwert; es sind noch zu viele Versuche zur Validierung der Rechenmodelle nötig. Es gibt drei zentrale Ursachen hierfür: Erstens sind die bis dato verwendeten Materialmodelle unzureichend. Zweitens wird die Variation der Materialeigenschaften durch den Herstellungsprozess noch nicht hinreichend berücksichtigt.

Drittens existieren heute noch keine ausreichenden Toleranzen für mechanische Kenngrößen der Kunststoffbauteile und der Ausgangsmaterialien.

Volkswagen arbeitet daher an einem Programm, das die Lösung dieser Probleme für crash-relevante Kunststoffbauteile zum Ziel hat. Zum Erreichen der Ziele zeichnet sich die Notwendigkeit eines Schulterschlusses der Automobil- und Kunststoffindustrie ab.

Abstract

Simulations have grown to a central development tool in automotive design but in main for the development of passive safety properties. Unfortunately, the mechanical behavior of plastic parts is not developed in a satisfying quality for crash simulations. Therefore, too many tests are required to validate simulation models. Three main reasons have been found: Firstly, currently used material models are inappropriate. Secondly, variation of material properties caused by the production process is not considered sufficiently yet. Thirdly, tolerances for mechanical parameters of plastics are not defined adequately yet.

Volkswagen is performing a program to solve these problems. In order to succeed, it is necessary to cooperate within the automotive and polymer industry.

1. Problemstellung

Für Kunststoffbauteile in Crashlastfällen werden Deformationen und Bruchverhalten in der Simulation noch unzureichend abgebildet. Dies ist aber für die Auslegung zum Beispiel des Greenhouse für die Erfüllung der FMVSS 201 erforderlich. Bild 2 zeigt den Schnitt durch das Modell eines Kopfpimpaktors beim Aufschlag auf den Himmel und auf das darunterliegende Deformationselement. Der auftretende Hauptspannungsverlauf im Deformationselement aus PP in der Simulation ist auf der linken Seite in Bild 2 dargestellt, das Bruchbild des Deformationselements nach dem Versuch ist auf dem Foto auf der rechten Seite zu sehen.

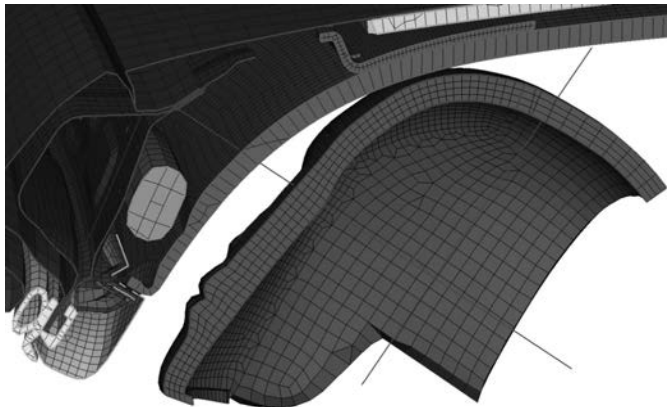


Bild 1: FE-Simulation Kopfaufschlag

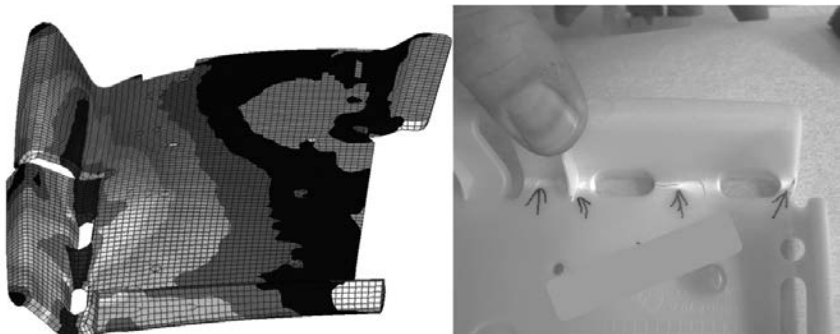


Bild 2: Deformationselement beim Kopfaufschlag, links: im FE-Modell, rechts: nach Versuch

Mit den bisher verwendeten Materialmodellen ist das Bruchverhalten der Rippen und damit auch die bewertungsrelevante Verzögerung des Impaktors in der Simulation oft nicht hinreichend genau. Aus diesem Grunde sind viele Versuch zum Abgleich der Rechenmodelle nötig. Ähnliche Probleme ergeben sich in anderen Crashdisziplinen wie z.B. im Fußgängerschutz beim Aufprall mit dem Beinimpaktor oder in Türverkleidungsmodellen im Seitencrash.

Das unterschiedliche Bruchverhalten zwischen Versuch und Simulation ist im Wesentlichen auf das zugrundeliegende Materialmodell für den Kunststoff zurückzuführen, das für derartige Beanspruchungen nicht geeignet ist. Materialstreuungen und fertigungsbedingte Einflüsse sind weitere Unschärfen, die die Auslegung sicherheitsrelevanter Bauteile im Crash erschweren.

Die Analyse der Situation ergibt drei Hauptproblem- und somit Handlungsfelder:

1. Material	2. Bauteil	3. Anforderungen
<ul style="list-style-type: none"> Annahme Inkompressibilität analog zu Metallen ist häufig für Kunststoffe unzureichend Keine umfassende Materialcharakterisierung: Kennwerte nur an Zug- oder Biegeversuchen ermittelt Zug-Druck-Fließasymmetrie vernachlässigt Versagen in Abhängigkeit des Belastungszustandes unzureichend abgebildet 	<ul style="list-style-type: none"> Diskretisierung Fertigungseinflüsse: <ul style="list-style-type: none"> - Bindenähte - Faserorientierung 	<ul style="list-style-type: none"> Unzureichende Beschreibung der mechanischen Eigenschaften der Materialien und Bauteile in Liefervorschriften Toleranzen der Materialeigenschaften nicht ausreichend definiert Keine einheitlichen Prüfvorschriften

2. Materialcharakterisierung und -modellierung

Diskrepanzen zwischen Versuch und Simulation sind neben der Diskretisierung auf das zugrundeliegende Materialmodell für den Kunststoff zurückzuführen. Das bisher verwendete Standard-Materialmodell (MAT 103 in Pam Crash) wurde für Stahl konzipiert. Die Spannungs-Dehnungs-Charakteristik wird dabei anhand standardisierter Zug- oder Biegeversuche bei unterschiedlichen Dehnraten ermittelt. Als Fließbedingung wird die Gültigkeit der Fließspannungshypothese nach *von Mises* vorausgesetzt, die vereinfacht davon ausgeht, dass sich Fließen unabhängig vom hydrostatischen Spannungszustand aus den Größen des Spannungsdeviators ergibt. In Verbindung mit der Annahme eines assoziierten Fließens, welches zu einem plastisch inkompressiblen Deformationsverhalten führt, stellt ein derartiges Modell für typische unverstärkte thermoplastische Kunststoffe eine starke Vereinfachung dar. Für den in Bild 2 untersuchten talkumgefüllten Thermoplast (PP/PE-TD16) liegt eine ausgeprägte Asymmetrie des Fließverhaltens unter Zug- und Druckbelastung vor. Die beobachtete ausgeprägte Volumendilatation erfordert ein kompressibles Plastizitätsmodell mit druckabhängiger Fließregel. Ebenso ist eine durch den Einspritzvorgang resultierende Anisotropie der mechanischen Eigenschaften sichtbar.

Ein erstes Materialmodell zur Implementierung dieser Eigenschaften wurde in 2011 für das modulare Materialmodell (MMM) der Volkswagen Konzernforschung entwickelt und kontinuierlich erweitert. Eine Zusammenfassung des Plastizitätsmodells zur Berücksichtigung der Zug-/Druck-Fließasymmetrie, der Volumendilatation und des anisotropen Fließverhaltens ist in [1] aufgeführt. Das Modell wurde erweitert, um die ausgeprägte plastische Dehnratenverfestigung und die durch die Volumendilatation induzierte Schädigung (Softening) zu berücksichtigen.

Die Kalibrierung der Modellparameter erfolgte auf Basis einer umfangreichen Materialcharakterisierung von talkumgefülltem Polypropylen/Polyethylen (PP/PE-TD16). Ein Auszug aus den Versuchsergebnissen (durchgezogene Kurven) ist in Bild 3 dargestellt. Die anderen Kurven repräsentieren die Simulationsergebnisse mit dem Standardmodell (gepunktete Kurven) und dem neu entwickelten isotrope Modell in MMM (gestrichelte Kurven). Das neue Modell ermöglicht die Abbildung sämtlicher Versuche mit sehr guter Übereinstimmung. Das Standardmodell weist dagegen in vielen Versuchen deutlich größere Diskrepanzen zu den Versuchskurven auf.

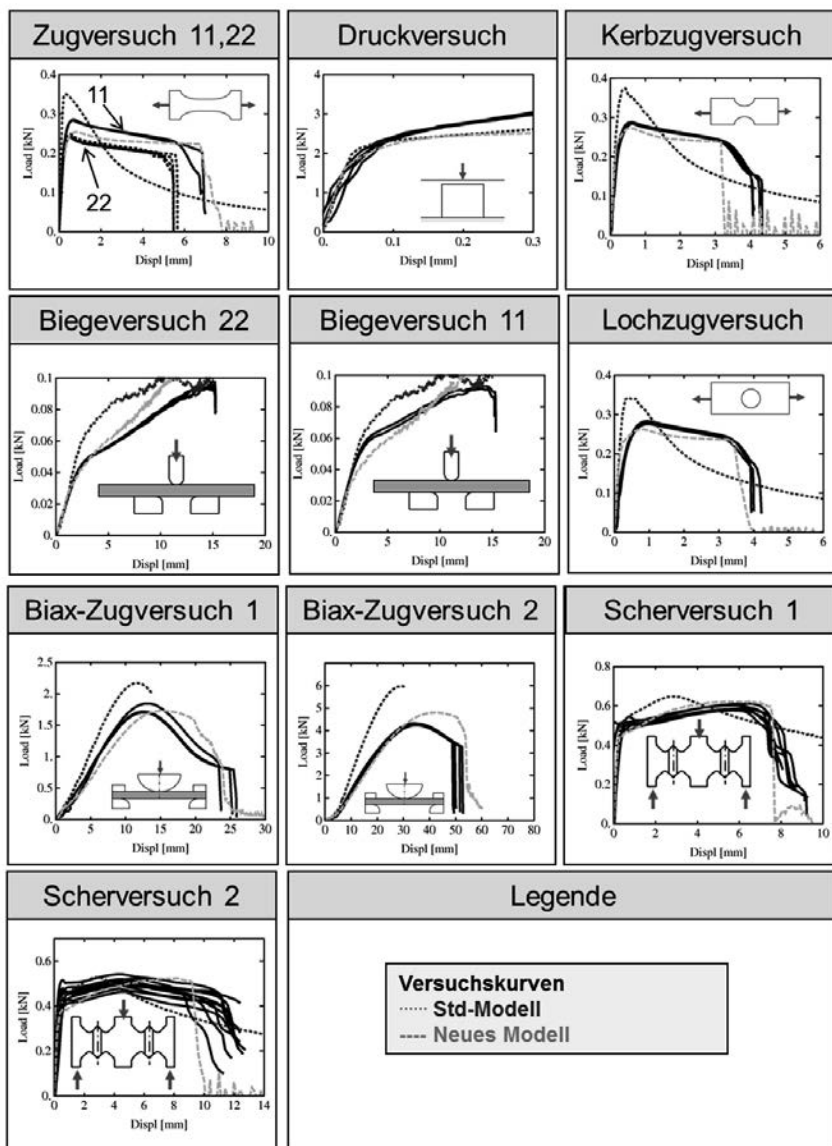


Bild 3: Auszug aus dem Versuchsprogramm

Die beobachteten Diskrepanzen bei Verwendung des inkompressiblen Standardmodells sind zusätzlich in Bild 4 dargestellt. Im Versuch zeigt sich eine aufgrund der Volumendilatation nur moderate Einschnürung des Probenquerschnitts. Das inkompressible Standardmodell, welches auf eine gute Übereinstimmung unter reiner Biegebelastung kalibriert wurde, kann diesen Deformationsmechanismus im Gegensatz zum neu entwickelten Modell in MMM nicht abbilden.

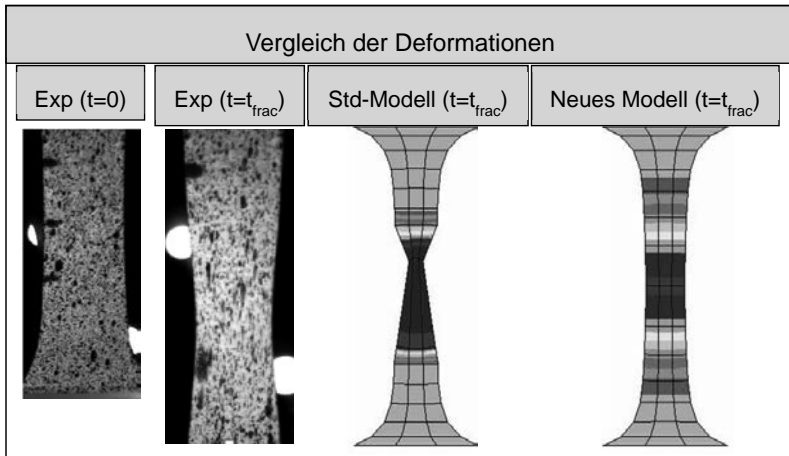


Bild 3: Vergleich der Probeneinschnürung im uniaxialen Zugversuch zum Zeitpunkt des Versagens

3. Berücksichtigung herstellungsbedingter Einflüsse im Bauteilmodell

Die Eigenschaften von Kunststoffbauteilen werden bestimmt durch die Eigenschaften des Rohmaterials, die Verarbeitung und je nach Material auch durch die Lagerung. Um das Bruchverhalten von Kunststoffbauteilen unter Crashbelastung präzise zu prognostizieren, ist die Berücksichtigung der Verarbeitung wichtig. Die Annahme homogener Materialparameter über das gesamte Bauteilmodell wird der tatsächlich inhomogenen Verteilung der Festigkeitseigenschaften in Kunststoffbauteilen oftmals nicht gerecht.

Im Spritzgussverfahren hergestellte Kunststoffe sind heterogen und anisotrop, da sich die Mikrostruktur während des Einspritz- und Abkühlvorgangs lokal unterschiedlich im Bauteil ausbildet, s. z.B.[3]. Druck, Temperatur, Geometrie und Angussorte beeinflussen dabei die Verteilung der Eigenschaften im Bauteil. Die damit verbundenen streuenden Festigkeiten und Bruchdehnungen sind in Zugproben messbar, die an unterschiedlichen Orten aus dem

Bauteil entnommen werden. Insbesondere dort, wo Fließfronten beim Einspritzen zusammentreffen, ist die Bruchdehnung deutlich geringer, s. z.B. [5]. Das Bauteilversagen geht daher im Crash häufig von Bindenähten aus.

Bei kurzfaserverstärkten Kunststoffen ist die Anisotropie aufgrund der Faserorientierung noch deutlich ausgeprägter als bei unverstärkten Kunststoffen. Quer und längs zur Faserichtung weisen diese Verbundwerkstoffe erhebliche Unterschiede im Materialverhalten auf, s. Bild 4. Durch lokal unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten und -richtungen beim Einspritzvorgang sind auch die Faserorientierung und damit die Festigkeitseigenschaften im Bauteil heterogen.

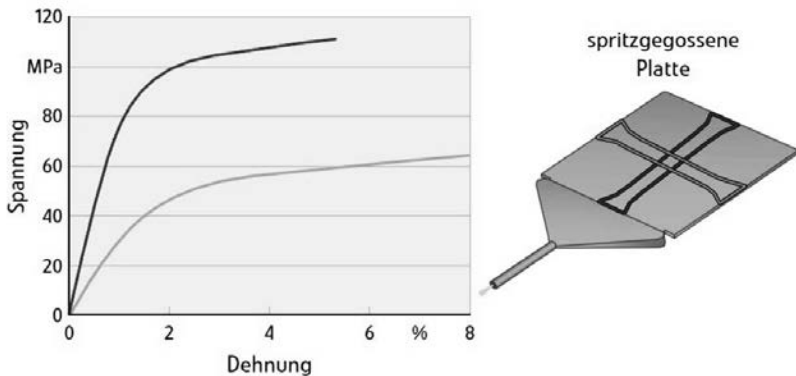


Bild 4: Spannungsdehnungs- Verhalten in Abhängigkeit der Faserrichtung [4]

Anhand von Spritzgießsimulationen können Bindenähte und Faserorientierungen im Bauteil lokalisiert werden. Existierende Schnittstellen zu den FE-Solvern für die Strukturberechnung ermöglichen die lokale Zuordnung unterschiedlicher Materialeigenschaften im Bauteilmodell. Die Materialeigenschaften können somit in Abhängigkeit der Faserorientierung auf das FE-Netz aufgeprägt werden.

Krümmungen, Stöße, Dickensprünge und Lunker bilden Kerben im Bauteil, die unter Belastung zu hohen Zugspannungen führen. Risse gehen also häufig von den Kerbgründen aus. Um akzeptable Rechenzeiten für die Crashberechnung zu erreichen, sind die Elementkantenlänge des FE-Modells nach unten begrenzt. Scharfkantige Radien-ausformungen werden aufgrund dieser Einschränkung zu grob abgebildet, um die tatsächlich auftretenden

Kerbspannungen präzise zu berechnen. Sie werden unterschätzt. Die Folge ist, dass Risse im Crashmodell nicht zuverlässig prognostiziert werden können.

Die Analyse alternativer 3D-Diskretisierungsmöglichkeiten mit erhöhter Netzfeinheit sowie die Eruierung der Möglichkeiten zur Modellregularisierung bei gegebener Netzfeinheit in aktuellen Fahrzeug-Crashmodellen sind Bestandteil aktueller Forschungsaktivitäten zur Verbesserung der Versagensprognose.

4. Test des Materialmodells am Beispiel eine Deformationselements für den Kopfaufschlag

Um das neue Materialmodell testen zu können, wurden Fallturmversuche durchgeführt, bei denen ein kugelförmiger Impaktor auf ein Defoelement aufschlägt, s. Bild 5. Die Beschleunigungsverläufe werden im Impaktor gemessen. In dem Diagramm ist die mittlere Beschleunigungskurve aus den Versuchen (durchgezogene Linie) zusammen mit den Simulationen dargestellt, die mit dem MMM bei unterschiedlicher Netzfeinheit berechnet wurden. Der gepunkteten Kurve liegt eine Diskretisierung mit einer mittleren Kantenlänge von 1 mm zugrunde, zu der gestrichelten Kurve gehört eine mittlere Kantenlänge von 0,5 mm.

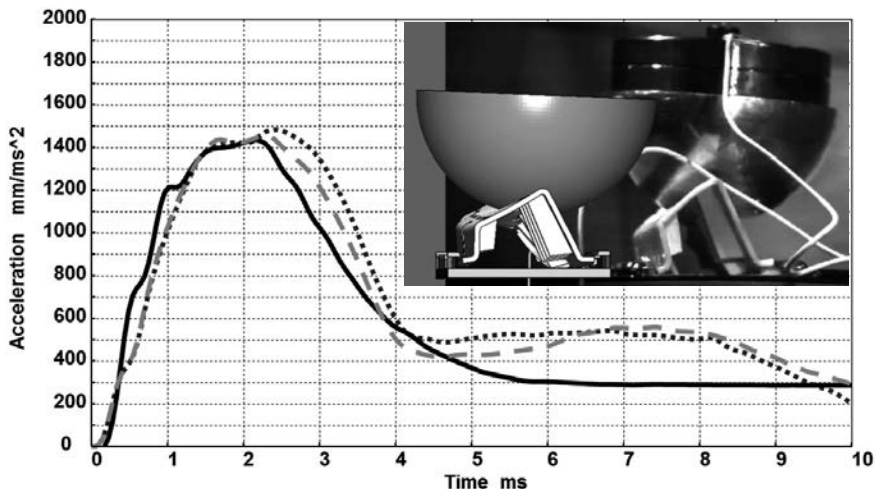


Bild 5: Vergleich zwischen mittlerer Beschleunigungskurve Versuch (durchgezogene Linie) und Simulation mit unterschiedlicher mittlerer Elementkantenlänge (gepunktet: 1 mm, gestrichelt: 0,5 mm)

Die Simulationen zeigen sowohl in den Beschleunigungskurven als auch in den dazugehörigen Bruchbildern (s. Bild 7) eine gute Übereinstimmung mit dem Versuch. Insbesondere das Bruchversagen im Rippengrund ist nur durch das neue MMM darstellbar. Das Rippenversagen beginnt in den Beschleunigungskurven beim Überschreiten des Maximums. Dort schmiegt sich die MMM-Kurve besser an die Versuchskurve an als das Standardmodell. Die feinere Diskretisierung (gestrichelte Kurve) bringt eine zusätzliche Verbesserung.

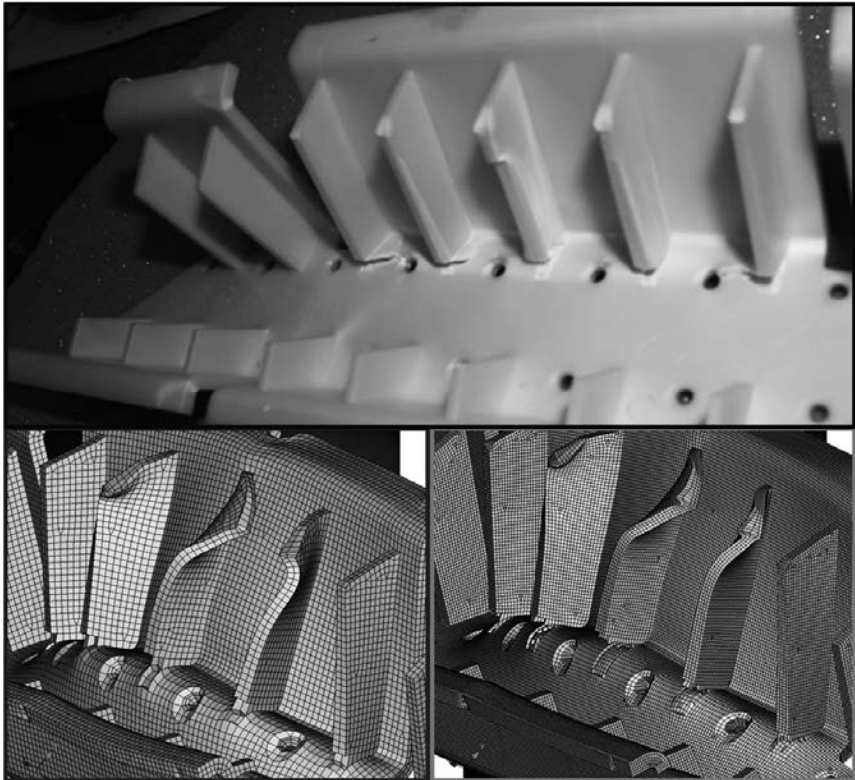


Bild 6: Vergleich der Bruchbilder zwischen Versuch und Simulation mit unterschiedlicher mittlerer Elementkantenlänge (links unten: 1mm, rechts unten: 0,5 mm)

Aus dem Vergleich der Beschleunigungskurven zwischen Versuch und Simulation ab etwa 5 ms wird jedoch auch deutlich, dass die Rückfederung noch nicht ausreichend genau dargestellt ist. Eine Vielzahl von Teilansätzen zur Verbesserung der rheologischen Modelle unter Berücksichtigung der thermo-mechanischen, visko-elastischen und visko-plastischen Ei-

enschaften existieren bereits. Die Umsetzung der für die Crashesimulation relevanten Mechanismen in industriell anwendbares Materialmodell-Framework ist Gegenstand aktueller Forschungsaktivitäten.

5. Anforderung an Kunststoffbauteile

Mechanische Anforderungen, die seitens Volkswagen an Kunststoffbauteile gestellt werden, sind im Hinblick auf die Craschauslegung heute unzureichend definiert. Die technischen Lieferbedingungen geben lediglich Mindestwerte für einige wenige Parameter vor. Die Vorgaben beziehen sich auf einfache statische Zugversuche. Damit ist eine exakte rechnerische Auslegung der Bauteile nicht möglich.

Wie in Kapitel 2 dargelegt, ist für die Crashberechnung eine umfassendere Charakterisierung des Kunststoffes notwendig, s. Bild 3.

Hierfür müssen entsprechende Prüfvorschriften für crashrelevante Bauteile standardisiert werden. Einen guten Ausgangspunkt könnten die bei VW für das MMM definierten Testbedingungen darstellen.

Aus o.g. Gründen ist geplant, sinnvolle Grenzen für auslegungsrelevante Kennwerte in den technischen Lieferbedingungen von Kunststoffbauteilen festzulegen. Diese Anforderung soll-ten insbesondere Bauteile betreffen, die für den Crash ausgelegt werden.

6. Einigung der Automobilindustrie auf neue Standards

Da herstellerübergreifend häufig dieselben Kunststoffe verwendet werden, hat jeder Fahrzeughersteller grundsätzlich den gleichen Bedarf an Materialdaten für dynamisch beanspruchte Bauteile. Um die aufwendige Charakterisierung für die Vielzahl der verwendeten Kunststoffe bewältigen zu können, wäre es sicher für alle Beteiligten sinnvoll, gemeinsam an diesem Thema zu arbeiten.

Es wäre hilfreich, Toleranzen für mechanische Kenngrößen gemeinsam festzulegen und die Versuchskonstellationen zur Charakterisierung der Materialien einheitlich zu definieren. Auf diese Weise würde es auch der Kunststoffindustrie ermöglicht, für jedes Material standardisierte Daten mitzuliefern. Stetig wechselnde Versuchskonstellationen für unterschiedliche Nutzer könnten so vermieden werden. Der wirtschaftliche Vorteil wäre für alle Beteiligten erheblich.

Literatur

- [1] Greve, L., Fehrenbach, C.: Mechanical testing and macro-mechanical finite element simulation of the deformation, fracture, and short circuit initiation of cylindrical Lithium ion battery cells, Journal of Power Sources, Volume 214, 15 September 2012, Pages 377-385, ISSN 0378-7753, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.04.055>.
- [2] Koukal, A.: Crash- und Bruchverhalten von Kunststoffen im Fußgängerschutz von Fahrzeugen. Dissertation TU München 2014
- [3] Hellwege, K.-H., Knappe, W.: Die Festigkeit thermoplastischer Kunststoffe in Abhängigkeit von den Verarbeitungsbedingungen. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Köln und Oblagen: Westdeutscher Verlag 1960
- [4] Glaser, S.: Integrated simulation of crash-loaded fibre-reinforced thermo-plastic parts. EuroPam Prag 2008
- [5] Kolling, S., Seelig, T., Sun, D.-Z.: Verbesserung der Crashesimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden von Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation. Forschungsgesellschaft Kunststoffe e.V. Bericht 2011

Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von Langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation

L. Schulenberg, J. Lienhard,

Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg;

Dr. **D. Niedziela, I. Shklyar, Dr. K. Steiner,** Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern;

Dr.-Ing. **B. Lauterbach,** Adam Opel AG, Rüsselsheim

Kurzfassung

Die Entwicklung einer Methode für die Crashsimulation von Bauteilen aus langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) gliedert sich in drei Bereiche. Zunächst wird eine Prozesssimulation entwickelt, die die Faserorientierungsverteilungen und die Faservolumenkonzentrationen lokal korrekt vorhersagen kann. Hierzu ist eine konsistente Modellierung der dynamischen Gleichungen zur Füllsimulation, Faserkonzentrationsänderung und Faserorientierung langfaserverstärkter Thermoplaste entwickelt worden, die die gekoppelten Wechselwirkungen im analytisch gegebenen rheologischen Modell abbildet. Eine Realisierung des Modells erfolgt in der Simulationsplattform CoRheoS und wird anhand der umfangreichen Experimente validiert. Danach wird ein spritzgegossener LFT-Werkstoff der Firma Sabic sowohl auf der Mikro- als auch auf der Makroebene experimentell charakterisiert. Zur Analyse der Mikrostruktur werden unterschiedliche Methoden herangezogen. Faserorientierungsverteilungen und Faserkonzentrationen werden jedoch vornehmlich mit Hilfe der Computertomographie (CT) bestimmt. Die mechanische Charakterisierung wird an makroskopischen Versuchen bei unterschiedlichen Spannungszuständen und Dehnraten durchgeführt. Dabei wurden zum einen lokale Unterschiede innerhalb einer Platte genauer untersucht, zum anderen wurden die Entnahmepositionen der Proben so gewählt, dass Ergebnisse im Mittel repräsentativ für die Eigenschaften der Spritzgussplatten stehen. Für die gesamte Charakterisierung wurden spezielle, besonders für dynamische Prüfung geeignete Probenformen verwendet. Im Fall der Scherzugprobe wurde die Probenform werkstoffspezifisch neu entwickelt. Grundlegende mechanische Eigenschaften werden parametrisiert in einem Werkstoffmodell berücksichtigt. Es wird ein Materialmodell vorgestellt, das durch die Kombination eines analytischen mikro-

mechanischen Ansatzes zur Approximation der anisotropen elastischen Steifigkeiten mit einer phänomenologischen Beschreibung zur Abbildung der plastischen und visko-elastischen Eigenschaften effizient in der Crashberechnung angewendet werden kann. Effekte wie Schädigung und Versagen werden mit Hilfe eines isotropen Ansatzes ebenfalls berücksichtigt. Es wurde in dem Finite-Elemente-Code LS-DYNA implementiert. Die Kalibrierung der Parameter des neu entwickelten Materialmodells erfolgt mit Hilfe der makroskopischen Charakterisierungsversuche durch inverse Simulation. Die Validierung der entwickelten Methode erfolgt durch die Simulation der gesamten Prozesskette von der Spritzgusssimulation, der Übertragung von Faserorientierungsverteilungen und -volumengehalt auf die FEM-Modelle (Mapping) bis hin zur Crashsimulation an einem Serienbauteil wie es aktuell bei dem Automobilhersteller Daimler AG verbaut wird. Das Ergebnis wird mit experimentellen Versuchsdaten verglichen. Zudem wird der Crashversuch mit einem isotropen Materialmodell simuliert und den Ergebnissen gegenübergestellt.

1. Einleitung

Als Leichtbauwerkstoffe haben langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT) wegen ihrer hohen Festigkeit bei geringem Gewicht besonders im Automobilbau ein großes Anwendungspotenzial. Durch die Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten von Faser- und Matrixmaterial ergibt sich ein breites Spektrum an Werkstoffeigenschaften, das durch die Variabilität von Faservolumenanteil und –länge noch erweitert wird. Besondere Herausforderungen stellen sich hierbei bei der Entwicklung von crashrelevanten Bauteilen aus LFT, wie Stoßfänger, Frontend- oder Türmodule, die hohen Anforderungen bezüglich ihrer Crashsicherheit genügen müssen. Die hierfür relevanten Kennzahlen wie Festigkeit und Bruchdehnung hängen bei LFT sehr stark von der lokalen Faserorientierung ab [1]. Im Fall einer Belastung senkrecht zur Faserorientierung entfällt der Effekt der Faserverstärkung sogar beinahe zur Gänze. Das Problem liegt darin, dass die Verteilung der Faserorientierung sowohl vom Fertigungsprozess als auch von der Komponentengeometrie abhängt und experimentell nur sehr aufwendig zu ermitteln ist. Die Analyse von Schliffen oder Untersuchungen am Computertomographen sind mit einem hohen finanziellen Aufwand verbunden und können daher nur an einzelnen Positionen und nicht am kompletten Bauteil durchgeführt werden. Daher ist der Bedarf groß, eine numerische Methode zu entwickeln, die eine verlässliche prädiktive Bewertung von LFT Komponenten bei dynamischen Beanspruchungen erlaubt.

Simulation von Spritzgießprozessen

Die Grundlage der Modellierung der Faserorientierung bilden die Folgar-Tucker-Gleichungen, wie sie auch für kurzfaserverstärkte Kunststoffe schon seit Jahren erfolgreich eingesetzt werden. Alle kommerziellen Produkte am Markt basieren auf diesem Ansatz. Allerdings sind bei Langfasern zusätzliche Wechselwirkungseffekte wie Faser-Fluid (Rückkopplung auf die Viskosität), Faser-Faser und Faser-Wandinteraktionen dominant, die bei Kurzfasern meist vernachlässigt werden können. In Vorarbeiten am ITWM konnte gezeigt werden, dass durch zusätzliche geeignete Potenzialterme, diese Effekte modelliert werden können [2]. Allerdings führen all diese Wechselwirkungen zu lokalen Entmischungen oder Verdünnungen, also folglich zu einer lokalen Faserkonzentrationsänderung, die wesentlich entscheidender die resultierenden strukturellen Eigenschaften und das Crashverhalten beeinflussen, als geringe Abweichungen in der Faserorientierung. Für Entmischungen von Suspensionen existieren Modellansätze die alle im Wesentlichen auf dem sogenannten Phillips-Modell [3] basieren. Allerdings sind diese Modelle für runde Partikel und nicht für lange Fasern.

Materialmodellierung langfaserverstärkte Thermoplaste

Zur Berücksichtigung der Faserorientierungsverteilung aus der Formfüllsimulation bei der Berechnung von LFT-Komponenten mit kommerziellen FEM-Codes, fehlte bisher eine validierte Materialmodellierung, die sowohl die anisotropen als auch die nichtlinearen Eigenschaften mit dem gleichen Rechenaufwand wie typische elasto-plastische Materialmodelle berücksichtigt. Das Problem ist die Notwendigkeit von mikromechanischen Ansätzen, welche die CPU-Rechenzeiten in die Höhe treiben. In dem hier entwickelten Materialmodell dienen diese mikromechanischen Ansätze nur noch zur Vorhersage des effektiven elastischen Steifigkeitstensors. Ein Benchmark dieser sogenannten analytischen Homogenisierungsmethoden für einen langfaserverstärkten Kunststoff wurde am Beispiel von SMC (Sheet-Moulding-Compound) kürzlich in [4] veröffentlicht. Das hier entwickelte Materialmodell verwendet die analytische Homogenisierungsmethode nach Mori und Tanaka [5] unter Verwendung der Faserorientierungsverteilung aus der Prozesssimulation nach Advani und Tucker [6] und hat sich als beste Approximationsmethode herausgestellt. Daher wird es zur Ermittlung der anisotropen Steifigkeiten verwendet. Diese Homogenisierung muss nur zu Beginn der Rechnung einmalig gelöst werden. Nichtlineare Materialeigenschaften wie Visko-Elastizität und Plastizität werden anisotrop mit einer phänomenologischen Materialmodellierung formuliert.

Für die Bestimmung der Parameter im Materialmodell zur Beschreibung von nichtlinearem Materialverhalten, wie Plastizität, Schädigung und Versagen wurden quasi-statische wie dynamische Versuche an dem LFT-Werkstoff unter verschiedenen Spannungsmehrachsigkeiten durchgeführt. Besonderes Augenmerk wurde auf eine aufwendige Charakterisierung der Dehnratenabhängigkeit gelegt. In der Literatur gibt es eine Reihe experimenteller Untersuchungen für thermoplastische Matrixwerkstoffe. In [7] wurde beispielsweise eine Zunahme des E-Moduls und der Festigkeit bei steigender Dehnrates beobachtet. Für thermoplastische Homopolymere ist bekannt, dass sich mit steigender Dehnrates das duktile Verformungsverhalten in ein sprödes verändert [7]. Dieses Verformungsverhalten wird unter anderem auf den Einfluss von isothermen Bedingungen bei statischen Dehnrates gegenüber adiabatischen Bedingungen bei höheren Dehnrates zurückgeführt. Wie aus [8] bekannt, entstehen durch den Spritzgussprozess Kern- und Randschichtlagen, die deutlich das mechanische Verhalten beeinflussen. Dehnratesabhängige experimentelle Untersuchungen an LFT [9], [10], [11], [12] berichten übereinstimmend von leicht steigenden Moduli und deutlich steigenden Festigkeiten bei höheren Dehnrates. In [10], [12] werden außerdem steigenden Bruchdehnungen mit zunehmender Dehnrates ermittelt. Aus diesen Ergebnissen resultiert eine steigende Kapazität der Energieabsorption je schneller der Werkstoff belastet wird. Diese Ergebnisse stehen konträr zu den Resultaten aus [7]. Für die Erstellung eines crashrelevanten anisotropen Materialmodells für einen LFT Werkstoff bedarf es demnach an umfangreichen experimentellen Untersuchungen um die Faserorientierungsverteilung, die Faserkonzentration, die Mehrachsigkeit und die Dehnrates in der Simulation auch zu berücksichtigen und richtig zu beschreiben.

2. Modellierung von Rheologie und Faserorientierung

Die Grundlage der Modellierung der Faserorientierung bilden die Folgar-Tucker-Gleichungen, wie sie auch für kurzfaserverstärkte Kunststoffe schon seit Jahren erfolgreich eingesetzt werden. Allerdings sind bei Langfasern zusätzliche Wechselwirkungseffekte wie Faser-Fluid (Rückkopplung auf die Viskosität), Faser-Faser und Faser-Wandinteraktionen dominant, die bei Kurzfasern meist vernachlässigt werden können. In Vorarbeiten am ITWM konnte gezeigt werden, dass durch zusätzliche geeignete Potenzialterme, diese Effekte modelliert werden können [2]. Die Modellgleichungen für die Spritzgussimulation von langfaserverstärkten Polymeren lauten somit:

$$\begin{aligned}
\nabla \cdot \mathbf{v} &= 0 \\
\rho(\partial_t \mathbf{v} + \nabla \cdot (\mathbf{v}\mathbf{v})) &= -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} \\
\rho c_p(\partial_t T + \nabla \cdot (\mathbf{v}T)) &= \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\kappa}
\end{aligned} \tag{1}$$

Hierbei sind \mathbf{v} die Geschwindigkeit, T die Temperatur, p der Druck, $\boldsymbol{\sigma}$ die Spannung, $\boldsymbol{\kappa}$ der Deformationstensor, \mathbf{g} die Erdbeschleunigung, und c_p, ρ, η, κ die Stoffgrößen des Polymers. Die korrekte Form der Spannung als Funktion der anderen Größen wird unten ausführlich diskutiert.

Für die Füllsimulation wird zusätzlich ein VoF-Ansatz zur Beschreibung der Füllfront verwendet. Die Faserorientierungsdynamik beruht auf der Folgar-Tucker-Gleichung, wie sie auch für kurzfaserverstärkte Kunststoffe schon seit Jahren erfolgreich eingesetzt wird und lautet:

$$\begin{aligned}
\frac{D}{Dt} A^{(2)} &= \mathbf{M} \cdot A^{(2)} + A^{(2)} \cdot \mathbf{M} - 2A^{(4)} : \mathbf{M} - 6C_i \dot{\gamma} (A^{(2)} - \frac{1}{3} Id) \\
\mathbf{M} &= \frac{\lambda+1}{2} \nabla \mathbf{v} + \frac{\lambda-1}{2} (\nabla \mathbf{v})^T; \quad \lambda = \frac{(l/d)^2 - 1}{(l/d)^2 + 1}
\end{aligned} \tag{2}$$

Die Folgar-Tucker-Gleichung wird gelöst für den Faserorientierungstensor $A^{(2)}$. $\dot{\gamma}$ ist die skalare Scherrate und C_i ist der Diffusionskoeffizient. Die Fasereigenschaften gehen über die Länge l und die Dicke d der Faser in das Modell ein.

Insgesamt ergibt sich mit einer geeigneten Abschlussrelation für den Orientierungstensor 4. Stufe $A^{(4)}$ ein geschlossenes System. Im Folgenden wird die allgemein übliche verallgemeinerte orthotrope Abschlussrelation zur Bestimmung der Koeffizienten verwendet [13]. Eine weitere Iterationsschleife mitsamt der Modellverbesserung war notwendig um die Einflüsse der Faserbündel und die damit verbundene effektive Änderung des Faserlängen-Faserdurchmesser-Verhältnis, dem Aspektverhältnis a , zu korrigieren. Hierzu wurde das sogenannte Variable Lambda Model nach [14] implementiert.

Die Faser-Faserwechselwirkung wie auch Faser-Wandwechselwirkungen werden durch einen sogenannten Maier-Saupe-Term berücksichtigt, der effektiv eine vorhandene Faserorientierungsrichtung verstärkt. Denn durch den Faser-Faser-Kontakt bei langen Fasern verstärken sich Faserorientierungen in eine Hauptrichtung bzw. entlang der Wand [2]. Dieser lokale Ansatz der Wandwechselwirkung wurde nicht weiter verfolgt, da es in der Regel ein sehr feines Berechnungsgitter erfordert, um die sich ergebende Einflüsse korrekt numerisch wiederzugeben.

Allerdings führen all diese Wechselwirkungen zu lokalen Entmischungen oder Verdünnungen, also folglich zu einer lokalen Faserkonzentrationsänderung, die wesentlich entschei-

dender für die resultierenden strukturmechanischen Eigenschaften sind als geringe Abweichungen in der Faserorientierung und damit das Crashverhalten beeinflussen.

Zunächst wurde einer Literaturrecherche durchgeführt und das für Partikelkonzentrationen übliche Phillips-Modell [3] auf Fasersuspensionen verallgemeinert, indem die notwendigen Parameter durch effektive äquivalente Größen (Radius, Oberfläche) ersetzt wurden. Die Transportgleichung für die Faserkonzentration ϕ lautet:

$$\partial_t \phi + v \nabla \cdot \phi = - \nabla \cdot (\phi J(\phi, A^{(2)})) \quad (3)$$

Dabei ist die Driftgeschwindigkeit J , die zu einer Entmischung oder Faserkonzentration führt wie folgt definiert:

$$J(\phi, A^{(2)}) = K_{coll} \sigma_{ell.} \nabla(\phi \dot{\gamma}) + K_{vis} \sigma_{ell.} (\phi \dot{\gamma}) \nabla \ln \eta_{eff} \quad (4)$$

Die Größen K_{coll} , K_{visc} sind Diffusionskonstanten aufgrund der Faserkollisionen bzw. aufgrund der Viskositätsgradienten und sind von der Größenordnung Eins. Der Kollisionsquerschnitt σ_{ell} ist speziell für die Fasern zu verallgemeinern, da das ursprüngliche Phillipsmodell nur sphärische Partikel betrachtet. Hierzu wurde eine erweiterte Literaturrecherche durchgeführt, die auch verwandte Forschungsfelder wie die Dynamik von Polymerketten erfasste [15], [16]. Aufbauend auf diesen verwandten Arbeiten wurde ein für die Anwendung des LFT-Spritzgusses adäquates Modell für die Faserkonzentrations- und Faserorientierungsdynamik entwickelt. Dabei ergeben sich folgende Ausdrücke für die beiden unbekannten Terme:

$$\begin{aligned} \sigma_{ell.} &= \pi d^2 \left(1 + \left(\frac{l}{d} - 1 \right) A : A \right) \\ \nabla \ln \eta_{eff} &= \frac{d \ln \eta_{eff}}{d \phi} \nabla \phi = \frac{d \ln \Gamma(\phi)}{d \phi} \nabla \phi \end{aligned} \quad (5)$$

Das gesamte Modell lässt sich wie folgt kurz zusammenfassen:

- Für die Geschwindigkeit und den Druck werden die Navier-Stokes-Gleichungen gelöst. Zusätzlich werden die thermischen Effekte über die Temperaturgleichung und temperaturabhängige Materialparameter mit berücksichtigt. Für die Füllsimulation wird zusätzlich ein VoF-Ansatz zur Beschreibung der Füllfront verwendet.
- Die Faserorientierungsdynamik beruht auf den Folgar-Tucker-Gleichungen, wie sie auch für kurzfaserverstärkte Kunststoffe schon seit Jahren erfolgreich eingesetzt

werden. Die Faser-Faserwechselwirkung wird durch einen sogenannten Maier-Saupe-Term berücksichtigt, der effektiv eine vorhandene Faserorientierung verstärkt.

- Die lokalen Faserkonzentrationsunterschiede werden durch eine Partikelkonzentration gemäß dem üblichen Phillips-Modell beschrieben, wobei für die Verallgemeinerung auf Fasersuspensionen die notwendigen Parameter durch effektive äquivalente Größen (Radius, Oberfläche) ersetzt wurden.

Wesentlich für die gesamte Beschreibung ist die Kopplung dieser drei Gleichungen über das rheologische Gesetz, also die Spannungs-Dehnungsbeziehung in Abhängigkeit von der Faserkonzentration ϕ und der Faserorientierung A .

$$\sigma = \eta_{eff} \kappa = \eta_s(T, \dot{\gamma}) \left[\kappa + \Gamma(\phi) \kappa + \Gamma(\phi) \beta(a) (A^{(4)} \kappa - \frac{1}{3} A^{(2)} : \kappa Id) \right] \quad (6)$$

$$\Gamma(\phi) = \frac{2\phi}{1-\phi} = \frac{1+\phi}{1-\phi} - 1; \quad \beta(a) = \frac{a^2 + 6.5 - 6 \ln(2a)}{2 \ln(2a) - 3}; \quad a = \frac{l}{d}$$

Dabei kann der Zusammenhang explizit berechnet werden, in dem dann nur noch auf das Verhältnis von Faserlänge zu Faserdicke eingeht. Der bisher übliche Faktor $N_p = \Gamma(\phi) \beta(a)$ separiert sich in einen rein konzentrationsabhängigen Faktor $\Gamma(\phi)$ und einen geometrischen Faktor für Langfasern $\beta(a)$. Durch Einsetzen der Fasercharakteristika (Faserlänge und Faserdicke) wie auch der Faserkonzentration (hier ist immer die Volumenkonzentration gemeint) ergeben sich explizit Werte von N_p , die bisher durch Parameteridentifikation zu bestimmen waren.

Für das oben dargestellte vollgekoppelte Modell zur Füllsimulationsberechnung langfaserverstärkter Polymere mit voller Kopplung der Faserkonzentrations- und Faserorientierungsdynamik wurde ein Finite-Volumenverfahren für strukturierte Netze entwickelt und im ITWM eigenen Softwareframework CoRheoS implementiert.

3. Entwicklung eines Werkstoffmodells mit Berücksichtigung der Faserorientierungsverteilung und Faservolumenkonzentration

Das Werkstoffmodell ist als Usermaterialroutine in das kommerzielle FEM-Programm LS-DYNA-Explizit implementiert worden. Es werden die grundlegenden Gleichungen des implementierten Modells dargestellt.

Die Approximation des anisotropen Steifigkeitstensors erfolgt in einer zwei Schritt Homogenisierung. Zuerst wird nach [5] der effektive transversalisotrope Steifigkeitstensor \mathbb{C}^* berechnet:

$$\mathbb{C}^* = [c^i \mathbb{C}^i : \mathbb{A} + (1 - c^i) \mathbb{C}^m] : [c^i \mathbb{A} + (1 - c^i) \mathbb{I}]^{-1} \quad (7)$$

Hierbei bezeichnet c^i den Faservolumengehalt, \mathbb{C}^i den isotropen Steifigkeitstensor des Fasermaterials (Glas), \mathbb{C}^m den isotropen Steifigkeitstensor des Matrixmaterials (PP), \mathbb{I} den Einheitstensor vierter Stufe und \mathbb{A} den Dehnungslokalisierungstensor. Letzteres beinhaltet die Information Fasergeometrie, also das Aspektverhältnis (AV: Faserlänge zu Faserdurchmesser). \mathbb{C}^* ist somit die Abschätzung der effektiven Verbundsteifigkeit für eine unidirektionale Faserorientierung. Im zweiten Schritt wird die Faserorientierungsverteilung berücksichtigt. Mit dem Ansatz nach Advani und Tucker wird der transversalisotrope Steifigkeitstensor mit Hilfe des Faserorientierungstensors A_{ij} aus der Formfüllsimulation in die unterschiedlichen Raumrichtungen gemittelt. Hierzu sei auf [6] verwiesen.

Für die Plastizität wurde ein phänomenologischer Ansatz gewählt. Für eine unidirektionale Faserorientierungsverteilung ist das Material transversalisotrop. In diesem Fall kann das Fließkriterium nach Hill verwendet werden, das nach [17] wie folgt geschrieben werden kann:

$$(G + 2F) \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}^2) + 2(M - G - 2F) \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}^2 \cdot \mathbf{B}) + (5G + F - 2M) \text{tr}^2(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B}) - \sigma_y(\varepsilon_p) = \Phi(\mathbf{B}) \quad (8)$$

Hierbei ist $\boldsymbol{\sigma}$ der Cauchy-Spannungstensors und $\sigma_y(\varepsilon_p)$ die Vergleichsspannung in Abhängigkeit der plastischen Dehnung ε_p bei der Fließen eintritt. Die Parameter F, G und M steuern den Fließbeginn in den unterschiedlichen Richtungen der Anisotropie. Der Orientierungstensor $\mathbf{B} = \mathbf{e} \otimes \mathbf{e}$ ist durch das dyadische Produkts aus einem Einheitsvektor \mathbf{e} mit sich selbst definiert. Aus den Hauptfaserorientierungen ergeben sich die Eigenvektoren \mathbf{e}_i^* des Faserorientierungstensors A_{ij} . Somit werden mit Gleichung (8) drei unabhängige Fließkriterien $\Phi(\mathbf{B}_i)$ eingeführt, welche sich durch die Orientierungen der Anisotropie ($\mathbf{B}_i = \mathbf{e}_i^* \otimes \mathbf{e}_i^*$ mit $i = 1, 2, 3$) unterscheiden. Hieraus resultieren drei Spannungstensoren $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{B}_i)$, die sich aus der numerischen Lösung von $\Phi(\mathbf{B}_i) \leq 0$ mit $i = 1, 2, 3$ errechnen. Der effektive Spannungstensor $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ wird dann aus dem gewichteten Mittelwert berechnet, wobei die Eigenwerte a_i (Eigenwerte von A_{ij}) als Wichtungen benutzt werden:

$$\bar{\sigma} = \alpha_1 \sigma(B_1) + \alpha_2 \sigma(B_2) + \alpha_3 \sigma(B_3) \quad (9)$$

Die Schreibweise $\sigma(B_i)$ symbolisiert die Abhängigkeit des jeweiligen Spannungstensors von der Orientierung B_i .

Die Berücksichtigung viskoser Effekte wurde mit Hilfe von parallel geschalteten Maxwell-Elementen ermöglicht. Zur Veranschaulichung ist am Beispiel des eindimensionalen Falls das kontinuumsmechanische Materialmodell als rheologische Verschaltung in Bild 1 dargestellt.

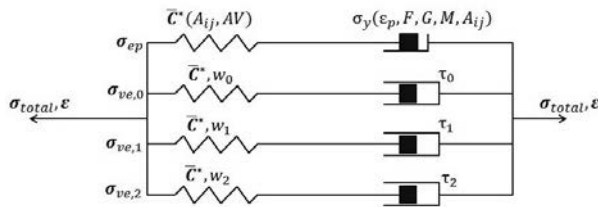


Bild 1: Eindimensionale Darstellung des visko-elasto-plastischen Materialmodells.

Das Erste der vier parallel geschalteten Elemente symbolisiert mit Feder und Reibelement das bereits beschriebene anisotrope elasto-plastische Materialmodell. Die weiteren drei parallel geschalteten Maxwell-Elemente bestehend aus Feder und Dämpfer bilden die viskosen Effekte des Werkstoffs ab. $\sigma_{ve,i}$ ist der Steifigkeitstensor des i -ten Maxwell-Elementes, τ_i sind die Relaxationszeiten der linearen Dämpferelemente und \bar{C}^* der bereits ermittelte anisotrope Steifigkeitstensor. Bei Berücksichtigung der Anisotropie in der Viskosität wird zur Vereinfachung ein sogenannter Bequemlichkeitsansatz verwendet, bei dem der anisotrope Steifigkeitstensor mit Hilfe eines skalaren Parameters w_i die anisotropen Steifigkeiten in alle Richtungen der Anisotropie gleichermaßen skaliert. In analoger Weise wirken sich die Relaxationszeiten auf das Materialverhalten aus. Der visko-elasto-plastische Spannungstensor σ_{total} errechnet sich durch die Addition der einzelnen Spannungstensoren:

$$\sigma_{total} = \sigma_{ep} + \sigma_{ve,0} + \sigma_{ve,1} + \sigma_{ve,2} \quad (10)$$

Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Lastzuständen und deren Auswirkungen auf die Schädigung sind bei LFT nicht vollständig verstanden. Bei der Beschreibung des Schädigungsverhaltens werden daher sechs unabhängige Schädigungsvariablen d_α mit

$\alpha = 1, \dots, 6$ eingeführt, welche die Schädigungsentwicklung entsprechend der einzelnen Spannungskomponenten unabhängig voneinander beschreiben. Der Spannungstensor wird hier als sechsdimensionaler Vektor ausgedrückt. Eine ausführliche Beschreibung über tensorielle Schädigungsformulierungen bietet das Buch von Murakami [18]. Der dort eingeführte „Damage Effect Tensor“ \mathbb{M} wurde adaptiert und beschreibt sich in diesem Anwendungsfall wie folgt:

$$\mathbb{M} = \begin{bmatrix} 1-d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-d_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-d_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-d_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-d_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-d_6 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Im ungeschädigten Fall sind alle Schädigungsvariablen $d_\alpha = 0$. Sobald eine Variable den Wert eins erreicht tritt Versagen ein. Die ungeschädigten Spannungen σ_α werden durch den Term $(1 - d_\alpha)$ reduziert und der geschädigte Spannungszustand berechnet sich wie folgt:

$$\sigma_\alpha^{\text{dam}} = (1 - d_\alpha) \sigma_\alpha \quad \text{mit} \quad d_\alpha = \left(\frac{\|\varepsilon_{\alpha, \max}\|}{\varepsilon_f} \right)^g \quad (12)$$

Die Schädigungsentwicklung ist abhängig von dem Absolutwert des historischen Maximums der jeweiligen Dehnungskomponente $\|\varepsilon_{\alpha, \max}\|$. Mit Hilfe des Materialparameters ε_f für die Versagensdehnung und dem Exponenten g zur Beschreibung der Schädigungsentwicklung, berechnen sich die Schädigungsvariablen d_α . In dem beschriebenen Fall wird ein und dieselbe Versagensdehnung ε_f verwendet. Die Versagensdehnung unterscheidet sich je nach Belastungsart und kann somit in Abhängigkeit von der Spannungsmehrachsigkeit σ_{triax} als Funktion $\varepsilon_f(\sigma_{\text{triax}})$ formuliert werden.

4. Experimentelle Werkstoffcharakterisierung

Zur Werkstoffcharakterisierung wurden spritzgegossene Probenplatten aus LFT mit 30 Gewicht-% Glasfasergehalt untersucht (STAMAX 30YK270 der Firma SABIC). Es wurden makroskopische mechanische Versuche sowie mikrostrukturelle Computertomographieuntersuchungen (CT) durchgeführt. Bild 2 zeigt den Entnahmeplan am Beispiel der Flachzugproben. Um das makroskopische Materialverhalten bei unterschiedlichen Spannungszuständen zu untersuchen wurden unterschiedliche Probengeometrien für Zug-, Kerbzug-, Scherzug-, Durchstoß, taillierter Durchstoß und Druckproben aus den Probenplatten entnommen

(Tabelle 1). Eine detaillierte Beschreibung kann [19] entnommen werden. Im Folgenden wird auf die wichtigsten Versuchsergebnisse eingegangen.

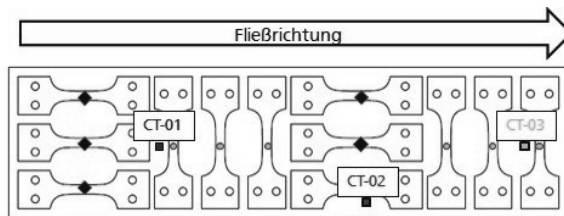


Bild 2: Probenplatte aus LFT-Spritzguss (300mm x 80mm x 2,8mm) mit Entnahmeplan der Flachzugproben in 0° und 90° zur Fließrichtung sowie der Computertomographieproben CT-01 bis CT-03.

Tabelle 1: Skizzierte Probentypen der Materialcharakterisierung (Nicht Maßstabsgetreu).

Zugprobe	Kerbzugprobe	Scherzugprobe	Durchstoßprobe	Durchstoßprobe tailliert	Druckprobe

Um den Einfluss der Entnahmeposition nicht zu vernachlässigen, wurden über der ganze Platte verteilt Proben entnommen (Beispiel Zugprobe: Bild 2). So erhöhte sich zwar die Streuung der Ergebnisse, aber es konnten auch lokale Eigenschaften, die durch den Fertigungsprozess auftreten, untersucht werden. Es wurden globale und lokale Dehnungen aus den Videos der Versuche mit dem Grauwertkorrelationsverfahren (DIC – Digital Image Correlation) und der Software ARAMIS bestimmt. Die Untersuchungen der Dehnartenabhängigkeit erfolgte für die verschiedenen Mehrachsigkeiten bei mehreren nominellen Dehnraten. Es wurden jeweils Kraft-Verschiebungs- bzw. technische Spannungs-Dehnungskurven aus globalen Messlängen auf den Proben ermittelt sowie Kennwerte für die einzelnen Versuche bestimmt. Neben der Messung von globalen Größen, wurden mit Hilfe von Mikroobjektiven und einer Hochgeschwindigkeits-Infrarotkamera lokale Dehnungen und Temperaturerhöhungen bestimmt. Die Kräfte wurden mit einer 30kN Piezokraftmesszelle und mit einer patentierten, schwingungsarmen IMW-Messzelle gemessen. In Bild 3 sind die gemittelten technischen Spannungs-Dehnungskurven der 0°, 45° und 90°-Zugversuche dargestellt. Jede Kurve repräsentiert eine Versuchsserie bei einer Dehnrate mit mindestens drei Versuchen.

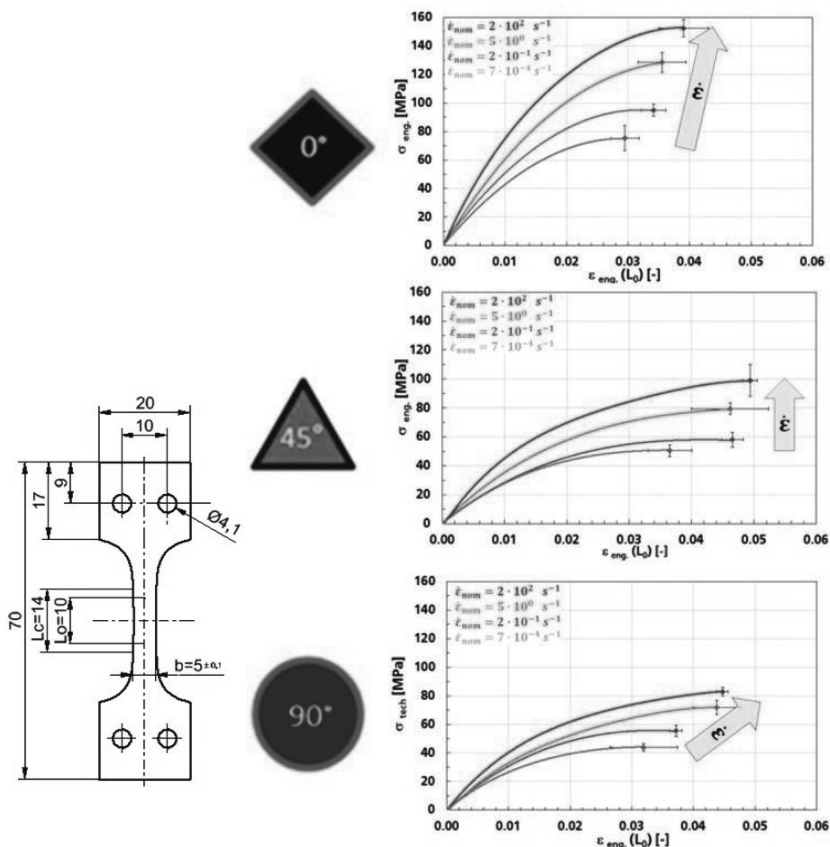


Bild 3: Zugversuche 0°, 45° und 90° zur Fließrichtung bei vier Dehnraten (rechts) und entsprechende Zugprobengeometrie (links).

Die Proben einer Serie wurden aus verschiedenen Positionen der STAMAX-Platten entnommen um die Streuung der Ergebnisse durch den Fertigungseinfluss nicht zu vernachlässigen. Jeweils am Ende der Kurven sind die Standardabweichungen der Kurven und Bruchdehnungen einer Versuchsserie durch den Fehlerbalken in das Diagramm eingezeichnet. Es ist ein deutlicher Einfluss der Dehnrates zu erkennen. Mit steigender Dehnrates nehmen die Bruchspannungen im Mittel um 100 % und die Anfangssteigungen um 60 % zu. Außerdem ist ein tendenzieller Anstieg der Bruchdehnungen mit steigender Dehnrates

ersichtlich. Ein Verlauf der Steifigkeiten in Abhängigkeit der Orientierung zeigt Bild 4 mit Hilfe einer Gauß-Fitfunktion.

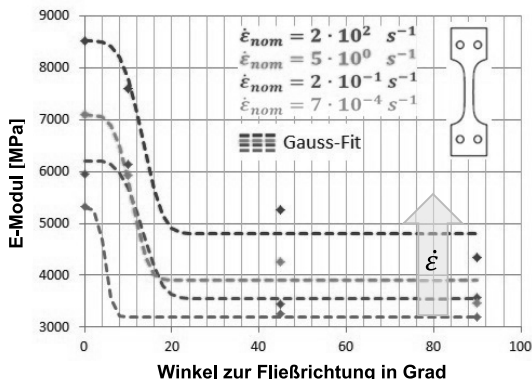


Bild 4: Elastizitätsmoduli aus den Zugversuchen in Abhängigkeit der Orientierung zur Fließrichtung. Das Diagramm zeigt Mittelwerte aller Probenpositionen einer Orientierung und eine angepasste Fitfunktion, die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nach Gauß.

Um einen multiaxialen Spannungszustand des LFT-Werkstoffs dehnratenabhängig zu charakterisieren, wurden Durchstoßversuche bei vier Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt.

Die Verformung aus der Ebene bei den Durchstoßversuchen verlangte je zwei Hochgeschwindigkeits-Videokameras um mit 3D-ARAMIS die lokalen Dehnungen zu analysieren. Die Prüfgeschwindigkeiten entsprechen denen der Zugversuche, lediglich die höchste Geschwindigkeit wurde um Faktor zwei auf 1400 mm s^{-1} reduziert um den Einfluss von dynamischen Effekten auf die Piezokraftmessung zu reduzieren. Die Kraft-Wegverläufe beinhalten nach Lastmaximum auch das Nachbruchverhalten, was besonders für die Energieabsorption in crashrelevanten Bauteilen von großer Bedeutung ist.

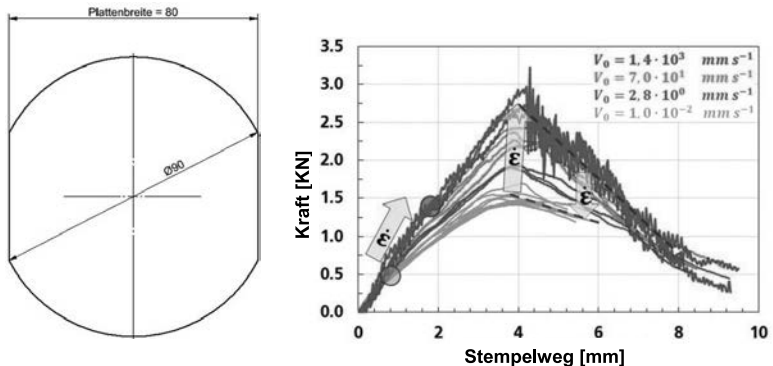


Bild 5: Probengeometrie der Durchstoßversuche (links), Kraft-Wegverläufe bei vier Prüfgeschwindigkeiten (rechts). Deutlich erkennbar ist die Dehnratenabhängigkeit der Schädigungsinitiation (gekennzeichnet durch Kreise), der Maximalkraft und des Nachbruchverhaltens.

5. Simulationsergebnisse der Werkstoffcharakterisierung

5.1 Formfüllsimulation der Probenplatten

Die Füllsimulationen der *Sabic*-Platten wurden mit den Materialdaten STAMAX 30YK270E, also für einen Fasergewichtsanteil von 30 Gew.-% durchgeführt. Die mittlere Faserlänge ergab sich zu 1.04mm und der mittlere Faserdurchmesser zu 19µm, was ein Aspektverhältnis von ungefähr 53 zur Folge hat. Die Injektionszeit war 2 Sekunden, das Polymer wurde zur Injektion auf 230 °C aufgeheizt und die Form wurde auf 50 °C temperiert.



Bild 6: Faserkonzentrationsverteilung in ausgewählten Querschnitten der Plattenströmung.

Bild 6 zeigt die Konzentrationsverteilung mit dem folgenden Verhalten:

- Die Konzentrationsverteilung über die Plattendicke zeigt eine leicht niedrigere Konzentration am Rand.
- Die Konzentration nimmt in Fließrichtung der Füllung der Platte zu.

Zur Berechnung der Faserorientierung und Faserkonzentration der Sabc-Platte wurde die Geometrie für die Sabc-Platte inklusive des Einlaufsystems erstellt und eine umfangreiche Simulationsstudie zur Ermittlung der Modellparameter durchgeführt. Dabei wurden systematisch die offenen Diffusionsparameter variiert und mit den Orientierungs- und Konzentrationsmessungen an den Stellen der μ CT-Proben verglichen. Das Ergebnis der Parameter- und Validierungsstudie ist eine Parametrisierung der noch freien Modellparameter, die sich im Bereich der physikalisch sinnvollen Grenzen dieser Parameter bewegt und in den folgenden Werten resultiert:

$$K_{coll} = 0.175, K_{visc} = 0.175, k = 0.5, C_i = 0.0025, W = 7 \quad (13)$$

Insbesondere der Vergleich mit den μ CT-Analysen hat gezeigt, dass alle auftretenden Effekte wie die lokalen Faserkonzentrationsunterschiede in Dickenrichtung und die Faserorientierungsmuster über die Dicke durch das Modell reproduziert werden.

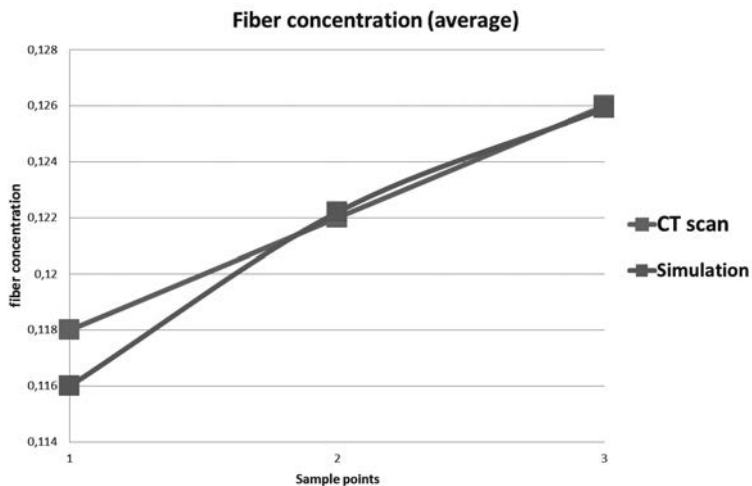


Bild 7: Vergleich der Faserkonzentration an den 3 Probeentnahmestellen mit den aus den μ CT-Aufnahmen ermittelten Werten.

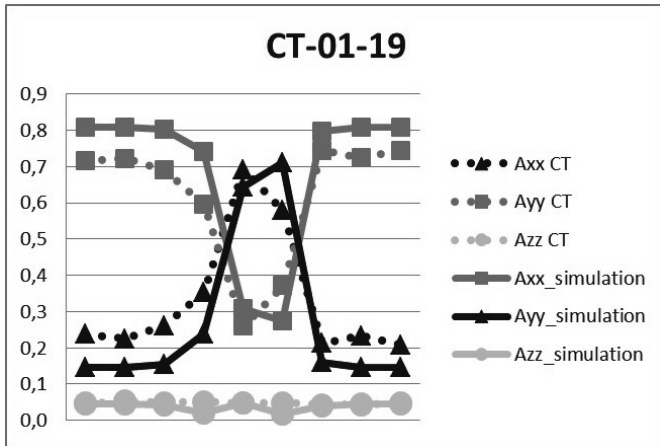


Bild 8: Faserorientierung über die Plattendicke an der Probenentnahmestelle CT-01-19
Vergleich der simulierten und gemessenen Faserorientierungen in die 3 Koordinatenrichtungen.

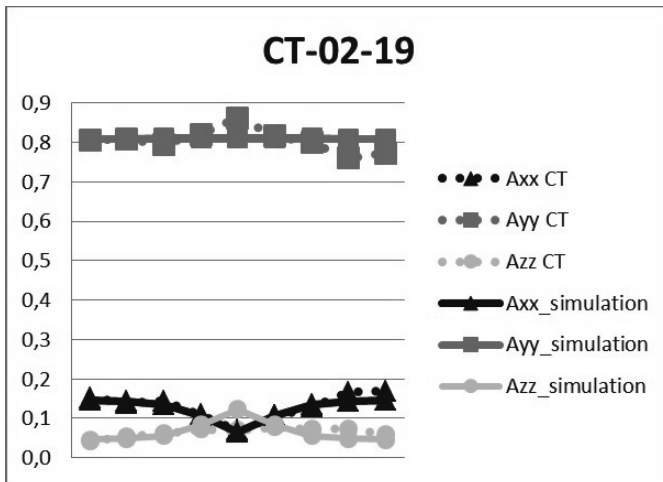


Bild 9: Faserorientierung über die Plattendicke an der Probenentnahmestelle CT-02-19
Vergleich der simulierten und gemessenen Faserorientierungen in die 3 Koordinatenrichtungen.

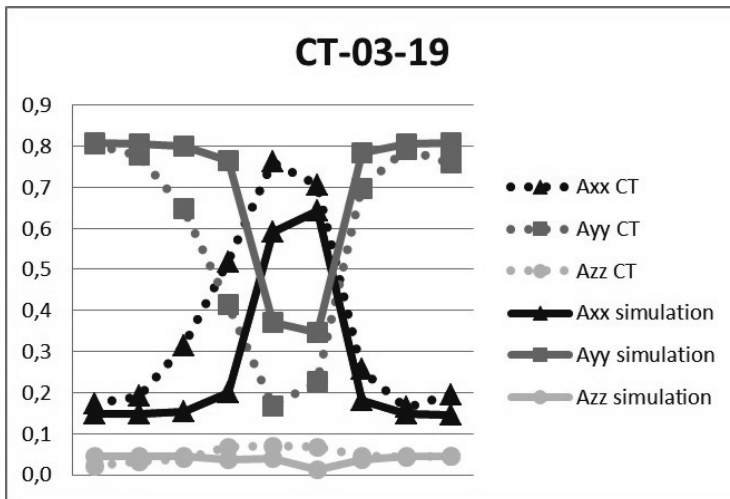


Bild 10: Faserorientierung über die Plattendicke an der Probenentnahmestelle CT-03-19
Vergleich der simulierten und gemessenen Faserorientierungen in die 3 Koordinatenrichtungen.

Auch die lokalen Faserorientierungen über die Plattendicke zeigen sowohl qualitativ (Crossing der Orientierungen in den Proben CT-01 und CT-03) als auch quantitativ (Absolutwerte am Rand und in der Probenmitte) eine gute Übereinstimmung, da auch die bildanalytischen Auswertungen der μ CT-Aufnahmen mit dem Auflösungsfehler zu betrachten sind.

5.2 FEM-Simulation der Probenversuche aus der mechanischen Materialcharakterisierung

Die mechanischen Materialcharakterisierungsversuche für Zug-, Kербzug-, Durchstoß, tailierter Durchstoß, Druck und Scherzugproben wurden in LS-DYNA nachsimuliert. Die Parameter des entwickelten anisotropen visko-elastisch-plastischen Materialmodells mit Berücksichtigung der Faserorientierungsverteilung aus der Formfüllsimulation wurden durch inverse Simulation der Zugversuche angepasst. Durch Mapping der Faservolumenkonzentration und Faserorientierungsverteilung lassen sich die Positionsabhängigkeiten der Flachzugversuche gut wiedergegeben (Bild 11).

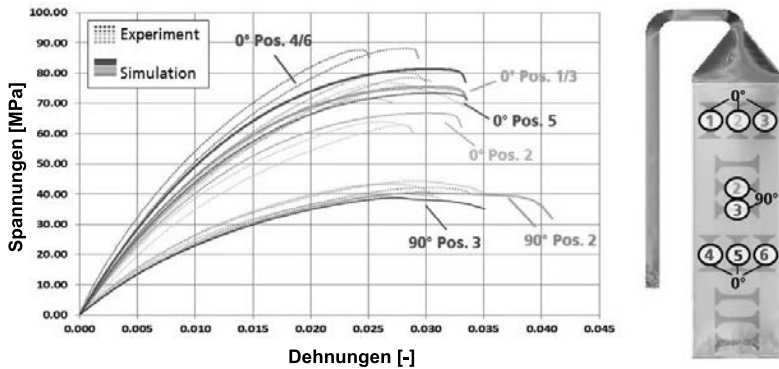


Bild 11: Vergleich zwischen Experiment und Simulation mit der UMAT der quasi-statischen Zugversuche. Unterschiedliche Faserorientierungen und Faservolumenkonzentrationen erzeugen unterschiedliche Spannungs-Dehnungskurven der verschiedenen Positionen.

Zusätzlich wurde ein isotropes elastisch-plastisches Materialmodell (LS-DYNA: MAT_024) kalibriert, dass die orientierungsabhängigen Materialkennwerte über der Orientierung mittelt. Es wird den Simulationsergebnissen des Usermaterialmodells (UMAT) gegenübergestellt. Wie Bild 12 zu sehen, lassen sich abgesehen von der Anisotropie auch die Dehnratenabhängigkeiten mit sich ändernder Anfangssteigung durch die visko-elastische Formulierung der UMAT besser als mit dem MAT_024 abbilden.

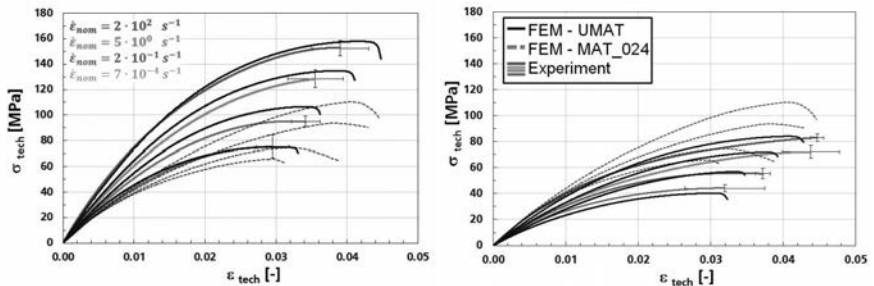


Bild 12: Vergleich zwischen den Simulationen mit der UMAT (anisotrop), MAT_024 (isotrop) und den Experimenten der dehnratenabhängigen Zugversuche in 0° (links) und 90° (rechts) zur Fließrichtung.

Die Parameter des Schädigungsmodells wurden mit Hilfe der Probenversuche unterschiedlicher Spannungsmehrschsigkeiten kalibriert. Bild 13 zeigt die Versagenskurve über der Spannungsmehrschsigkeit der UMAT. Dabei wurde in erster Linie das kritische Element (Versagensbeginn) aus der Simulation betrachtet und der Zeitpunkt der Rissinitiiierung im Experiment mit der Simulation verglichen. Für das isotrope Materialmodell (MAT_024) wurde das GISSMO-Versagensmodell (Generalized Incremental Stress-State dependent damage Model) angepasst. Das Versagenskriterium ist hierbei die effektive plastische Dehnung in Abhängigkeit der Spannungsmehrschsigkeit

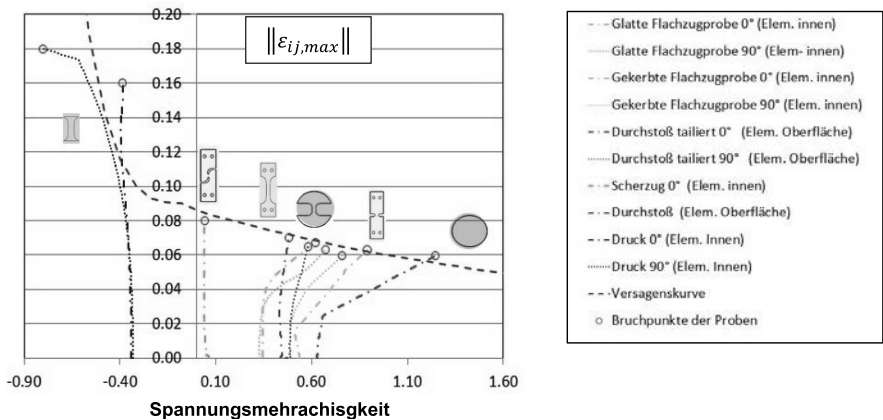


Bild 13: Versagensdehnungen in Abhängigkeit der Spannungsmehrschsigkeit (modifizierter Ansatz nach Johnson-Cook) für das entwickelte anisotrope USER-Materialmodell (UMAT).

Der Durchstoßversuch zeigt einen frühen Schädigungsbeginn und eine langsame Schädigungsentwicklung bis zum Versagen mit einer frühen Rissinitiiierung in der Mitte und einem langsam fortschreitende Risswachstum von drei oder vier Rissen nach außen. Um ein frühes Versagen zu initiieren, sind die Versagensdehnungen (Bild 13) bei biaxialer Belastung geringer. Da nur ein sehr feines FE-Netz in der Lage wäre dieses Risswachstum abzubilden, stimmen die Simulations- und Versuchskurven nicht exakt überein. Die Unterschiede zwischen den Materialkarten (MAT_024 und UMAT) sind gering. Die Simulationen zeigen die gleichen Rissinitiiierungen.

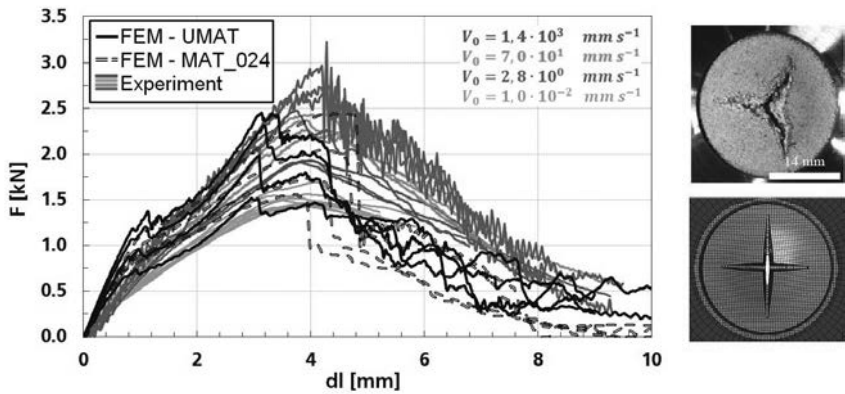


Bild 14: Links: Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe zwischen den Simulationen der UMAT und MAT_024 sowie den Experimenten der Durchstoßversuche. Rechts: Vergleich der Bruchbilder von Simulation (unten) und Experiment (oben).

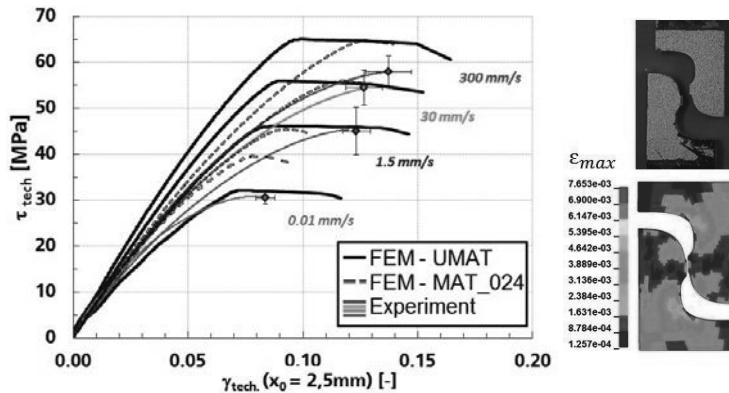


Bild 15: Vergleich zwischen den Simulationen der UMAT und MAT_024 sowie den Experimenten der Scherzugversuche mit Fehlerbalken. Konturplot (rechts) zeigt die Hauptdehnungen der Simulation bei Versagen des quasistatischen Versuchs.

Die experimentellen Ergebnisse der Scherzuguntersuchungen sowie die Ergebnisse der Simulation sind in Bild 15 dargestellt. Die dynamischen Versagensdehnungen konnten sehr gut abgebildet werden. Eine Änderung der Anfangssteigung mit der Dehnrage ist bei den Scherzugversuchen nicht zu erkennen. Daher überschätzt die visko-elastische Modellierung der

UMAT die dynamischen Schersteifigkeiten im Gegensatz zur elastisch-plastischen von MAT_024.

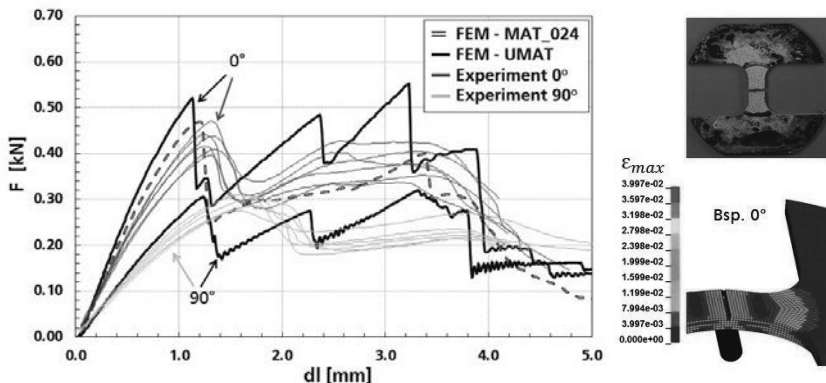


Bild 16: Vergleich zwischen den Simulationen der Userroutine (UMAT) in 0° und 90° zur Fließrichtung, dem isotropen Materialmodell (MAT_024) und den Experimenten der quasi-statischen taillierten Durchstoßversuche. Konturplot (rechts) zeigt die Hauptdehnungen bei Versagen der Simulation mit der UMAT des 0°-Versuchs.

Für eine erste Validierung wird der taillierte Durchstoßversuch nachsimuliert. Die Simulationsergebnisse (Bild 16) bei Verwendung des anisotropen Materialmodells (UMAT) zeigen zwar leicht spröderes Versagen jedoch eine gute Abbildung der Anisotropie. Bei Verwendung des isotropen Materialmodells wird hier deutlich, dass die gewählte mittlere Steifigkeit aus den Zugversuchen eine zu steife Approximation war und letztlich im taillierten Durchstoßversuch dem Kraft-Weg-Verlauf der Versuche 0° zur Fließrichtung gleichen.

6. Validierung der Methode am Bauteilversuch

Zur Validierung der Methode wird ein Airbaggehäuse der Autoliv B.V. & Co. KG in einer Fallgewichtsanlage unter crashartiger Belastung geprüft. Die eingesetzte Prüfmaschine für die Versuchsreihe ist eine Fallgewichtsanlage des Unternehmens DYNATUP vom Typ 8100SA. Bild 17 zeigt das CAD-Modell der konstruktiven Ausarbeitung der Einspannvorrichtung mit eingespanntem Airbaggehäuse. Diese Lösungsvariante wurde aufgrund ihres einfachen Aufbaus und der hohen Variabilität ausgewählt.

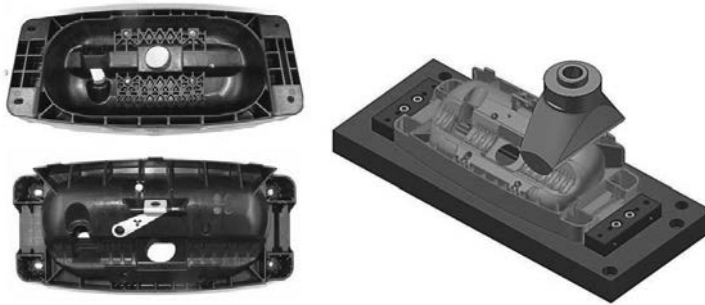


Bild 17: Airbaggehäuse mit Außenansicht (links oben) und Innenansicht (links unten) sowie die konstruktive Ausarbeitung der Einspannvorrichtung zum Bauteilversuch mit eingespanntem Bauteil und Stempel des Fallturms.

6.1 Formfüllsimulation auf Bauteilebene

Zur Füllsimulation des Demonstratorbauteils, also des Airbaggehäuses, wurden die gleichen Materialdatenspezifikationen verwendet wie für die Sabic Probenplatten, da das gleiche Material benutzt wurde. Entsprechend wurden keinerlei Veränderungen oder Anpassungen an den vorab bestimmten Modellparametern gemacht. Die Füllzeit für das Airbaggehäuse beträgt 3,6 s, das Material ist auf 250°C aufgeschmolzen und die Form wurde auf 40°C temperiert.



Bild 18: A_{xx} Komponente des Faserorientierungstensors nach der Füllung des Airbaggehäuses.

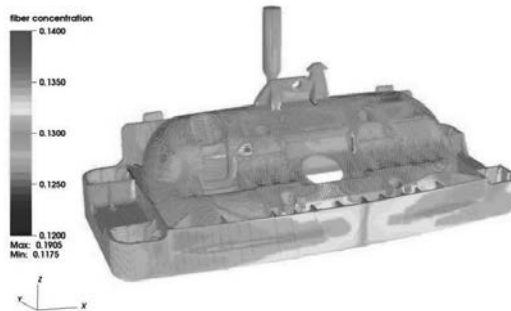


Bild 19: Faserkonzentrationsverteilung nach der Füllung des Airbaggehäuses.

An vorab definierten kritischen Stellen wurden am realen gespritzten Bauteil zwei Probekörper entnommen und μ CT-Tomographien erstellt und analysiert. Die Stelle F liegt nahe der Position des Aufpralls beim Fallturmversuch, die Position G liegt in einer komplexen Verripungsstelle. Genau wie bei den Probenplatten wurde auch hier über die Bauteildicke die Faserorientierung ausgewertet. Die folgenden Abbildungen zeigen die Vergleiche der lokalen Faserorientierungen für die beiden Probekörper F und G.

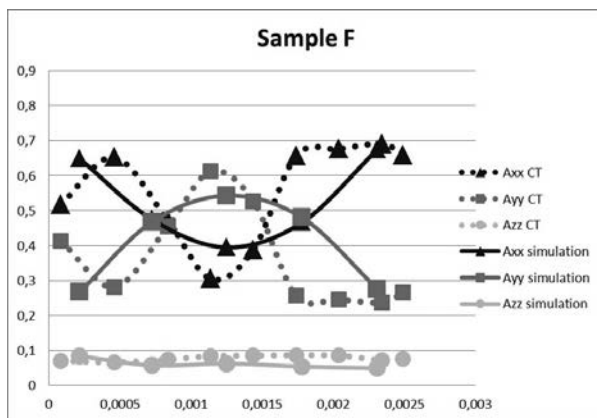


Bild 20: Vergleich der Faserorientierungskomponenten von μ CT-Aufnahmen und Berechnungen im Airbaggehäuse an der Probenstelle F.

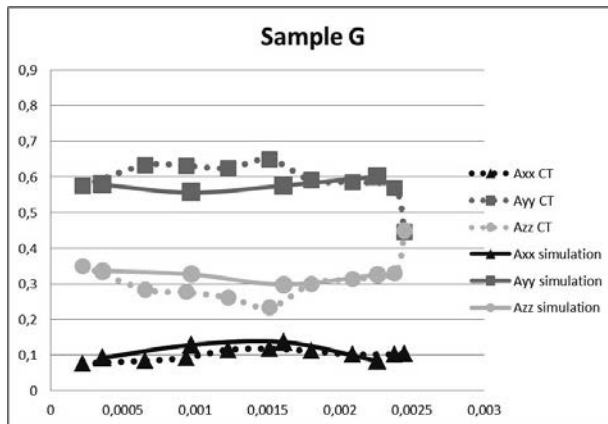


Bild 21: Vergleich der Faserorientierungskomponenten von μ CT-Aufnahmen und Berechnungen im Airbaggehäuse an der Probenstelle G.

6.2 Datenmapping

Für die strukturmekanischen Berechnungen am IWM wurden die Faserorientierungs- und Faserkonzentrationsdaten auf die Berechnungsnetze für die Crashberechnung gemappt. Das vom ITWM entwickelte C++-Programm *FOMapper* bildet den lokalen Faservolumenanteil und die lokale Faserorientierung, die mit der Prozess-Simulations-Software CoRheoS berechnet werden, auf das Finite-Element-Netz (LS-DYNA) ab, das zur Strukturanalyse (mit einem lokal veränderlichen anisotropen Werkstoffmodell) verwendet wird. Das Prozess-Simulations-Netz (CoRheoS) ist ein strukturiertes Netz bestehend aus rechtwinkligen Hexaedern (Brick-Elemente). Das Strukturanalyse-Netz (LS-DYNA) ist ein randangepasstes unstrukturiertes Netz, das aus Schalenelementen oder 3D Kontinuumelementen bestehen kann. Es wird der Fall betrachtet, dass das Gebiet, das das Strukturanalyse-Netz definiert, eine Teilmenge des Gebiets ist, das durch das Prozess-Simulations-Netz beschrieben wird. Sollten jedoch Knoten des Strukturanalyse-Netzes außerhalb des Gebietes der Prozesssimulation liegen, wird ein Extrapolationsverfahren angewandt, das sinnvolle Werte diesen Knoten zuweist.

6.3 Crashsimulation

Für die Crashsimulation des Airbaggehäuses werden FEM-Modelle mit drei unterschiedlichen Diskretisierungen (Bild 16) erstellt. Dabei wird erwartet, dass bei einer sehr feinen ge-

nauen Diskretisierung mit Tetraeder-Elementen die lokalen Heterogenitäten am besten berücksichtigt werden können und somit das beste Simulationsergebnis erzielt wird.

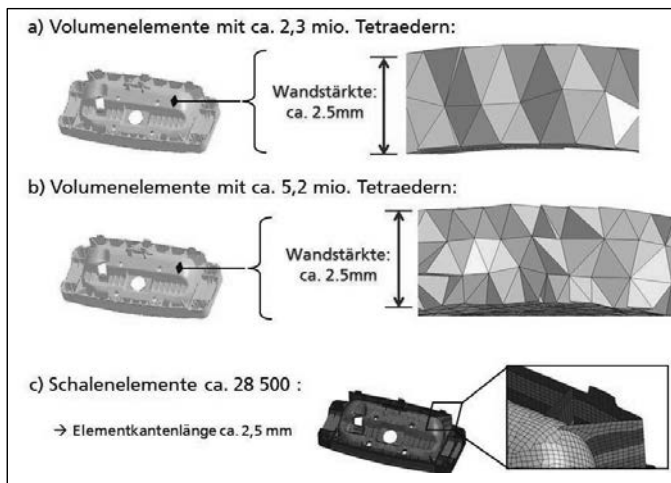


Bild 22: Diskretisierung der FEM-Modelle des Bauteils. Unterintegrierte lineare Tetraeder-Volumenelemente (a und b). Voll integrierte lineare Schalenelemente mit 7x4 Integrationspunkten (c).

Ein gröberes zweites Tetraeder-Netz vereinfacht nicht nur die Geometrie, es stehen zudem weniger lokale Informationen aus der Spritzgussimulation zur Verfügung. Somit wird zum Beispiel die Faserorientierungsverteilung über die Dicke auf lediglich zwei Elementen gemittelt. Ein Schalenmodell, wie es in der Crashsimulation am häufigsten zur Anwendung kommt, wird ebenfalls mit beiden Materialmodellen simuliert. Auch wenn hierbei die Faserorientierungsverteilung über 7 Gauß-Punkte in Dickenrichtung und 4 in der Schalenebene recht gut aufgelöst wird, ist die Geometrie nur noch sehr vereinfacht dargestellt.

Das entwickelte Materialmodell (UMAT), das die lokalen Unterschiede in den Steifigkeiten und Festigkeiten aufgrund der Faserorientierungsverteilung berücksichtigt zeigt in der Simulation eine bessere Übereinstimmung in der Crash-Energieaufnahme im Vergleich zu dem isotropen Materialmodell (MAT_024) (Bild 23). Lediglich wird bei Rissinitiation die Kraft leicht überschätzt. Auch die Anfangssteigung in dem simulierten Kraftwegsignal ist mit dem Usermaterialmodell leicht steiler als in den Experimenten.

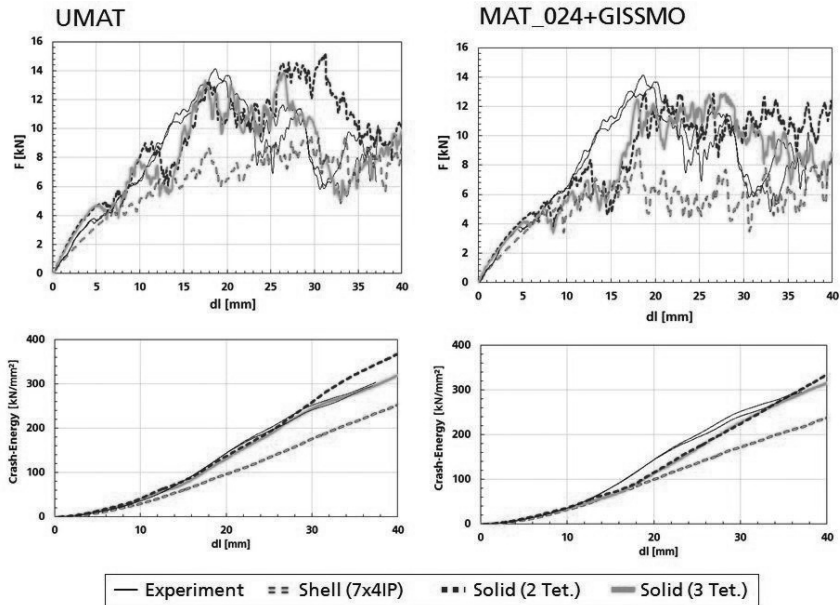


Bild 23: Oben: Kraft-Weg-Kurven aus den Simulationen der 3 FEM-Modelle mit dem entwickelten anisotropen Materialmodell und Berücksichtigung der Faserorientierungsverteilung (links) und dem isotropen Materialmodell (rechts) verglichen mit den experimentellen Versuchen. Unten: Integral der Kraft-Weg-Kurven zum Vergleich der Crash-Energie-Aufnahme.

Grundsätzlich zeigen alle Simulationsergebnisse akzeptable Übereinstimmungen mit den Experimenten. Die vergleichsweise guten Ergebnisse des isotropen Materialmodells sind auf die Anpassung im oberen Festigkeitsbereich der Orientierungsabhängigen Streuung des Werkstoffs zurückzuführen und wurden am Beispiel des taillierten Durchstoß Versuchs bereits diskutiert. Die Problematik in dieser isotropen Anpassung ist die Überschätzung der Bauteilfestigkeit an Stellen des Bauteils, wo die Fasern 90° zur Belastung liegen und nicht mehr zur Festigkeit beitragen also lediglich das Matrixmaterial die Werkstoffeigenschaften beschreibt. Auch wenn die Simulationen der Bauteilversuche mit dem isotropen Materialmodell vergleichsweise gute Übereinstimmungen mit den Experimenten zeigen, bleibt offen, ob nicht andere Lastfälle ein deutlich schlechteres Ergebnis liefern und die Kraft in der Simulation mit dem kalibrierten isotropen Materialmodell überschätzt wird. Somit würde auch die

Crash-Energie-Aufnahme überschätzt werden. Für eine Bauteilauslegung wäre dieses Ergebnis nicht akzeptabel.

7. Zusammenfassung

Im Vorhaben konnten die notwendigen modelltechnischen Erweiterungen für eine Spritzgusssimulation von LFT gemacht werden. Um die wesentlichen Effekte beim LFT-Spritzguss abzubilden, wurde eine konsistente Formulierung der gekoppelten Füllsimulation mit der Faserorientierungsdynamik und der Konzentrationsverteilung implementiert. Für dieses System konnte darüber hinaus der wesentliche Modellparameter, nämlich die Rheologie, also das verallgemeinerte Viskositätsgesetz, das neben der üblichen Temperatur- und Scherratenabhängigkeit auch über den Faserorientierungstensor und die Faserkonzentration abhängt, analytisch ermittelt werden. Die prototypische Implementierung des Modells in CoRheoS konnte u.a. anhand von lokalen Tomographieaufnahmen validiert werden. Die Komplexität des voll gekoppelten Systems und der damit verbundene Aufwand bei der Berechnung kann gegebenenfalls durch eine geeignete Entkopplung von Füllsimulation, Faserkonzentration und Faserorientierung in zukünftigen Arbeiten untersucht werden. Für das konsistente und robuste Mapping der erweiterten Ergebnisdaten (lokale Faserkonzentration und Faserorientierungstensor) auf verschiedene FE-Gitter zur nachfolgenden Crashsimulation wurde eine Mappingprozedur entwickelt und realisiert. Es wurde ein Materialmodell entwickelt und im FE-Code LS-DYNA implementiert, das die lokalen Faserorientierungsverteilungen und Faser-volumenkonzentrationen berücksichtigt. Die durchgeführten Materialcharakterisierungsversuche unterschiedlicher Belastungsarten und bei verschiedenen crashrelevanten Dehnraten wurden mit diesem Usermaterialmodell erfolgreich nachsimuliert. Alle Probensimulationen konnten mit dem entwickelten Materialmodell besser abgebildet werden als mit einem isotropen Materialmodell. In den Simulationen des Bauteilcrashes zeigten sich nur geringe Unterschiede zwischen dem isotropen Materialmodell und dem entwickelten anisotropen Usermaterialmodell, was auf eine ungeeignete Mittelung der anisotropen Kennwerte zurückzuführen ist. Das isotrope Materialmodell überschätzt die Festigkeiten einer Belastung unter 90° zur Faserorientierung erheblich. Das komplexe Schädigungsverhalten des Werkstoffes konnte in diesem Projekt nur ansatzweise verstanden werden. Die Modellierung basierte dabei auf umfangreichen experimentellen Untersuchungen, die vor allem auf das Crashverhalten des Werkstoffes fokussiert sind. Neben den ermittelten dehnratenabhängigen Kennwerten, ergaben die Untersuchungen, vor allem durch den Einsatz der Hochgeschwindigkeits-Infrarotmessung deutliche Hinweise auf unterschiedliches Schädigungsverhalten bei veränderter Mehrachsigkeit und Dehnrate. Weitere Untersuchungen des Schädigungsverhal-

tens unter crashartiger Belastung sind notwendig um die Schädigungsparameter des Materialmodells adäquat anzupassen und damit multiaxiale Spannungszustände und komplexe Geometrien gut zu prognostizieren.

9. Förderhinweis und Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17334 N der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Förderung sei gedankt.

Außerdem bedanken wir uns für die unterstützenden Sach- und Dienstleistungen, sowie die interessante Diskussionen und Anregungen aus dem projektbegleitenden Ausschuss, dessen Firmen im Folgenden aufgeführt sind:

Adam Opel AG	Dr. Ing h.c. F. Porsche AG	Robert Bosch GmbH
Altair Engineering GmbH	Dynamore GmbH	Roof Systems Germany GmbH
AUDI AG	Faurecia	SABIC
Autodesk	Ford-Werke GmbH	SIGMA Engineering GmbH
Autoliv B.V. & Co. KG	GNS mbh	SimpaTec GmbH
Behr GmbH & Co. KG	Johnson Controls GmbH	TRW Automotive GmbH
Celanese Engineered Materials	Key Safety Systems Deutschland GmbH	Volkswagen AG
Daimler AG	MAGMA Gießereitechnologie GmbH	Zegla-plast
		4a Engineering GmbH

10. Literatur

- [1] NEITZEL, M.: Handbuch Verbundwerkstoffe, 2004 — ISBN 3446220410
- [2] LATZ; STRAUTINS; NIEDZIELA: Journal of non-Newtonian fluid mechanics 165 (2010), Nr.13-14, S.764-781.
- [3] PHILLIPS, A.: Physics of Fluids A 4 (1), 1992
- [4] BUCK, F.; BRYLKA, B.; MÜLLER, V.; MÜLLER, T.; WEIDENMANN, K.; HRYMAK, A. N.; HENNING, F.; BÖHLKE, T.: Two-scale structural mechanical modeling of long fiber reinforced thermoplastics. In: Composites Science and Technology Vol. 117 (2015), S. 159–167
- [5] MORI, T.; TANAKA, K.: Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. In: Acta metallurgica Vol. 21 (1973), Nr. 5, S. 571–574
- [6] ADVANI, S. G.; TUCKER, C. L.: The Use of Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites. In: Journal of Rheology Vol. 31 (1987), Nr. 8, S. 751–784
- [7] DASARI, A.; MISRA, R.: On the strain rate sensitivity of high density polyethylene and polypropylenes. In: Materials Science and Engineering A Vol. 358 (2003), S. 356–371
- [8] MORTAZAVIAN, S.; FATEMI, A.: Effects of fiber orientation and anisotropy on tensile strength and elastic modulus of short fiber reinforced polymer composites. In: Composites Part B Eng. Vol. 72 (2015), S. 116–129
- [9] ALCOCK, B.; CABRERA, N. O.; BARKOULA, N. M.; REYNOLDS, C. T.; GOVAERT, L. E.; PEIJS, T.: The effect of temperature and strain rate on the mechanical properties of highly oriented polypropylene tapes and all-polypropylene composites. In: Composites Science and Technology Vol. 67 (2007), S. 2061–2070 — ISBN 0266-3538
- [10] FITOUSSI, J.; MERAGHNI, F.; JENDLI, Z.; HUG, G.; BAPTISTE, D.: Experimental methodology for high strain-rates tensile behavior analysis of polymer matrix composites. In: Composites Science and Technology Vol. 65 (2005), S. 2174–2188 — ISBN 0266-3538
- [11] FRITSCH, J.: Charakterisierung und Modellierung eines glasfaserverstärkter Thermoplaste unter dynamischen Lasten: Fraunhofer Verlag, 2012 — ISBN 978-3-8396-0333-8
- [12] KANDER, R.G.; SIEGMANN, A.: The Effect of Strain Rate on Damage Mechanisms in a Glass/Polypropylene Composite. In: Journal of Composite Materials Vol. 26 (1992), Nr. 10, S. 1455–1473
- [13] CINTRA, J.S.; TUCKER, C.L.: Orthotropic Closure Approximations for Flow-Induced Fiber Orientation. Journal of Rheology, Vol. 39 (6) S. 1095-1122, 1995

- [14] SMITH, D.E.; MONTGOMERY-SMITH, S.; Jack, D.: Modeling Orientational Diffusion in Short Fiber Composite Processing Simulations", Proceedings of 2009 NSF CMMI Research and Innovation Conference, Honolulu, HI
- [15] MA; GRAHAM: Physics of Fluid 17 (2005)
- [16] KROCHAK; OLSEN, MARTINEZ: J. Fluid. Mech. Vol. 653 (2010)
- [17] ARAVAS, N.: Finite elastoplastic transformations of transversely isotropic metals. In: International Journal of Solids and Structures Vol. 29 (1992), S. 2137–2157
- [18] MURAKAMI, S.: Continuum Damage Mechanics. Heidelberg, London, New York: Springer, 2012 — ISBN 9781118097298
- [19] SUN, D.-Z.; SCHULENBERG, L.; LIENHARD, J.; HUBERT, F.; STEINER, K.; NIEDZIELA, D.; Shklyar, I.: Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von Langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation. IGF-Vorhaben 17334 N Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), (2015)

Neuentwicklung SCR-Tank-Systeme: Werkstoffe, Funktionen, Prozesse

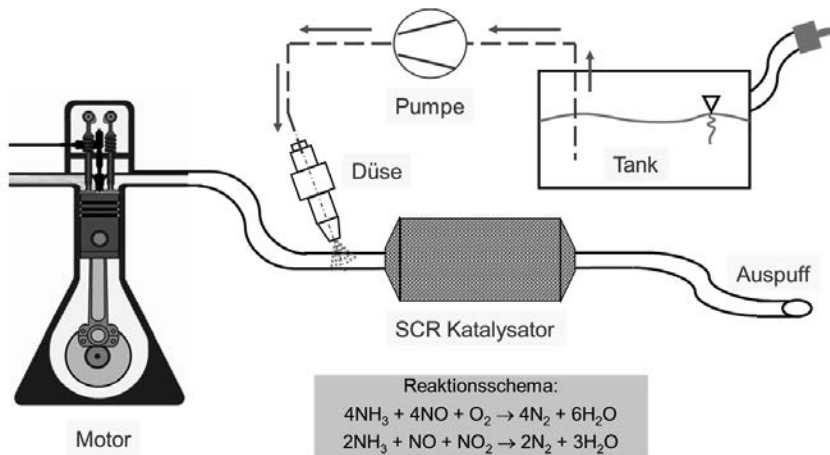
Dipl.-Ing. **T. Rösch**, Veritas AG, Gelnhausen;
Dipl.-Ing. **U. Remmele**, Daimler AG, Sindelfingen

Kurzfassung

Auf dem Weg zur Verringerung der Emission von Verbrennungsmotoren, speziell Dieselmotoren, kommen verstärkt spritzgegossene Kunststofftanks zur Speicherung der Harnstofflösung zum Einsatz.

Dieser Vortrag beinhaltet die aktuellen Gesetzesvorgaben, das Anforderungsprofil an den Tank und die Werkstoffauswahl, sowie die Vorstellung des generellen Fertigungsverfahrens. Weiterhin werden konstruktive Lösungen der SCR-Tanksysteme und die eingesetzten Prüfungen und Validierung erörtert.

1. Funktionsprinzip des SCR-Systems



Quelle: Veritas

Bild 1: Funktionsprinzip SCR-Technologie

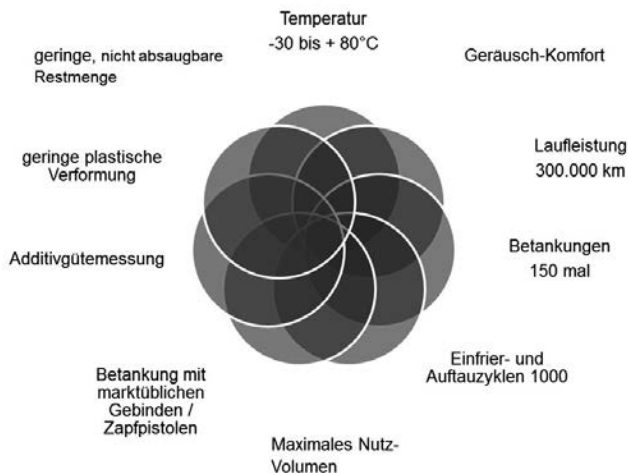
2. Anforderungen



Abgasgrenzwerte Dieselmotor	EURO 4 ab 01.01.2006	EURO 5 ab 01.01.2011	EURO 6 ab 01.09.2015
Kohlenmonoxid (CO)	0,5 g/km	0,5/0,45 g/km*	0,5 g/km
Kohlenwasserstoffe und Stickoxide (HC + NO _x)	0,3 g/km	0,23 g/km	0,17 g/km
Stickoxide (NO _x)	0,25 g/km	0,18 g/km	0,08 g/km
Rußpartikel (PM)	0,025 g/km	0,005 g/km	0,005 g/km

Quelle: Daimler

Bild 2: Gesetzesanforderungen an die Emission



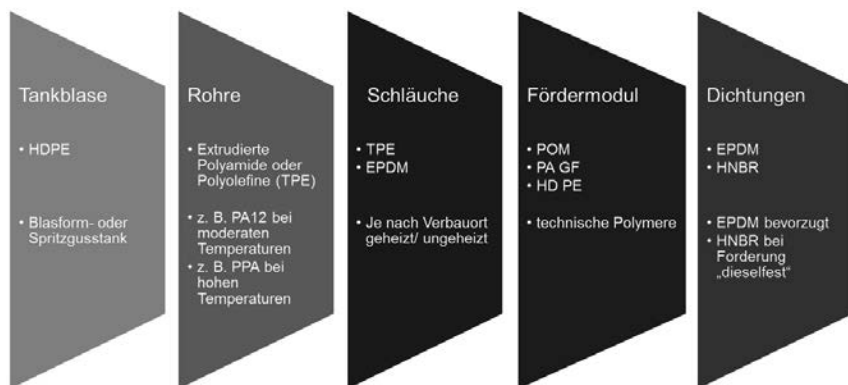
Quelle: Daimler

Bild 3: Anforderungsprofil an den SCR-Tank



Quelle: Daimler

Bild 4: Anforderungsprofil an die Polymere im SCR-System



Quelle: Daimler

Bild 5: Eingesetzte Polymere

3. Konstruktive Auslegung

- Genaue Einhaltung der Wandstärke gemäß Konstruktions-Vorgaben
- Effizienter Material-Einsatz durch gezielt versteifende Maßnahmen
- Max. Volumen durch optimale Ausnutzung des möglichen Bauraums
- Integration von Konstruktions-Elemente und zusätzlichen Funktionen
- Einfache Montage von Komponenten in die offenen Schalen
- Reduktion von Prozess-Schritten
- Gewicht- und Kosten-Ersparnis

Bild 6: Vorteile der Spritzguss-Technologie

4. Herstellprozess



Bild 7: Darstellung der Prozessschritte der Tankfertigung



Quelle: Veritas

Bild 8: Spritz-gegossenes SCR-Tank-System

5. Prüfungen und Validierung

- Validierung der Prozesse
 - Mikrotom-Schnitte der Schweißnaht
 - Computertomografie der Schweißnaht
 - Zugprüfung der Schweißnaht
 - Dichtheitsprüfungen im Helium-Prüfstand

- Funktionale Prüfungen
 - Betankungs-Versuche
 - Berstdruck- und Robustheits-Tests
 - Schwapp-Versuche

6. Zusammenfassung

Der Bedarf an SCR-Systemen wird aufgrund steigender Emissionsanforderungen in den nächsten Jahren stark zunehmen

Die Materialauswahl erfordert eine ausgewogene Berücksichtigung von:

- funktionalen Anforderungen an das Produkt
- chemischen Beständigkeiten und Verträglichkeiten
- guter und sicherer Verarbeitbarkeit im angestrebten Serienprozess

Die Spritzguss-Technologie bietet deutliche Vorteile hinsichtlich einer rationellen Fertigung und ermöglicht die Integration zusätzlicher Funktionen für ein wertigeres Produkt

Die Einführung neuer Fertigungs-Technologien bedingen ebenso die Entwicklung bzw. Erweiterung von Test- & Validierungs-Methoden

Leistungsfähige System-Lieferanten minimieren die Schnittstellen in einem Fahrzeug-Projekt und ermöglichen funktional optimal abgestimmte Systeme

Eine gemeinsame Entwicklung zwischen Fahrzeughersteller und System-Lieferanten ist bei der Einführung neuer Produkte und Technologien hilfreich

Erstes Kunststoff-Ölwannenmodul im 911-Carrera – Leichtbau und System-Integration

Dipl.-Ing. (FH) **J. Soares**,
Polytec Group, Lohne;
Dipl.-Ing. **A. Misala**,
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach

Kurzfassung

Hinsichtlich Performance und Effizienz sind bei der Entwicklung der neuen Sechs-Zylinder-Boxermotoren des Porsche 911 Carrera die Ziele hoch gesteckt. In enger Zusammenarbeit zwischen Porsche und Polytec Plastics ist ein intelligentes Ölwannenmodul aus Kunststoff entwickelt worden, das den spezifischen Anforderungen an die neue Motorengeneration vollumfänglich gerecht wird.

1. Einleitung

Ölwannen aus Kunststoff eröffnen vielfältige Möglichkeiten zur Integration funktionaler Elemente, die bisher nur durch einen wesentlich höheren Aufwand möglich waren. Gegenüber den Ausführungen aus Aluminium kann das Gewicht deutlich gesenkt werden. Des Weiteren lassen sich durch die Einführung effizienterer Fertigungsprozesse wirtschaftliche Potenziale heben. Kunststoff ist hierbei die erste Wahl.

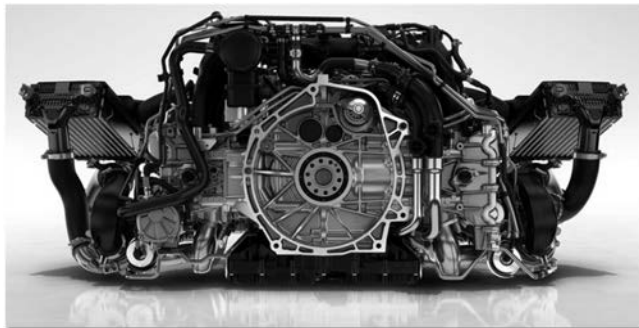


Bild 1: Der neue 3,0-l-Turbomotor, des Porsche 911 Carrera

2. Porsche 911 Carrera – Ölwanne

Das Ölwanne­modul für den neuen Sechs-Zylinder-Boxermotor von Porsche besteht im Prinzip aus einem Ober- und Unterteil aus Polyamid 6 mit 30 Prozent Glasfaseranteil.

Die zweiteilige Ausführung wird durch die besondere Bauform des Motors notwendig. Mit den waagerechten, gegenüberliegenden Zylindern erfordert dieses Motorprinzip eine vergleichsweise flache Ölwanne mit stark ausgeprägten, in Querrichtung angebrachten seitlichen Ausbuchtungen, um eine möglichst hohe Ölmenge unterzubringen.



Bild 2: Explosionsdarstellung des Ölwanne­moduls, bestehend aus einem Ölwanne­oberteil einschließlich des Leitungsträgers und dem Ölwanne­unterteil.

Ein so genannter Leitungsträger wird mit dem Ölwanne­oberteil mittels selbstschneidender Schrauben verbunden. Durch Heißgasverschweißung der beiden Hälften des Leitungsträgers werden verschiedene Funktionen abgebildet. Hierzu gehören die Ölrücklaufleitungen (1) für die beiden Turbolader an die besondere Anforderungen hinsichtlich Dichtheit gestellt werden.

Die Ölpumpe saugt ebenfalls das Öl aus den Zylinderköpfen ab. Da zusätzlich zum Öl dabei auch Luft angesogen wird, muss dieses weitgehend entschäumt dem Öl­kreislauf zugeführt werden. Hierbei bedient man sich daher des Prinzips der Fliehkraftabscheidung (2). Im Zusammenbau des Ölwanne­oberteils mit dem Leitungsträger wurden hierzu zwei zylindrische Öl-Luft-Abscheider (Pos.2 im Bild 3 und Detail im Bild 4) abgebildet in die das Gemisch eingeleitet wird.

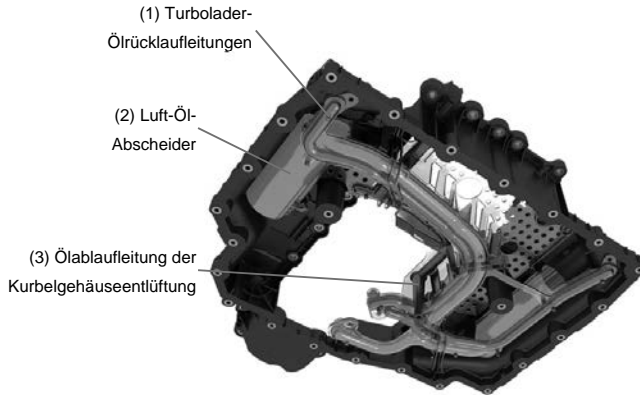


Bild 3: Ölwannenoberteil mit der Darstellung der drei Hauptfunktionen des integrierten Leitungsträgers.

Als drittes Leitungselement wurde der Ölrücklaufkanal aus der Kurbelgehäuseentlüftung im Leitungsträger integriert (Pos. 3 im Bild 3).

Die zugrundeliegende Geometrie des Leitungsträgers besteht aus einer gelochten Ebene, die als Ölabweisfläche (Ölabweiser) fungiert.



Bild 4: Zentrifugalabscheidung im Leitungsträger zur Trennung des Luft-Öl-Gemischs

Um sicherzustellen, dass unter allen fahrdynamischen Zuständen kontinuierlich Öl aus der Ölwannenmitte angesogen wird, befinden sich im Ölwannenunterteil Schwallwände in kreuzförmiger Anordnung.

2.2. System-Integration im Vergleich zu Aluminium – Ausführung

Unter System-Integration ist hier die Zusammenfassung von Subsystemen zu einem übergeordneten Gesamtsystem zu verstehen. Folgende Aspekte am Ölwanne-Modul aus Kunststoff ermöglichen diese Integration:

- Die Verwendung eines einheitlichen Werkstoffs.
- Der Einsatz von Fertigungsverfahren mit höherem Freiheitsgrad bzgl. Formgebung (Heißgasschweißen).
- Eine herstellungsgerechte Gestaltung beziehungsweise Anordnung der Funktionselemente.
- Die Vereinfachung der Schnittstellen hinsichtlich einer günstigen Endmontage der Ölwanne.

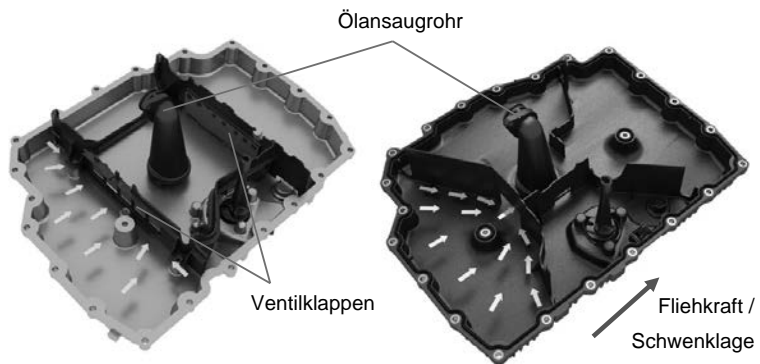


Bild 5: Darstellung der Schottkastenfunktion Aluminium-Wanne (links) und Kunststoff-Wanne (rechts)

Während in der Aluminium-Ölwanne der Schottkasten aus Kunststoff als zusätzlich montiertes Bauteil abgebildet wurde, kann dieser nun vollständig im Wannenunterteil integriert werden. Hierdurch entfallen die zuvor verwendete Dichtung zwischen Schottkasten und Wanne und die Ventilkappen, wodurch ein kostengünstiges und robustes System entsteht. Durch die Integration des Schottkastens in das Ölwanne-Unterteil ergeben sich größere Gestaltungsfreiheiten. Dadurch konnte die geforderte Funktionalität bei wesentlich einfacherem konstruktivem Aufwand dargestellt werden (Bild 5).

Durch die oben beschriebene Zusammenführung des Ölabweisers, des Luft-Öl-Abscheiders und der Turbolader-Rücklaufleitungen wird in der Kunststoff-Ölwanne der Leitungsträger abgebildet.

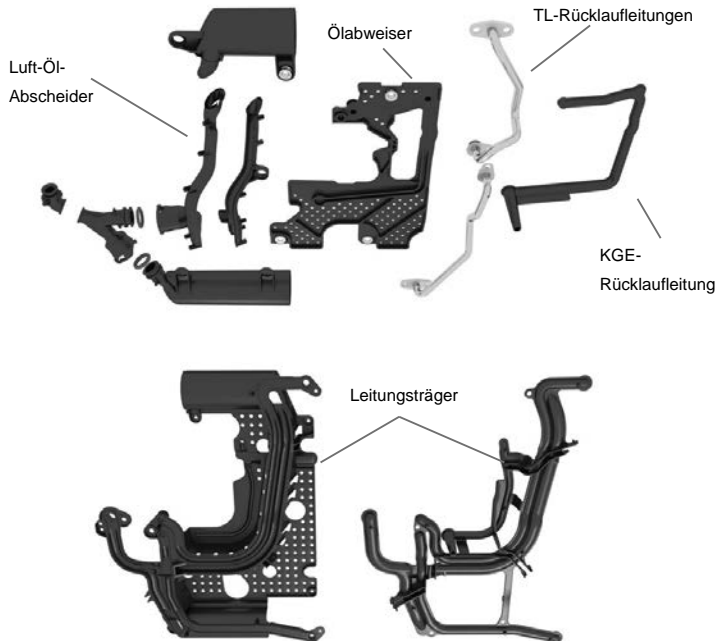


Bild 6: Darstellung der notwendigen Bauteile zur Abbildung der Funktionselemente, die im Leitungsträger integriert werden (oben: Aluminium-Ölwanne, unten: Kunststoff-Ölwanne)

In der Aluminiumausführung fand am Ölabweiser bereits die Integration der Ölrücklaufleitungen aus dem Kurbelgehäuse statt. Der Luft-Öl-Abscheider wurde dabei aus sechs einzelnen Kunststoffteilen hergestellt. Die Turbolader-Rücklaufleitungen waren separate Stahlrohre mit entsprechenden Anschlüssen an beiden Enden. Durch eine montagegerechte Ausrichtung der Anschlussgeometrie an der Ölpumpe beziehungsweise am Ölwannenoberteil und durch Optimierung der Leitungsverläufe konnte diese System-Integration fertigungsgerecht sichergestellt werden bei gleichzeitiger Erfüllung aller Funktionsanforderungen.

2.3. Gegenüberstellung der Gewichtsanteile

Zu Projektbeginn wurde die Zielvereinbarung getroffen das Bauteilgewicht der zu entwickelnden Ölwanne gegenüber dem Vorgängermodell um mindestens zwei Kilogramm zu reduzieren. Das größte Potenzial haben hier die beiden Außenschalen der Ölwanne. Durch den Einsatz von Kunststoff konnte deren Gewicht auf 1,3 Kilogramm beim Unterteil und 1,8 Kilogramm beim Oberteil reduziert werden.

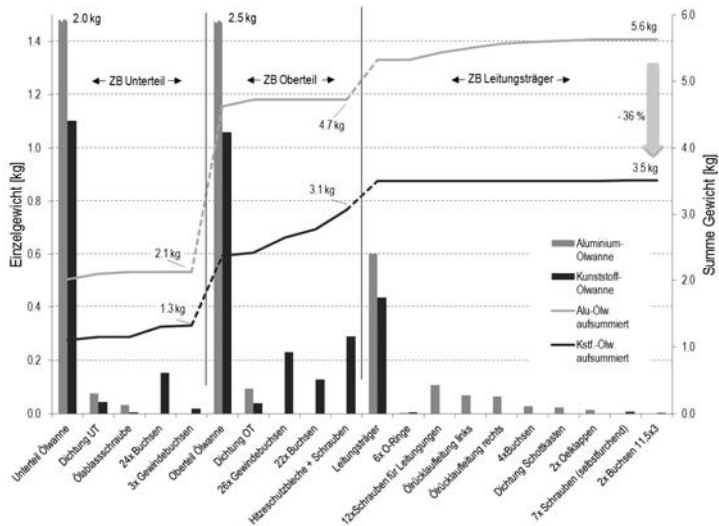


Bild 7: Darstellung der Einzelgewichte der verschiedenen Funktionselemente und die Summendarstellung.

Neben der reinen Gewichtsreduzierung durch die Verwendung von PA6 GF30 wurde zusätzlich die Wandstärke der Bauteile optimiert. Bei der Kunststoffwanne beträgt diese 2,5 Millimeter. Trotz der Erhöhung des Gewichts durch die Verstärkungsrippen zur Verbesserung der akustischen und mechanischen Eigenschaften ergibt sich in Summe eine zusätzliche Gewichtsreduzierung von 0,22 Kilogramm am Unterteil und 0,4 Kilogramm am Oberteil.

Für die Verbindung der Ölwanne zum Kurbelgehäuse und zwischen dem Ober- und Unterteil werden herkömmliche Stahlschrauben eingesetzt. Am Ölwannenoberteil müssen daher zur Kurbelgehäuse-Flanschseite 22 Hülsen und auf der Unterseite 26 Gewindebuchsen eingesetzt werden um einen stabilen Schraubverband der Bauteile zu gewährleisten. Zusammen

mit den links- und rechtsseitigen Wärmeschutzblechen ergibt sich hierdurch eine Gewichtserhöhung von circa 0,65 Kilogramm, um eine vergleichbare Funktion wie die der Aluminiumwanne zu erhalten.

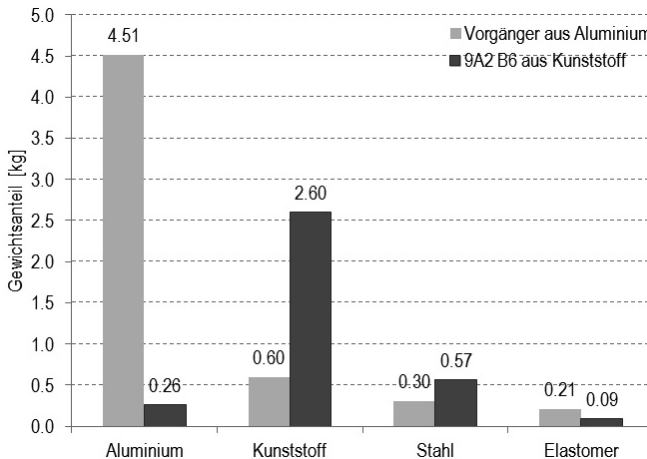


Bild 8: Materialbezogene, vergleichende Darstellung der Gewichtsanteile.

Zieht man das Volumen der Buchsen und der Gewinde-Inserts vom Aluminium-Oberteil ab, reduziert sich das Gewicht des Oberteils jedoch von 2,38 Kilogramm auf 1,06 Kilogramm (nur Aluminium, beziehungsweise nur Kunststoff). Auch hier zeigt sich somit, dass trotz des notwendigen Einsatzes funktionssichernder Mittel in der Bilanz noch immer eine massive Gewichtseinsparung umgesetzt wird.

Ein weiteres Mittel stellt ebenfalls die Funktions-Integration dar. Am Leitungsträger wurde neben dem Materialwechsel an den Turbolader-Rücklaufleitungen, die Schraubenanzahl reduziert beziehungsweise die Schraubenart geändert. Während zuvor zwölf Schrauben für die Befestigung aller Teile notwendig waren, sind es nun sieben, wobei größtenteils deutlich leichtere, selbstschneidende Schrauben zum Einsatz kommen.

Fazit: In der Summe konnte das Gewichtsziel für die gesamte Ölwanne vollumfänglich erreicht werden.

3. Besonderheiten in der Herstellung

Eine wirtschaftliche Betrachtung zwischen dem Kunststoffspritzguss- und dem Aluminiumdruckgussverfahren muss mindestens vier wesentliche Faktoren berücksichtigen: den Roh-

stoffpreis, die Werkzeugkosten beziehungsweise deren Amortisierung, die Verarbeitungskosten und nicht zuletzt die Nachbearbeitungskosten.

Die Vorteile der Kunststoffspritzgussfertigung sind hinlänglich bekannt. Zu erwähnen ist, dass Alu-Druckgusswerkzeuge eine geringere Standzeit als Kunststoffspritzgusswerkzeuge besitzen. Dafür fallen die Werkzeugkosten für Aluminiumbauteile im allgemeinen günstiger aus und sind damit bei geringeren Stückzahlen auf den ersten Blick die vermeintlich bessere Lösung. Diese Betrachtungsweise greift allerdings zu kurz, da Kunststoffspritzguss eine bessere Funktions-Integration ermöglicht und keine zusätzliche mechanische Nachbearbeitung benötigt. Ebenfalls erwähnenswert sind die im Vergleich zur Spritzgussfertigung wesentlich höheren Energiekosten für Aluminiumbauteile. Beispielsweise kann durch den prozessbedingten Überlauf und Pressrest, der Anteil des erneut einzuschmelzenden Rücklaufmaterials je nach Produkt bis zu 70 Prozent betragen [1], eine undenkbbare Zahl in der Kunststoffspritzgussfertigung.

Die Entscheidung für den Einsatz von Kunststoff muss jedoch in der Konzeptphase getroffen werden, um die volle Leistungsfähigkeit der Kunststoff-Fertigung sicherzustellen. Die Funktionselemente müssen dabei insbesondere unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Aspekte sinnvoll eingebracht werden.

Funktionselemente können integriert, also an den Hauptkörper angeformt oder modular als separates Bauteil mit definierter Schnittstelle zum Hauptkörper gefertigt werden. Als wesentlicher Entscheidungsfaktor für die Integration kann die Komplexität eines Funktionselements genannt werden. Mit zunehmender Komplexität wachsen der Entwicklungsaufwand und die Fehlermöglichkeit in der Herstellung. Die Austauschbarkeit des Funktionselements im Servicefall oder innerhalb des Produktionsprozesses spielt auch eine wichtige Rolle.

Die Ölwanne des Porsche-Boxermotors ist unter Berücksichtigung dieser Aspekte in drei Module unterteilt. Das Ober- und Unterteil bilden die äußere Schale der Wanne. Diese Teilung muss zunächst aus entformungstechnischen Gründen erfolgen. Eine einteilige Ausführung ist aufgrund der massiven Hinterschnitte mit Hilfe der Schiebertechnik nicht möglich. Beide Bauteile werden daher durch eine herkömmliche Flanschabdichtung mittels einer I-Profilabdichtung und entsprechenden Schrauben miteinander verbunden. Eine dauerhafte Verschweißung der beiden Bauteile ist aus service- und montagetechnischen Gründen nicht sinnvoll. Außerdem ist die Anbindung der Ölwanne zum Kurbelgehäuse wesentlich kleiner als die eigentliche Ölwanne. Daher müssten bei einer einteiligen Lösung zahlreiche Freigänge für die Anschraubung von unten bis zum Kurbelgehäuseflansch eingebracht werden. Die Funktions-Integration der übrigen Komponenten wäre dann nicht möglich.

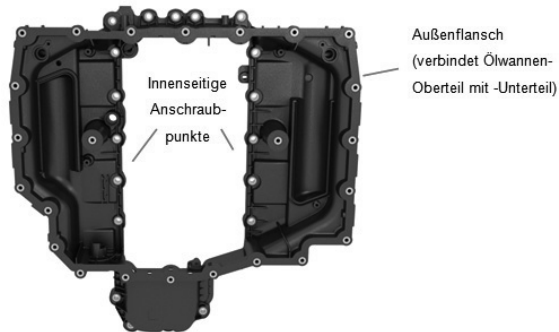


Bild 9: Darstellung des Ölwanneoberteils von unten.

Die Leitungen im Leitungsträger sind so angeordnet, dass eine zweiteilige, zweischalige Fertigung des Trägers möglich ist, siehe Bild 6. Der Leitungsträger wird anschließend mittels selbstfurchender Schrauben mit dem Ölwanneoberteil verbunden, wobei an den Schnittstellen der Leitungen zum Oberteil O-Ringe zur Abdichtung eingesetzt werden. Der Aufbau ist also modular beziehungsweise austauschbar.

Im Falle einer nicht dichten Verschweißung des Leitungsträgers reduzieren sich hierdurch die Ausschusskosten. Der Träger wird ausgebaut und das Ölwanneoberteil mit den umspritzten 48 Buchsen wiederverwendet.



Bild 10: links: Rundschartisch für die Buchsenaufnahme; mittig und rechts: Bestückungs- und Entnahmehandling düsen- und auswerferseitig.

Alle Buchsen der Ölwanne werden im Werkzeug eingelegt und umspritzt. Hierzu wurde ein um 360 Grad drehbares Bestückungs- und Entnahme-Handling erstellt, das alle Buchsen düsen- und auswerferseitig über einen Rundschartisch aufnimmt, Bild 10. Die Bestückung

des Rundtisches mit drei Aufnahmeeinheiten, erfolgt mittels zweier Roboter. Durch eine 90-Grad-Drehung des Handlings kann die Entnahme des fertigen Bauteils erfolgen.



Bild 11: halbautomatische Dichtungsmontage

Um die Dichtungsmontage für den Werker zu beschleunigen, wird die Dichtung zunächst auf eine ebene Platte vorpositioniert, in der die Dichtnut spiegelverkehrt abgebildet ist. Durch die besondere Form der Dichtung mit ihrem Flügelprofil lässt sie sich einfach in die Nut der Platte einlegen. Das Bauteil wird anschließend aufgelegt und die Dichtung von unten gleichmäßig in die Nut gepresst. Der zeitliche Vorteil im Vergleich zur klassischen Montagemethode, in der die Dichtung direkt montiert wird, zeigt sich durch die Verwendung der ebenen Fläche. Die Dichtung wird auf die Fläche grob aufgelegt und kann dann einfach durch leichtes Verschieben in die Nut fallen. Bei der klassischen Methode existiert keine Ebene. Der Werker/in muss die Dichtung immer wieder von unten ergreifen um sie dann in die Dichtung zu drücken. Das kostet Zeit.

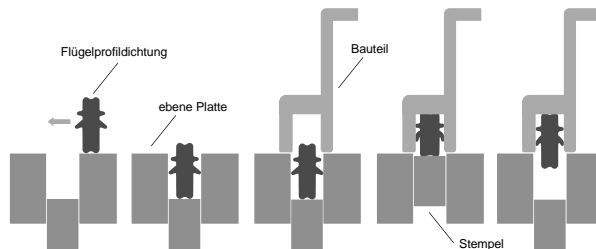


Bild 12: Von links nach rechts, die Arbeitsschritte der halbautomatischen Dichtungsmontage

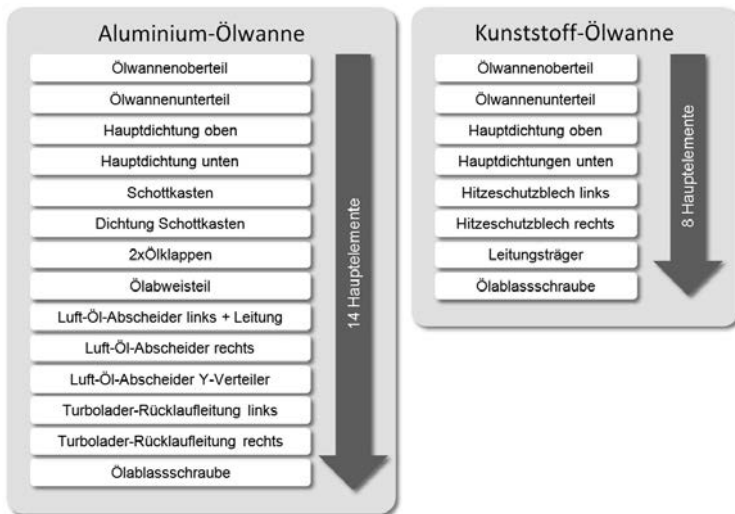


Bild 13: Anzahl der zu fertigenden Hauptelemente der Ölwanne bei den Lieferanten.

Die Vereinfachung des Herstellungsprozesses lässt sich ebenfalls an der Anzahl der notwendigen Bauteile ermitteln. Insgesamt konnte auf der Lieferantenseite die Anzahl der zu fertigenden Hauptelemente von 14 auf acht reduziert werden, Bild 13. Noch deutlicher fällt der Unterschied des Montageaufwandes am Motor auf. Während für die Aluminium-Ölwanne früher acht Montageschritte notwendig waren, sind es jetzt nur noch zwei, Bild 14.

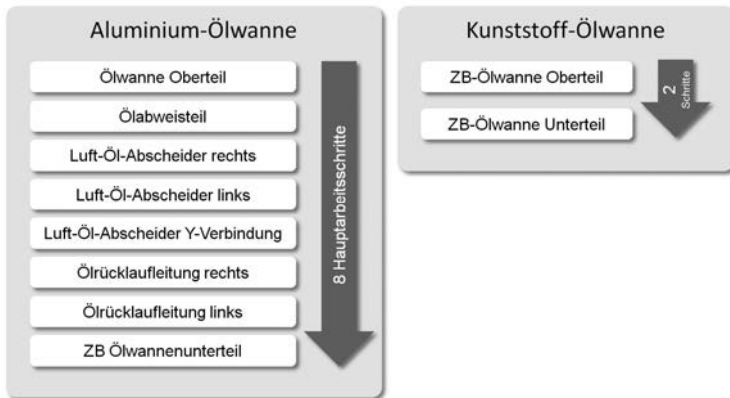


Bild 14: Anzahl der wichtigsten Arbeitsschritte in der Endmontage am Motor.

4. Simulation und Validierung

Um die Funktionalität der Ölwanne sicherzustellen, wurden bereits in der Konzeptphase umfangreiche Simulationen der verschiedenen Lastzustände durchgeführt, Bild 15. Im Vergleich zu anderen Kunststoffbauteilen im Motorraum, gibt es besonders zu berücksichtigende Lastfälle. Als Beispiel sei hier die Belastung durch Lagerung des Motors auf den Boden einer Werkstatt genannt. Die Bodenfläche musste hier gezielt unter Berücksichtigung des exzentrischen Schwerpunkts verstärkt werden.

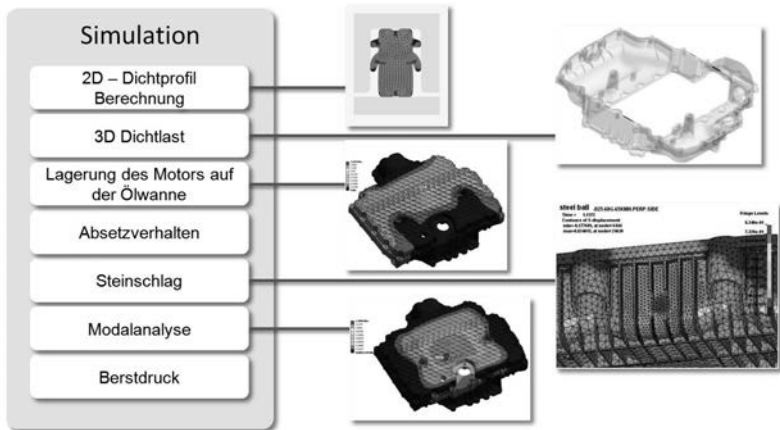


Bild 15: Kurzübersicht der Berechnung zur Auslegung der Bauteilfunktion

Bei der Auslegung der Abdichtung zwischen dem Ölwannenober- und -unterteil musste die Besonderheit berücksichtigt werden, dass im Vergleich zu einer herkömmlichen Abdichtung beide Bauteile aus Polyamid bestehen. Hierdurch ergibt sich eine deutlich nachgiebigere Struktur, besonders unter erhöhter Umgebungs- beziehungsweise Öltemperatur. Das Abdichtsystem wurde hierzu so angepasst, dass die Dichtlastkennlinie möglichst flach verläuft. Die wabenförmige Rippenstruktur auf der Unterseite stellt ein wesentliches Merkmal der Ölwanne dar. Die Simulation zeigt, dass durch diese Rippengeometrie die äußeren Kräfte und die Massenkräfte sehr gleichmäßig über die Struktur verteilt werden. Im Vergleich zu einer chaotischen Anordnung der Rippen steigt die Schallabstrahlung zwar leicht an, dennoch überwiegen die Vorteile der Wabenstruktur unter Berücksichtigung aller vorhandenen Lastfälle, siehe Bild 16. Am Motor wurden keine akustischen Auffälligkeiten gemessen.

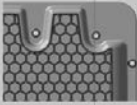

Eigenschaft	Ergebnis Wabenstruktur	Ergebnis ungleichmäßige Verrippung	Veränderung [%]
			
Gesamtverformung Berstdruck [mm]	9,4	9,5	+ 1
Vergleichsspannung Berstdruck [MPa]	31,6	47,6	+ 50
Gesamtverformung 1. EF [mm]	2,0	2,0	0
Vergleichsspannung 1. EF [MPa]	8,2	17,9	+ 118
Summenpegel Außen bei 115 dB Innen [dB]	65,2	63,7	-2,5

Bild 16: Wabenstruktur und Chaos-Verrippung im direkten Vergleich

Neben der simulationstechnischen Auslegung wurden zur Sicherung der Funktion eine Reihe von Validierungsprüfungen durchgeführt, Bild 18. Im Vergleich zu Zylinderkopfhäuben die in ähnlicher Weise den Motor kapseln, müssen Ölwannen aufgrund der besonderen Lage eine hohe Steinschlagfestigkeit besitzen. Mit Hilfe eines Steinschlagsimulators wurde hierzu die Oberfläche mit einem definierten Stahlgussgranulat senkrecht beschossen. Unsere Untersuchung haben gezeigt, dass selbst bei einer Beschussenergie, welche 140 km/h entspricht, nur oberflächliche Beschädigungen entstehen. Die Ölwanne bleibt dicht.

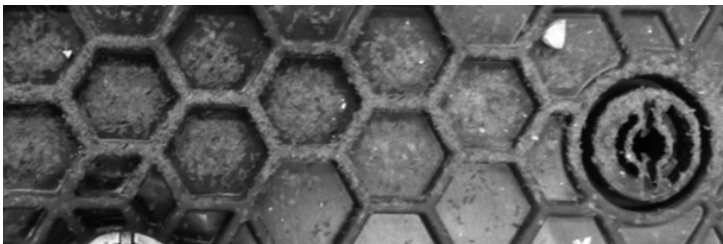


Bild 17: Testbild der Steinschlagprüfung mit einer Beschussgeschwindigkeit von 140 km/h

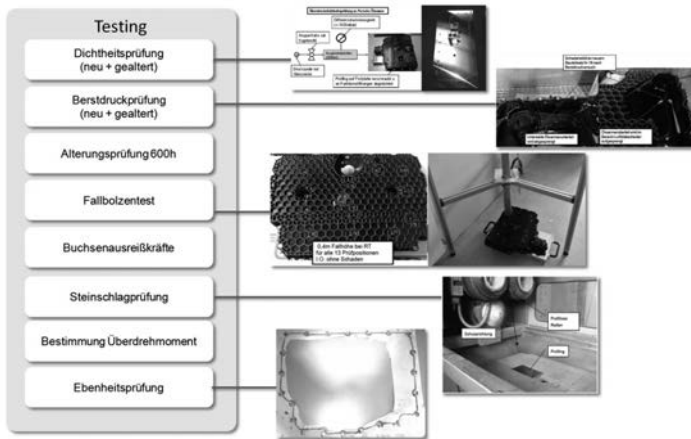


Bild 18: Kurzübersicht der wichtigsten Prüfungen zur Bewertung der Ölwannefunktion.

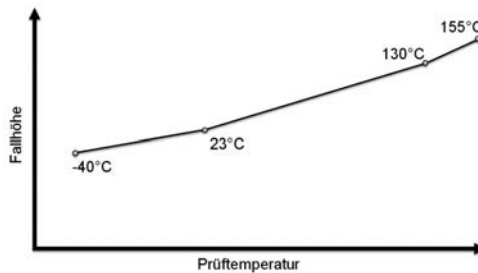


Bild 19: Bruchfallhöhe über die Bauteiltemperatur

Ein weiteres Qualitätsmerkmal stellt die Fallbolzenprüfung dar. Aus zunehmender Höhe wird auf verschiedene Positionen der Ölwanne ein Prüfkörper fallen gelassen. Die Prüfung erfolgt bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen. Wie zu erwarten, variiert die Schlagzähigkeit des Polyamid-Werkstoffs sehr stark mit der Temperatur. Aluminium besitzt hier unbestreitbar gute Eigenschaften, beult jedoch relativ schnell ein. Es entstehen nicht reversible Verformungen, die beispielsweise das Ölsaugverhalten am Ölsaugrohr zur Ölpumpe beeinträchtigen können. Polyamid verhält sich im Vergleich dazu weicher, besitzt aber gleichzeitig ein gutes Rückstellverhalten. Der für diese Prüfung definierte Zielwert konnte erreicht werden.

Das Langzeitverhalten des verwendeten Polyamids spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Hierzu wurden Langzeitmedienprüfungen über 3000 Stunden unter 150 Grad Celsius durchgeführt. Die Ergebnisse belegen, dass die Produkteigenschaften sehr stabil bleiben und dass PA66 gegenüber meist aus historischen Gründen verwendeten PA66 keine Nachteile aufweist.

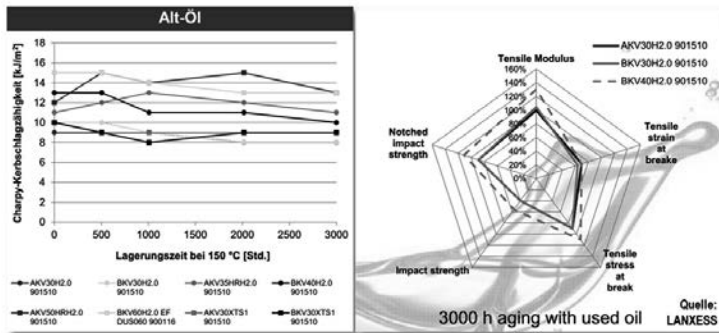


Bild 20: Darstellung der Eigenschaften verschiedener Polyamid-Typen der Firma Lanxess.

5. Ausblick

Die Substitution von Metallen durch Polyamid-Werkstoffe setzt sich bei den PKW-Ölwannen weiter fort. Die allgemeine Performance dieser Materialgruppe eignet sich hervorragend für diese Bauteile. Zukünftig wird erwartet, dass weitere Funktionen integriert werden können. Besonderes Augenmerk ist hierbei der Ölkühlung und Ölfilterung zu widmen. Diese Funktionselemente besitzen medienführende Umfänge, die prinzipiell in die Ölwanne integrierbar sind. Die Anschlusslage und der Verlauf der Leitungen könnten in der Ölwanne abgebildet werden. Durch die Verwendung hydrolyse-stabilisierter Polyamide ist es dann ebenfalls möglich, kühlwasserführende Leitungen zu integrieren.

- [1] Energie- und ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss (2013) ; Springer Berlin Heidelberg ; Seite:1-18 ; ISBN 978-3-642-39853-7

Plastic oil pan design for an optimized gasoline engine

Project management of novelty by failure mode analysis

J. M. Fiard, J. M. Cardona, Renault, Guyancourt, France;
P. Gauquie, Mecaplast, Lens, France

Abstract

Following its strategy of accessible mobility for all, Renault has developed a new A-segment SUV with a new 3-cylinder gasoline engine dedicated to promising emerging markets like India. Renault engineering has focused on lightening the structure to secure benefits in both fuel consumption and production costs and thus obtaining an optimized gasoline engine. In this context an innovative polyamide oil pan has been developed. We focus in this paper on the challenges of using polymer material and liquid sealing with regard to the reliability of such structural parts under the hood. We describe the development process that has been applied with the original equipment manufacturer Mecaplast. The methodology is based on a failure mode analysis process such as breakage (brutal, fatigue, creep) and leakage. We explain the complementarity of the tests and the numerical simulations for the validation plan.

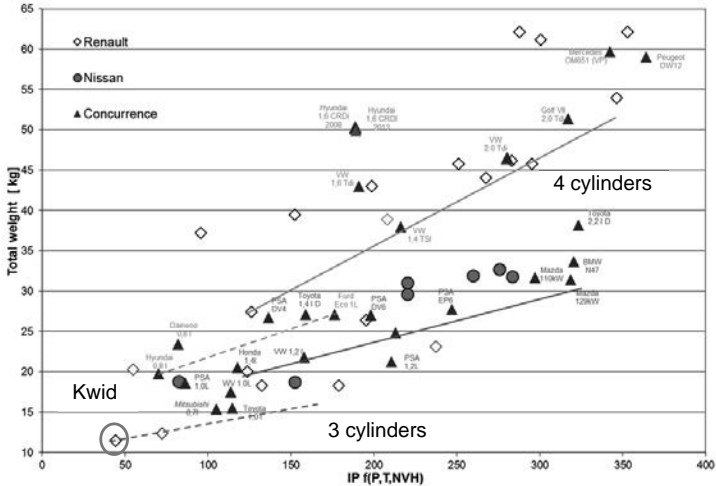
1. Introduction



Fig. 1: The Renault Kwid and its powertrain

This paper deals with the plastic oil pan of the new Renault Kwid launched onto the Indian market on September 2015 (cf. Fig. 1). One of the main user selling points (USP) of this product is its very competitive price. The main lever to reduce price is to reduce weight and

this contributes also to reducing fuel consumption and CO₂ emission. All the engineering departments at Renault and the OEM have worked continuously on reducing the mass of powertrain and vehicle, achieving a real breakthrough in terms of performance / mass ratio. To illustrate this point, we show in Fig. 2 a benchmark for cylinder blocks in aluminum alloy. The y axis is the total weight of the engine basis while the x axis corresponds to a performance index taking into account engine power, engine torque and NVH performance. One can see that the new engine is the leader amongst three-cylinder engines.



2. Design review by failure mode process

Besides the standard process of engine development, a process devoted to innovating parts called design review by failure mode (DRBFM) has been applied involving the core competencies leaders. If the DRBFM process fails to prove reliability, the back-up solution is adopted.

To start the process, one identifies the level of novelty of the part (scale from 1 to 5). For instance, the 3D sealing was new for Renault but not for Nissan when the FIPG with aluminum substrate and the thermoplastic oil pan were new for the both companies and were therefore considered more critical. The project and core competencies leaders thus focus on the failure mode analysis as illustrated for the oil pan in Fig. 4.

	Novelty		Failure Modes		Solicitations
	Specificity	Cotation			
FIPG	3D Sealing	3	Leakage	Leakage by lack of product	Product x Process Assembly
	Sealing between aluminium and plastic parts	4		Leakage by silicon extrusion	Product x Process Assembly
				Leakage by adhesive break	Aluminium part / Plastic part / Silicon compatibility
				Leakage by dynamic break	Thermal solicitations
					Engine excitation
Plastic oil pan	Plastic material	4	Breakage	Creep breakage	Assembly
				Static breakage	Thermal solicitations
					Oil pressure
				Fatigue breakage	Engine excitation
				Accidental break	Laying on the floor
					Shocks

Fig. 4: Oil pan failure mode analysis

For each failure mode, we associate physical criteria which can be measured or calculated for each pair (failure mode, solicitation). The criteria for leakage and breakage are presented in Fig. 5 and Fig. 10 respectively where we also indicate when used tests and/or numerical simulations. We explain below the action plan required to check that those criteria have been satisfied.

3. Leakage issues

We count four situations which could lead to leakage (cf. failure mode column Fig. 5).

The first one is due to the lack of product applied during processing in the plant. The second leakage risk is silicone extrusion due to distortion of the thermoplastic oil pan and the excessively large gaps after assembly. We must also make sure that the bolt tension is enough to keep parts in contact and prevent any relative motion between parts which would lead to an uncontrolled low-cycle fatigue failure of the gasket. Compatibility between the aluminum

parts (cylinder block and timing cover), the plastic oil pan and the FIPG was a main issue which required dedicated experiments. Finally, we had to prove that no failure could occur due to in-service stresses.

Failure Modes		Solicitations	Criteria	Test	Sim.
Leakage	Leakage by lack of product	Product x Process Assembly	Chamfer continuity		X
			Silicon thickness in chamfer	X	
	Leakage by silicon extrusion	Product x Process Assembly	Distortion after moulding	X	X
			Gap after assembly	X	X
			Tension need to correct part deformation		X
	Leakage by adhesive break	Aluminium part / Plastic part / Silicone compatibility	Cohesive	X	
			Roughness	X	
			Mechanical resistance	X	
			Oil compatibility	X	
			Ageing	X	
	Leakage by dynamic break	Thermal solicitations	Max admissible FIPG displacement	X	X
		Assembly & Thermal Ageing	Max admissible FIPG displacement	X	
		Engine excitation	Max admissible FIPG displacement		X

Fig. 5: Criteria for leakage

Lack of product

Silicone bead deposition depends mainly on a good chamfer continuity and a minimal silicone thickness.

Silicone extrusion

The non-cured FIPG should not be blown out by the air control pressure test in the plant (+50 mbar rel.). A specific experiment and a design of experiments has been done to establish the maximal gap criterion allowed between parts (cf. Fig. 6).

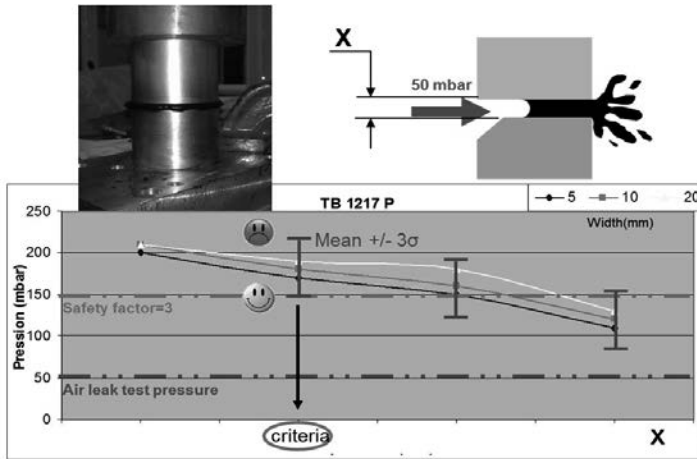


Fig. 6: Gap criterion

The clearance between oil pan and aluminum parts has been measured after many cycles and maintenance in hot conditions (145°) and cold conditions(-30°).

Adhesive break

The way that silicone rubber could break – adhesive or cohesive breakage (cf. Fig. 7) – depends on the compatibility between the aluminum alloy, the thermoplastic resin and the silicone resin. Our aim is to be sure to eliminate adhesive breakage in order to profit from the elongation potential of silicone. We had no information at the beginning of the project regarding this compatibility. For this reason a design of experiments was conducted with 12 resins (four suppliers) with several viscosities. The tests were carried out with two PA6-GF and two PA66-GF thermoplastic resins and three surface treatments. The results show that five silicone resins have good bonding characteristics with plastic. Notice that the silicone resin must not be too much viscous if void creation during processing is to be avoided. Concerning the plastic parts, a minimum surface roughness is recommended in order to avoid plasma surface treatment (considered as a highly efficient back-up solution).

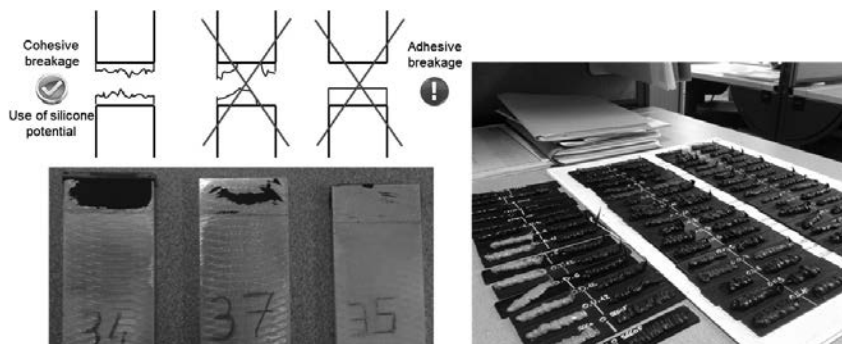


Fig. 7: Cohesive vs adhesive silicone breakage

Dynamic breakage

The elongation at break of FIPG, oils compatibility and the aging effect have also been studied. Indeed, an experiment was carried out at Renault to characterize shearing elongation (cf. Fig. 8). We thus obtain a physical criterion for the part's relative motion in terms of maximum admissible deformation for FIPG ($<300\%$) and in terms of maximum displacement for parts (under the hypothesis of silicone thickness).

By the way, those experiments revealed that most of the resins have a good chemical resistance to oil and we observed the increase in elongation at break during the oil thermal-aging tests.

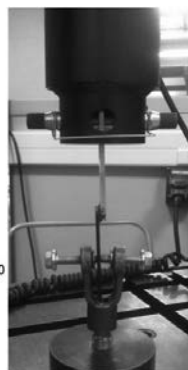
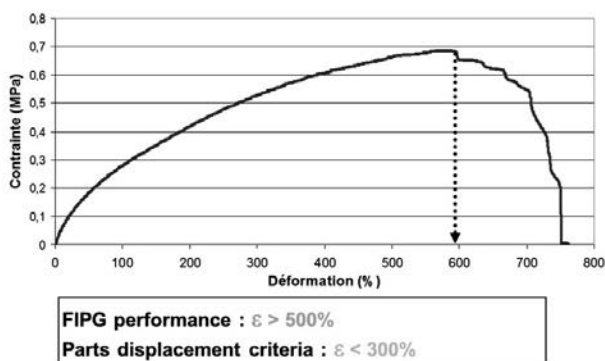


Fig. 8: Shearing elongation

Concerning engine excitation vibrations, Nissan provided fatigue test results (see the rig test in Fig. 9) with which a maximum relative displacement allowed between parts can be established.

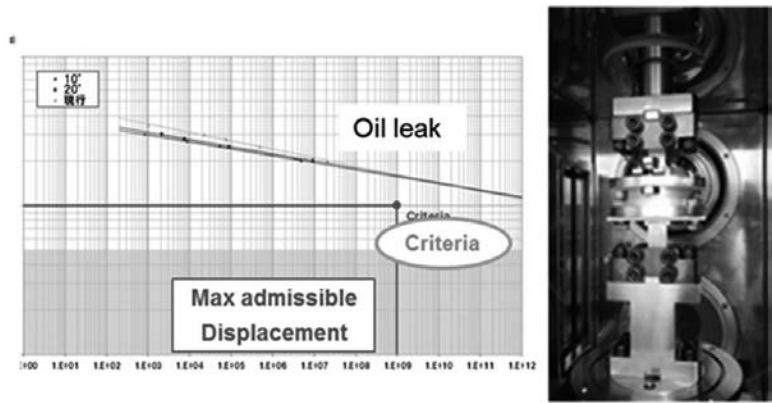


Fig 9: Fatigue results on FIPG

Numerical simulations (thermal expansion analysis) and measures (under hot and cold conditions) have been carried out to verify that deformation of FIPG is below criterion. Vibratory displacements have been simulated via a force response analysis and fully comply with fatigue criteria.

4. Breakage issues

Failure Mode		Solicitations	Criteria		Test	Sim.
Breakage	Creep	Assembly	Max creep fracture (@ equiv .temp.)			X
		Thermal solicitations	Max stress fracture (@ peak temp.)			X
	Static	Oil pressure				X
	Fatigue	Engine excitation	Max fatigue admissible stress			X
			First mode frequency > H1,5 +10%			X
	Accidental	Laying on the floor	Max admissible stress			X
		Shock	Stones impact by vehicles crossing (@130km/h) No cracks	Ribs must to resist to stone impact	X	X
				Skin must to resist to stone impact	X	X
		Crossing sidewalk	Ribs/skin		X	

Fig. 10: Criteria for breakage

We count four breakage situations which have been detailed in this section; the creep, static, fatigue and shock failure modes. But first it is crucial to have an accurate idea of the distortion after molding and of the local properties (Young's modulus as the first one) of the fiber-filled polymer after molding. This is done by rheological simulations as depicted in Fig. 11. Rheology simulations are also essential to identifying weaknesses at the internal merging flow front.

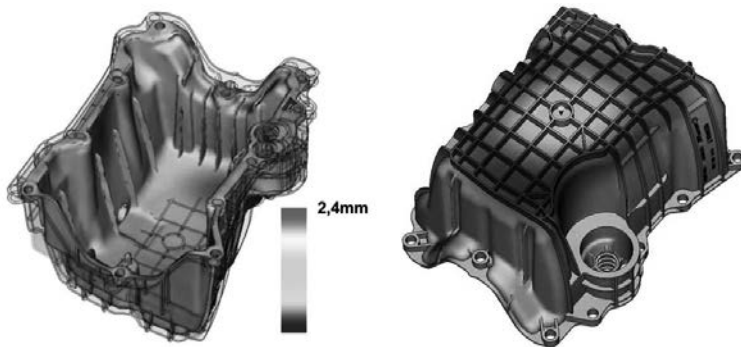


Fig. 11: Rheology simulation

Creep, static and fatigue breakage

Numerical simulations have been carried out to evaluate stresses and the displacement response to various loads: the tightening process on a distorted part, oil pressure, thermal load and engine vibration (Fig. 12). Our criteria are admissible stress for the oil pan and admissible displacement for the silicon rubber (see the gap criterion above). For such failure modes, numerical simulation is good enough nowadays for estimating the stresses in the structure. So we can take advantage of it to sort the designs and identify the better ones.

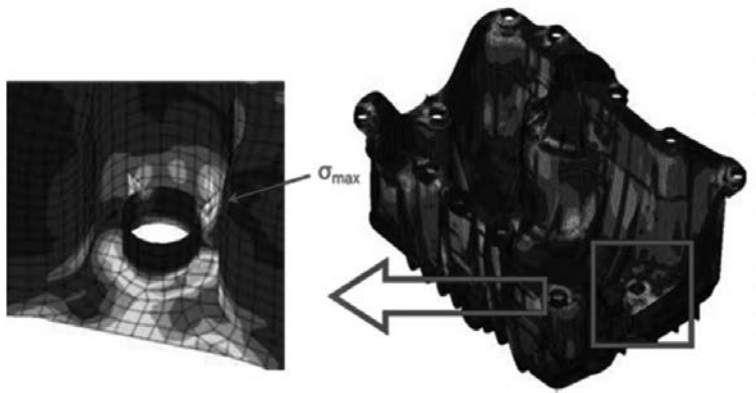


Fig. 12: Engine vibration stresses

However, it is quite impossible, except in particular cases, to compare calculation results directly with specimen experimental data (as ultimate tensile stress or fatigue limit) and it is necessary to take into account a safety factor (SF).

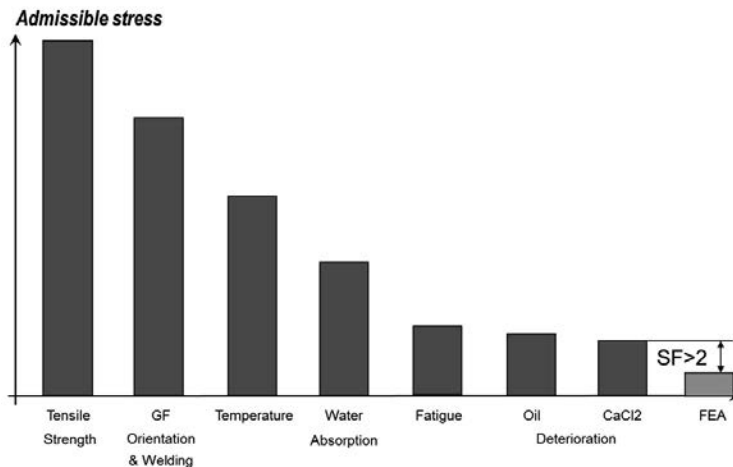


Fig. 13: Assessment of strength for fatigue failure mode

The first reason is because the thermoplastic parts have material properties which are non-uniform and anisotropic due to the variation in fiber density and fiber orientation. Secondly, the various deterioration mechanisms under the hood (thermal aging, oil aging, salt aging,

absorption and so on) as well as strength on welds are not properly modeled today and can be very scattered. So within the framework of the Renault-Nissan alliance, we apply a stress-strength reliability approach illustrated by a so-called 'bar graph' diagram (see Fig. 13). In this diagram we compare the strength of the part (deduced from specimen experiments) which falls as a function of the deterioration factors, to the stress applied, that is, the computed stress.

Accidental breakage

We have considered three types of accidental breakage due to shocks: bottoming out, stone impact and crossing sidewalks. For each case we differentiate between ribs and skin in order to assess the resistance of these parts. Bottoming out has been simulated and results have been compared to an admissible stress as done for creep, static and fatigue failure modes. For crossing sidewalks, vehicle tests have allowed the risk to be eliminated.

For the stone impact, rig tests with several impactors (cf. Fig. 14) have been carried out to determine properly the resistance in terms of the energy absorbed by ribs and skin.

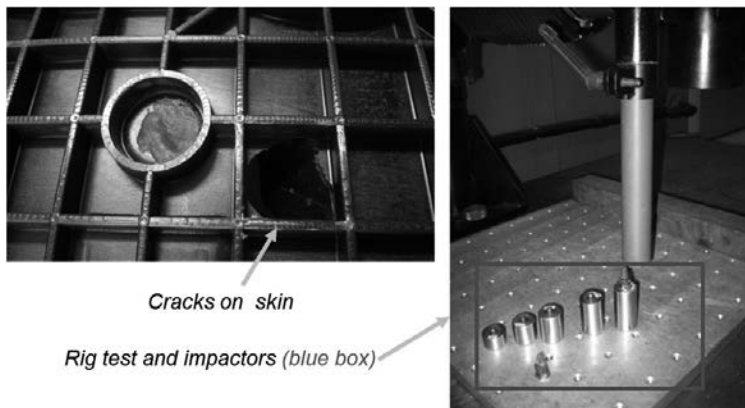


Fig.14: Stone impact crack and test rig

Once the admissible energy was determined for the ribs and for the skin, we were able to predict situations where failures could occur when cars collide.

Fig. 15 shows how the risk of breakage of the skin (because breakage of ribs calls for too much energy to be a problem) was eliminated during the project by a proper design.

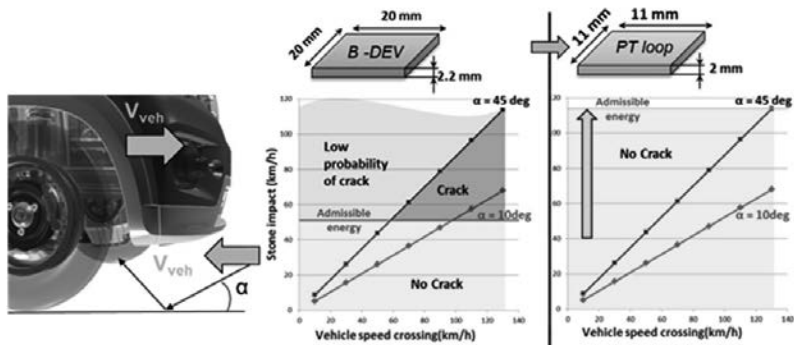


Fig. 15: Design to overcome stone impacts failures

In Fig. 15 the risk domain is bounded by a horizontal line which corresponds to the admissible energy for a given design and an oblique line corresponding to a maximum rebound angle. When reducing the space between ribs, the size of stone which could damage the skin is reduced, permitting a higher stone velocity for a given admissible energy.

5. Conclusion

The thermoplastic oil pan of the Kwid engine in combination with a 3D FIPG sealing is ultimately one of a kind. The main challenges were to retain the admissible geometrical dispersion in spite of the large size of the part and to demonstrate reliability in the case of stone impact.

The DRBFM process permitted an efficient management of risk relative to innovatory parts, focusing on the main risks and calling for demonstration of reliability. Notice that the oil pan and the FIPG have successfully passed all bench tests without calling into question the list of failure modes. Numerical simulation is a big help today in keeping to time schedules but suffers from a lack of modeling for the constitutive laws and for damage (cf. [1]). This situation implies applying a safety factor which cuts into the potential of polymer. Ultimately this project shows that expansion of plastic parts under the hood is possible but this will mean dealing with more failure modes due to the sensitivity of polymer to temperature and to contact with various fluids.

Acknowledgements

We are indebted to V. Bossavie and J.-M. Salondy who conducted the experiments at Renault for sealing and breakage issues respectively. The authors gratefully acknowledge the support provided by C. Le Coeur and G. Morin with their clear-sighted analysis.

- [1] Fiard, J-M: Méthodologie de dimensionnement fiabiliste des pièces plastiques du GMP: SIA Congrès, Montigny, 2015

Wärmeleitfähigkeit – Geht das?

Wärmemanagement in Thermo- und Duroplasten

Dipl.-Ing. **T. Hilgers**, Quarzwerke GmbH, Frechen

Kurzfassung

Additive auf Basis mineralischer Rohstoffe spielen seit vielen Jahren eine bedeutende Rolle als Füllstoffe im Bereich der Kunststoffe. Spezielle Füllstoffe verleihen Thermo- und Duroplasten bessere Eigenschaften in den Bereichen der mechanischen Festigkeiten, bei den thermischen Eigenschaften und bei den dielektrischen Eigenschaften. In letzter Zeit kommen allerdings zu diesen klassischen Anforderungen neue hinzu. Speziell der Einsatz von elektrischen Bauelementen mit hoher energetischer Dichte (Prozessoren, Leuchtdioden, E-Motoren etc.) fordert eine effiziente Ableitung der entstandenen Wärme bei gleichzeitiger Beibehaltung der elektrischen Isolationsleistung der verwendeten Kunststoffmaterialien.

Kunststoffe weisen aber eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit auf, die durch den Zusatz von Additiven mit einer hohen Eigenwärmeleitfähigkeit signifikant erhöht werden kann.

Es wird ein Überblick über verschiedene Materialien zur Wärmeleitung in Thermo- und Duroplasten vorgestellt. Dabei liegt der Fokus auf der Wärmeleitfähigkeit, den mechanischen Eigenschaften und der kommerziellen Umsetzbarkeit von wärmeleitfähigen Kunststoffen.

Wichtige Themengebiete werden dabei, die zum Wärmetransport notwendigen Mechanismen der Konvektion und Wärmestrahlung sowie die Einflussgrößen wie z.B. der Füllgrad, die Korngrößenverteilung und die Verarbeitbarkeit sein. Ebenso werden die Potentiale der Gewichtsreduzierung, die Kosten und eine Berechnung zum Carbon Footprint für die Herstellung eines Aluminiumkühlkörpers und eines Kühlkörpers aus Kunststoff (Polyamid 6-Compound) gegenüber gestellt.

1. Einleitung

Wohl bekannt zum Abtransport von Wärme sind Metalle in den unterschiedlichsten Varianten und Ausführungen. Allgemein verbreitet im Bereich der passiven und aktiven Kühlung in der Elektronik sind Aluminiumkühlkörper und metallische Gehäuse. In beiden Fällen ist eine aufwendige Herstellung unvermeidlich. Je komplexer die geforderte Geometrie, desto schwieriger wird es, diese zur Verfügung zu stellen. Eine einfache Serienfertigung komplexer Bauteile, wie sie aus der Thermoplast- und Duroplastverarbeitung bekannt ist, scheidet für diese

Werkstoffe aus. Alle Metalle weisen zudem eine gute elektrische Leitfähigkeit auf. Es gibt jedoch Anwendungen, in denen diese elektrische Leitfähigkeit unerwünscht ist. Somit müssen entsprechende Isolationsmaßnahmen durchgeführt werden.

2. Wärmeübertragungsmechanismen

Materialien mit direktem Kontakt zu einem Hotspot müssen die entstehende Wärme möglichst schnell und effektiv mittels Konduktion (Wärmetransport von einem Körper zu einem anderen) vom Bauteil abtransportieren.

Die Wärmeleitung mittels Konduktion wird durch das Fouriersche Gesetz beschrieben.

$$Q = \lambda A \Delta T / d$$

Q = Wärmestrom (W)

A = Fläche (m^2)

λ = Wärmeleitfähigkeit (W/mK)

ΔT = Temperaturdifferenz zwischen den Materialien (K)

d = Dicke des Material (m)

In Tabelle 1 ist eine Übersicht der Wärmeleitfähigkeiten und der elektrischen Widerstände verschiedener Materialien bei Raumtemperatur dargestellt.

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeit und elektrischer Widerstand verschiedener Materialien

Material	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Elektrischer Widerstand [Ohm*m]
Kupfer	401	1.68×10^{-8}
Aluminium	205	2.82×10^{-8}
Eisen	80	1.0×10^{-7}
Bornitrid (hexagonal)	$30 \perp$; $(600 \parallel)$	10^{13}
Aluminiumoxid	30	10^{12}
SILATHERM	14	10^{13}
Magnesiumoxid	30	10^{20}
Glas	1,05	10^{13}
Polymer	0,2-0,4	10^{11}
Luft	0,024	3.3×10^{16}
Wasser	0,609	1.8×10^5

 = elektrisch leitfähig

 = elektrisch isolierend

Der erste direkte Kontakt zu einem Hotspot besteht typischerweise aus einer Leiterplatte. Die Wärme muss also weg von der relativ kleinen und kompakten Leiterplatte mit einer kleinen Oberfläche über einen Kühlkörper oder ein Gehäuse mit einer großen Oberfläche zum Zielort transportiert werden. [5]

Dieser Wärmeübergang wird als Konvektion bezeichnet. Die Konvektion beschreibt den Wärmetransport von einem Festkörper zu einem fluiden Medium (Gas oder Wasser).

Der Wärmetransport durch Konvektion wird durch das Newtonsche Gesetz beschrieben

$$Q = \alpha A \Delta T$$

Q = Wärmestrom (W)

A = Fläche (m^2)

α = konvektiver Wärmeübergangskoeffizient ($W/(m^2K)$)

ΔT = Temperaturdifferenz (K)

Bild 1 [2] zeigt den Transport der Wärme durch eine mehrschichtige Wand.

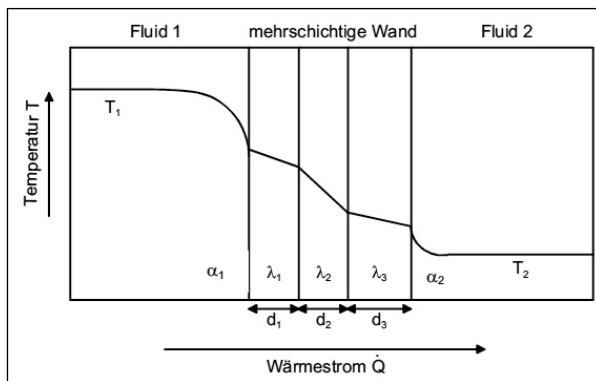


Bild 1: Wärmedurchgang durch eine mehrschichtige Wand

Beim Wärmeübergang unterscheidet man zwischen freier und erzwungener Konvektion. Freie Konvektion liegt bei unbeweglichen- und erzwungene Konvektion bei beweglichen Medien vor.

Luft als Medium tritt am häufigsten als Zielort für die Wärme auf.

Die Wärmeübergangskoeffizienten von freier- und erzwungener Konvektion sind folgende:

Freie Luftkonvektion	5-25 $W/(m^2K)$
Erzwungene Luftkonvektion	10-200 $W/(m^2K)$
Freie Wasserkonvektion	20-100 $W/(m^2K)$
Erzwungene Wasserkonvektion	50-10000 $W/(m^2K)$

In Bild 2 [1] ist zu erkennen, dass ab einer Wärmeleitfähigkeit von ca. 1,5-2W/(mK) eines Kühlkörpers die Konvektion der entscheidende Schritt zur Reduzierung der Kontakttemperatur ist.

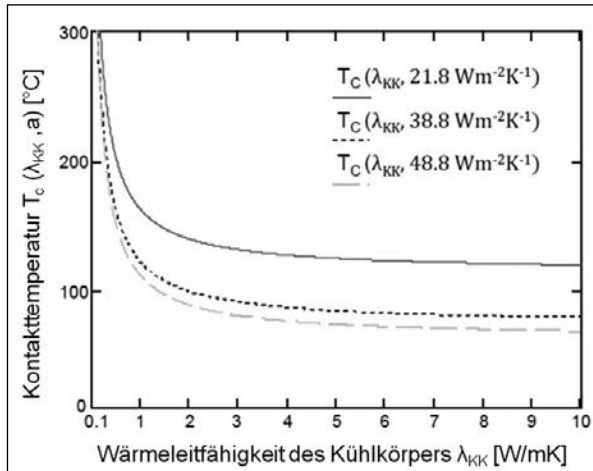


Bild 2: Kontakttemperatur in Abhängigkeit der der Wärmeleitfähigkeit eines Kühlkörpers bei unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten

Durch den Einsatz von wärmeleitfähigen Kunststoffen hat man im Vergleich zum Metall komplette Designfreiheit und kann somit z.B. durch Vergrößerung der Bauteiloberfläche den Wärmedurchgang steigern.

3. Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit in Thermoplasten

Zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit in Thermoplasten spielen verschiedene Eigenschaften der Additive eine Rolle.

Folgendes Bild 3 [3] zeigt die unterschiedlichsten Einflussgrößen auf die Wärmeleitfähigkeit.

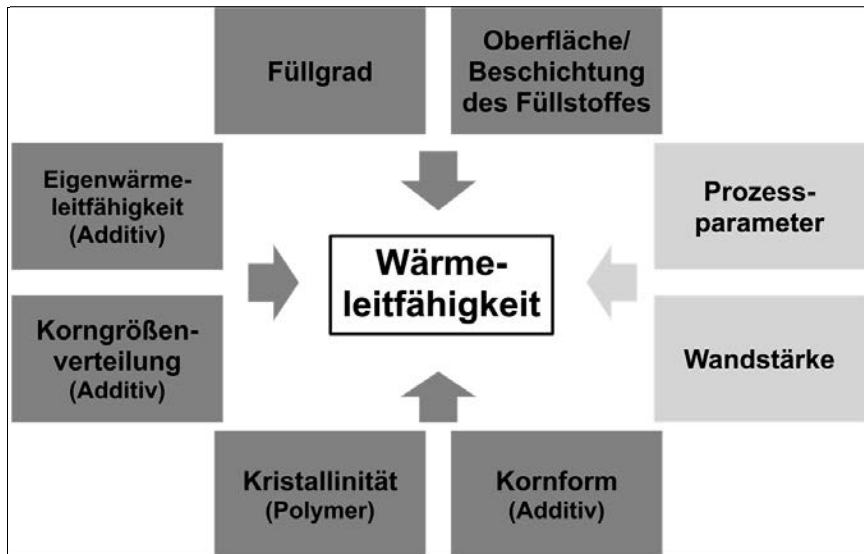


Bild 3: Einflussfaktoren auf die Wärmeleitfähigkeit

Zum Vergleich unterschiedlicher wärmeleitfähiger Additive wurden 65 m% der Additive in einer Polyamid 6 Matrix compoundiert. Beim Einsatz des hexagonalen Bornitrids musste die Konzentration auf 55m% reduziert, da hier aufgrund der zu starken Versprödung des Materials eine Stranggranulierung nicht mehr möglich war.

Der Unterschied zwischen dem Produkt SILATHERM® 1360-400 AST und SILATHERM® 1360-010 AST ist die Korngröße. SILATHERM® 1360-400 AST hat einen D50 von 5µm und SILATHERM 1360-010 AST von 23 µm.

Bei den Thermoplast-Compounds wurden die unterschiedlichen Additive über einen Extruder (Fa. Leistritz, ZSE 27 MAXX) in das Polyamid 6 eincompoundiert. Aus den Compounds wurden mittels Spritzguss (Fa. Demag, Ergotech 100/420-310) Formteile hergestellt:

Mehrzweckprüfstab (ISO 3167 Typ A)

Platte 80 mm * 80 mm * 2 mm

Die für die Messung der Wärmeleitfähigkeit benötigten Prüfkörper wurden aus den Platten mechanisch ausgearbeitet. Die thermischen Eigenschaften spritzgegossener Teile differieren

je nachdem, ob sie in Fließrichtung oder quer dazu gemessen werden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden die Messungen wie folgt durchgeführt: Zur Messung quer zur Extrusionsrichtung (Z-Richtung) erfolgte ein Ausdrehen von Scheiben mit $d=2,7$ mm in Zentralposition der Platten. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in Spritzrichtung (X-Richtung) mussten je 6 Stäbe mit 12,7 mm Länge und 2 mm Breite ausgefräst werden, die dann zur Messung in einem Probenhalter um 90° gedreht zusammengespannt wurden. [4]

Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der gefüllten Polymer-Compounds wurde ein NETZSCH LFA 447 NanoFlash (ASTME-1461, DIN 30905 und DIN EN 821) eingesetzt. Die Bestimmung der Zugeigenschaften erfolgte nach DIN EN ISO 527, die Schlagzähigkeit wurde nach DIN EN ISO 179 und die HDT A nach DIN EN ISO 75 bestimmt. [4]

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen Additive in Polyamid 6.

Tabelle 2: Wärmeleitfähigkeit und mechanische Eigenschaften von gefüllten PA-Compounds

Produkt in Polyamid 6	Wärmeleitfähigkeit		Zugeigenschaften		Schlagzähigkeit Charpy	HDT A	Preis	Mohs Härte/ Abrasivität
	X	Z	σ_M	E-Modul				
	W/mK	W/mK	MPa	MPa	kJ/m ²	°C	€/kg	
65 m% SILA-THERM[®] 1360-400 AST	1,3	1,2	93,7	10000	42,2	142,5	2,9	5
65 m% SILA-THERM[®] 1360-010 AST	1,5	0,9	92,2	11100	37,8	150,5	2,55	5
65 m% Aluminiumoxid	1,5	0,9	88,8	9640	39,1	119,8	2	9
55 m% Bornitrid	5,3	1,0	68,1	11800	10,4	161,9	80	2
65 m% Magnesiumoxid	1,4	1,2	84,7	8910	31,6	120,0	5	6

Bild 3 [3] zeigt einen relativen Vergleich der Eigenschaftsänderungen in PA-Compounds durch die unterschiedlichen wärmeleitfähigen Additive.

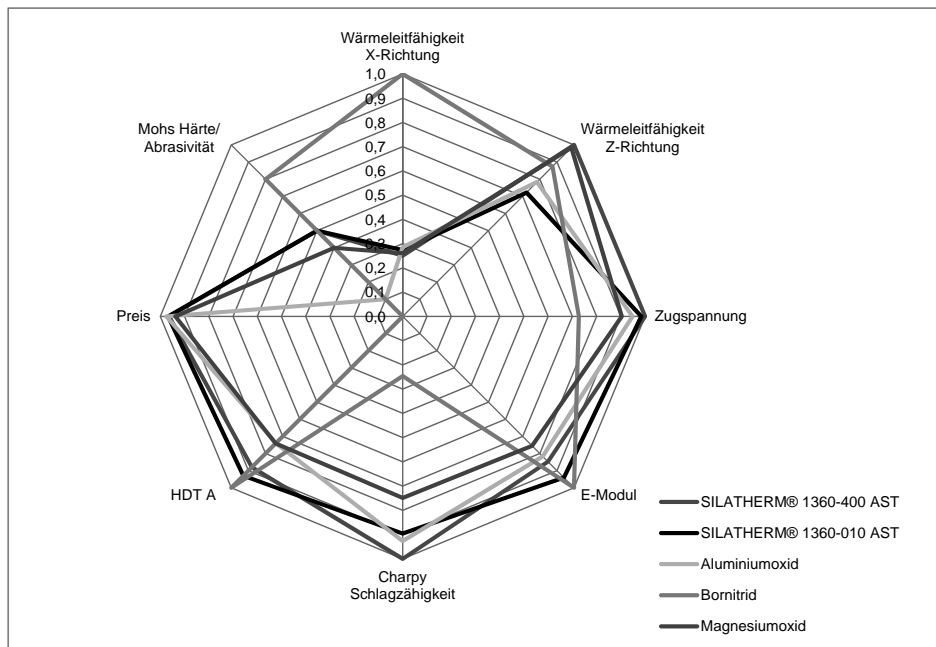


Bild 3: Relativwerte von PA-Compounds mit unterschiedlichen Additiven

Die Werte zeigen eindeutig, dass mit Bornitrid die höchsten Wärmeleitfähigkeiten erreicht werden können, die Materialkosten aber auch am höchsten sind. Allerdings sollte man nicht nur die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit und des Preises betrachten sondern auch die Veränderung der mechanischen und thermischen Eigenschaften. Die SILATHERM® Produktreihe zeigt hier ein sehr ausgeglichenes Eigenschaftsbild mit sehr guten mechanischen Eigenschaften und Wärmeleitfähigkeiten von bis zu 1,5 W/mK bei Füllgraden von 65 %.

Bei Erhöhung des Füllgrad auf 75m% können mit dem Produkt SILATHERM® 1360-010 AST Wärmeleitfähigkeiten von 2,3 W/mK erreicht werden.

Dies zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit sehr stark vom Füllgrad des Polymers abhängig ist. Hier gilt die Faustregel „Viel hilft viel“.

Im Gegensatz dazu zeigt eine Erhöhung des Füllgrades einen negativen Einfluss auf die Schlagzähigkeit.

In Tabelle 3 ist die Abhängigkeit des Füllgrades anhand des Produktes SILATHERM® 1360-400 AST auf die Wärmeleitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften dargestellt.

Tabelle 3: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten und mechanischen Eigenschaften bei unterschiedlichen Füllgraden

Produkt in Polyamid 6	Wärmeleitfähigkeit		Zug-eigenschaften		Schlag-zähigkeit Charpy	HDT A
	X	Z	σ_M	E-Modul		
	W/mK	W/mK	MPa	MPa	kJ/m ²	°C
65 m% SILATHERM® 1360-400 AST	1,3	1,2	93,7	10000	42,2	142,5
70 m% SILATHERM® 1360-400 AST	1,6	0,9	94,2	11300	37,0	143,7
75 m% SILATHERM® 1360-400 AST	2,0	1,3	95,5	15500	19,7	164,4

Sollten für die verschiedenen Anwendungen Wärmeleitfähigkeiten von 2 W/mK nicht ausreichend sein, kann ein sekundärer Füllstoff z.B. Bornitrid dem SILATHERM® zugefügt werden. Folgendes Diagramm 1 [4] zeigt die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften, der Wärmeleitfähigkeit und des Materialpreises bei Zugabe von Bornitrid.

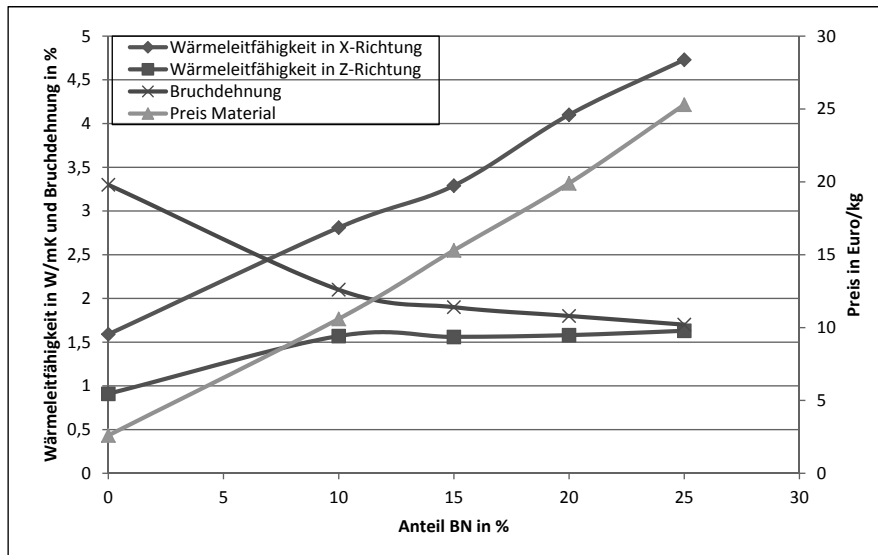


Diagramm 1: Veränderung der Wärmeleitfähigkeiten und mechanischen Eigenschaften durch Zusatz eines sekundären Additivs

4. Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit in Duroplasten

Zusätzlich zu den Versuchen in Thermoplasten wurden auch Untersuchungen mit unterschiedlichen Additiven, unterschiedlichen Korngrößen, unterschiedlichen Kornformen, verschiedenen Beschichtungssystemen und unterschiedlichen Füllgraden in Duroplasten durchgeführt.

Folgendes Harzsystem wurde dafür verwendet.

Harz: ARALDIT CY 184

Härter: ARADUR HY 1235 BD

Beschleuniger: ACCELERATOR DY 062

Das Harzsystem wurde zunächst bei 60°C im Vakuummischer mit unterschiedlichen Füllstoffen gemischt. Der Härteprozess wurde für 2 Std. bei 100°C und die Nachhärtung für 16 Std. bei 140°C durchgeführt.

Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit wurde wieder die NETZSCH LFA 447 NanoFlash (ASTME-1461, DIN 30905 und DIN EN 821) verwendet.

Wie auch bei den Versuchen mit den Thermoplasten stellte sich sehr schnell heraus, dass durch eine Erhöhung des Füllgrades auch die Wärmeleitfähigkeit drastisch ansteigt. Deswe-

gen liegt der Fokus unserer Versuche nicht nur auf der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit, sondern auch auf der Beibehaltung einer guten Prozessfähigkeit/Fließfähigkeit des Harzsystems. Tabelle 4 zeigt erste Ergebnisse mit unterschiedlichen Additiven (unterschiedliche Minerale mit unterschiedlichen Kornformen) und unterschiedlichen Beschichtungssystemen. Weitere Versuche zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit und Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch z.B. eine optimierte Kornverteilung befinden sich zurzeit in der Ausprüfung und werden auch weiterhin im Fokus der Arbeiten unsere Produktentwicklung stehen.

Das Beschichtungssystem SST wurde speziell zur Erhöhung des Füllgrades in Epoxidharzsystemen entwickelt. Alle in der Tabelle aufgeführten Systeme zeigen noch eine gute Fließfähigkeit. Die Viskosität konnte leider vor dem Fertigstellungstermin des Manuskript nicht geprüft werden. Diese werden in der Präsentation vorgestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse unterschiedlicher Additive in Epoxidharzsystemen

Produkt in Epoxidharz	Füllgrad	Wärmeleitfähigkeit	Zugeigenschaften		Schlagzähigkeit Charpy	Preis
	Vol. %	W/mK	σ_M	E-Modul		
			MPa	MPa	kJ/m ²	€/kg
SILATHERM[®] 1360-007 EST	50,20	1,40	118	15500	6,84	2,6
SILATHERM[®] 1360-007 SST	58,58	1,91	107	19010	5,46	2,6
SILATHERM[®] Plus[®] 1432-012 SST	72,01	3,76	53	39255	1,77	10
Aluminiumoxid	49,18	1,54	137	20080	10,16	2

Zusätzlich zu den mechanischen Eigenschaften und den Wärmeleitfähigkeiten spielen in Epoxidharzsystemen die Dielektrischen Eigenschaften eine große Rolle. Deswegen wurde der Verlustfaktor ($\tan \delta$) und die Permittivität (ϵ_r) vor und nach Wasserlagerung in Anlehnung zur IEC 60250 gemessen. Die Prüfkörper wurden 100 Tage bei 50°C gelagert. Vor Wasserlagerung zeigten alle Proben gute Werte mit einem $\tan \delta$ kleiner als 0,05 und einer Permittivität ϵ_r unter 6.

Nach der Wasserlagerung stieg der Verlustfaktor der Proben auf größer 0,2 und die Permittivität auf größer 15 an. Aufgrund dieser Resultate ist ein Einsatz in Außenanwendungen für die SILATHERM®-Produktreihe und Aluminiumoxid nicht zu empfehlen.

4. Carbon Footprint

Zusätzlich zu den thermischen-, den mechanischen Eigenschaften und der Wärmeleitfähigkeit wurde eine CO₂-Bilanz des Compounds ermittelt. Diese CO₂-Bilanz wurde dann mit der von Aluminiummetall verglichen, da Aluminium zurzeit der meist eingesetzte Werkstoff im Bereich Wärmemanagement ist.

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse zum Carbon Footprint

Tabelle 5: Werte des GWP der verschiedenen Materialien

Material	GWP [CO ₂ eq]	Literatur
feinst vermahlene Mineralmehle	0,12 to CO ₂ / to Produkt	Life Cycle Inventory (LCI) from Industrial Minerals Association (IMA-Europe) Feb 2013
Aluminium Metall	11 bis 16 to CO ₂ / to Produkt*	Global Life Cycle Inventory Data for the Primary Aluminium Industry" (2013) Life Cycle Impact Assessment (LCIA) results for the worldwide aluminium industry
Polyamid 6	6,7 to CO ₂ / to Produkt	Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers, Polyamide 6 (PA6), PlasticsEurope, February 2014

*Wert hängt stark von der Region ab

Betrachten wir einen Compound mit 65% SILATHERM® und 35% Polyamid 6, so ist das GWP bei diesem Compound ca. 2,4 to CO₂ / to Produkt (=Compound) und somit um den Faktor 4 bis 6 besser in der Klimaschonung als eine vergleichbare Aluminium-Lösung mit 11 bis 16 to CO₂ / to Produkt (bezogen auf das Gewicht). Beim Spritzgussprozess kann zudem noch eine Optimierung der Geometrie, wie z.B. eine dünnere Bodenplatte bei einem Kühlkörper vorgenommen werden. In diesem Fall würde der Faktor aufgrund einer möglichen Gewichtsreduktion um 30% auf 5 bis 8 fallen.

5. Literatur

- [1] Christoph Heinle; Simulationsgestützte Entwicklung von Bauteilen aus wärmeleitenden Kunststoffen; Thesis Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg, 2012
- [2] Simon Amesöder; Wärmeleitende Kunststoffe für das Spritzgießen; Thesis Technische Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg, 2010
- [3] HPF The Mineral Engineers; SILATHERM® - Mineralische Füllstoffe für wärmeleitfähige Compounds; Seminar: Wärmeleitende Kunststoffe – wie soll das gehen?*, Kunststoff Institut Lüdenscheid, 22.05.2014
- [4] HPF The Mineral Engineers; SILATHERM® for zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit; Technische Information 8206 (04/2014)
- [5] Dr. Jörg Ulrich Zilles; Adding Heat Management Capabilities to Thermoplastics and Thermosets; LPS 2014 LED Professional Symposium, Sept 30th – Oct 2nd 2014, Bregenz, Austria, Conference Proceedings

Effizienter Ansatz zur Entwicklung von Faserverbundwerkstoffen

Dr.-Ing. T. Müller, BMW Group München

Kurzfassung

Effiziente und schnelle Prozesse in der Werkstoffentwicklung tragen zur Realisierung der optimalen Lösung für den Kunden bei. Das bedeutet, dass in der Fahrzeugentwicklung neueste Werkstofftechnologien und Erkenntnisse ressourcenschonend und unverzüglich eingebracht werden. Das Zeitfenster für die Integration von Innovationen muss möglichst lange offen gehalten werden. Dies macht die Etablierung von pragmatischen und industrienahe Ansätzen in der Entwicklung von Faserverbundwerkstoffen notwendig. Charakteristisch ist hier ein geringerer Materialeinsatz und Aufwand bei einem schnelleren Erkenntnisgewinn durch die Verwendung nichtveredelter Rohstoffe.

Beispielhaft sind hier das Verfahren Faser-Direkt-RTM zur Grundcharakterisierung und 2D-Crushing neuer Faser-Matrix-Systeme. Im ersten Fall wird das Potential für Leichtbau und Design frühzeitig identifiziert und in Form von Werkstoffkennwerten und einer entsprechenden Auslegung in der Fahrzeugentwicklung berücksichtigt. Im zweiten Fall können Bauteile in Impactzonen auf Basis von Coupon-Tests innovativer Werkstoffe ausgelegt werden.

1. Einleitung: Entwicklung von Werkstoffsystemen

Für ein erfolgreiches Produkt ist die optimale Lösung hinsichtlich der Kriterien Eigenschaften, Kosten, Gewicht und Qualität zu entwickeln, siehe Abbildung 1. Mit der Elektromobilität ist im Automobilbau das Leichtbauziel weiter in den Fokus gerückt. Die erzielten Gewichtseinsparungen, zum Beispiel in der Karosserie, werden benötigt um das Mehrgewicht des Hochvolt-speichers für den Elektroantrieb auszugleichen. Überdies sind Gewichtsoptimierungen für die Nachhaltigkeit und den Energieverbrauch, sowie für dynamische Fahrcharakteristika maßgeblich [1]. Für die Entwicklung dieser optimalen Lösung müssen Lösungsvarianten untersucht werden. So werden zum Beispiel bei der Anwendung des Stoffleichtbaus unterschiedliche Werkstoffsysteme hinsichtlich der Anforderungserfüllung untersucht.

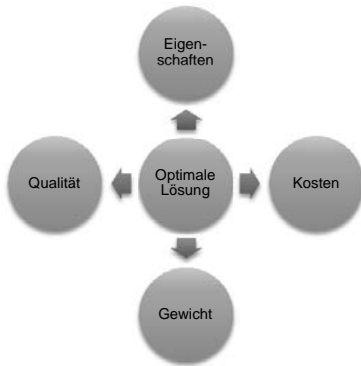


Bild 1: Auswahl des optimalen Werkstoffsystems nach EKGQ
(Eigenschaften-Kosten-Gewicht-Qualität).

Bei zunehmend herausfordernden Zielen, wie maximalen Leichtbau bei minimalen Kosten, erhöht sich der Anteil der Mischbauweisen. Um hier die Werkstoffsysteme hinsichtlich ihres Eigenschaftsprofils bestens entwickeln und einsetzen zu können, sind eine zunehmende Anzahl von Variantenuntersuchungen und -bewertungen nötig. Dies muss in effizienten und schnellen Prozessen in der Werkstoffentwicklung durchgeführt werden können. Das bedeutet, dass die neusten Erkenntnisse ressourcenschonend und schnell in der Fahrzeugentwicklung umgesetzt werden können.

Der hier aufgezeigte Ansatz, dies effizient zu realisieren, basiert auf einer ökonomischen Werkstoffauswahl und einem frühzeitigen Hardware-Software-Abgleich. Veranschaulicht in der Entwicklungs- und Absicherungspyramide bedeutet das eine Maximierung der Erkenntnisgewinne der relativ kostengünstigen und schnell durchzuführenden Hardwareversuche auf Couponebene, siehe Abbildung 2.

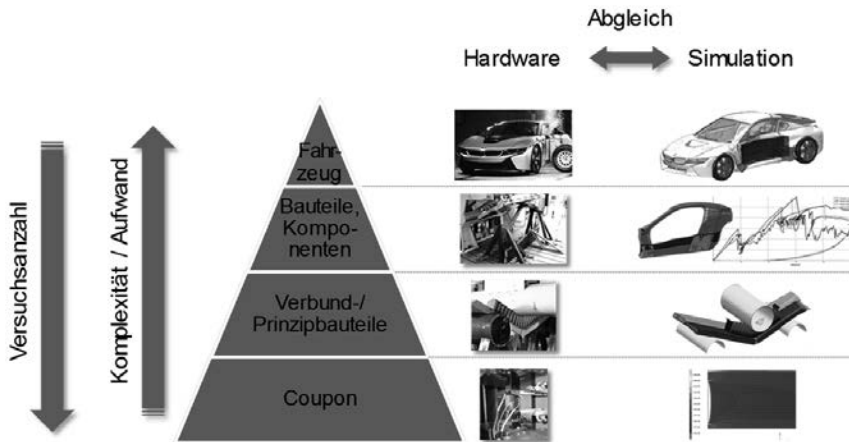


Bild 2: Entwicklungs-/Absicherungs-Pyramide [1 bis 3].

Die Anzahl der Hardwareversuche nimmt mit steigender Komplexität ab, was sich auch in der Variantenanzahl der zu untersuchenden Werkstoffsysteme widerspiegelt. Die Komplexität und der Aufwand eines Versuchsaufbaus nehmen mit den ansteigenden Ebenen zu. Wird auf der untersten Ebene bereits eine Eingrenzung der Variantenanzahl durchgeführt, so wirkt sich das auf die darauffolgenden Ebenen aus. Bestenfalls können aufwendige Hardwareversuche auf der Ebene der Verbund-/Prinzipbauteile und der Komponenten eingespart werden. Der Ansatz zielt darauf ab, in der untersten Ebene vermehrt kostengünstige Versuche durchzuführen, die es bereits erlauben Aussagen zu Funktionen im Fahrzeug zu machen und somit frühzeitig eine Varianteneingrenzung durchzuführen.

2. Einsatz nichtveredelter Rohstoffe

Der Einsatz nichtveredelter Rohstoffe in der Couponherstellung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mittels Faser-Direkt-RTM eröffnet neue Potentiale in der effizienten Entwicklung von Faserverbunden. Der bisherige Prozess in der Hardwareprüfung neuer Faser-Matrix-Systeme für RTM-Bauteile (Resin Transfer Moulding) ist in der Abbildung 3 im oberen Bildabschnitt dargestellt. Für die Untersuchung zum Beispiel unterschiedlicher Faservarianten werden die benötigten Mengen der Fasern zunächst hergestellt und für die Fertigung von Textilhalbzeugen verwendet. Anschließend erfolgen das Stacking und der Zuschnitt der Textilhalbzeuge. Der zugeschnittene Stack durchläuft schließlich den Preform- und Stanz-

prozess. Am Ende werden im RTM-Verfahren die ersten Laminatplatten gefertigt. Aus diesen Laminatplatten werden die Coupons für die Materialprüfung entnommen.

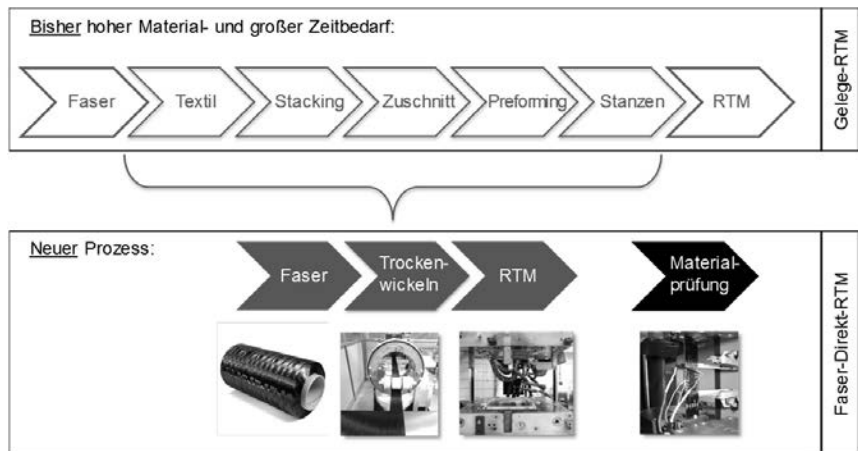


Bild 3: Prozesskette „Bisher“ und „Neu“ für die Laminatherstellung zur Materialprüfung.

Der neue Prozess verkürzt die Prozesskette zwischen der Faser- und der Laminatherstellung im RTM-Verfahren, siehe Abbildung 3 unterer Bildabschnitt. So werden aus den Fasern nicht mehr Textilien hergestellt und weiter verarbeitet, sondern nichtveredelt auf einen Metallträger aufgewickelt. Die bewickelte Platte wird direkt in ein RTM-Werkzeug eingelegt. Die damit gefertigten Laminatplatten stehen sodann der Materialprüfung zur Verfügung.

In dieser neuen Prozesskette reduziert sich die Menge der eingesetzten Fasern erheblich. So wird nur noch eine Faserspule statt wie bisher mindestens 15 Spulen für eine Gelegeherstellung im Labormassstab benötigt. Des Weiteren muss die Faserspule nur etwa 30% der Fasermenge im Vergleich zu Faserspulen für die Gelegeherstellung enthalten, was eine Folge der Komplexitätsreduzierung im Wickelprozess ist. Die Materialkosten für eine Laminatplatte werden durch die Einsparung an Material und den nun wegfallenden Prozessschritten auf 30% reduziert, siehe Abbildung 4. Gleichzeitig verringern sich die benötigten Arbeitstage auf die Hälfte. Das bedeutet, dass man nun bei gleichem Zeitbedarf eine doppelte Variantenanzahl an Versuchsmaterial herstellen kann, zu 60% der Kosten der ursprünglichen Menge.

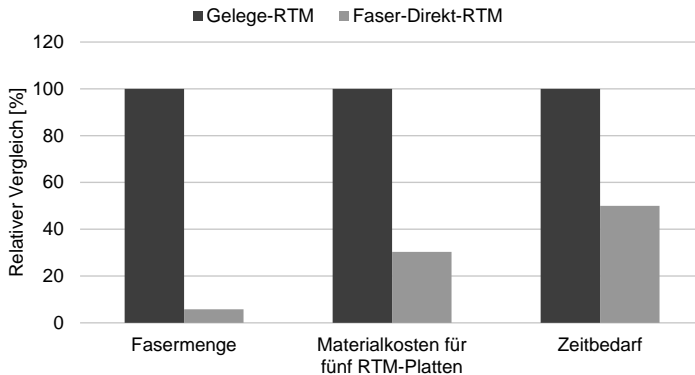
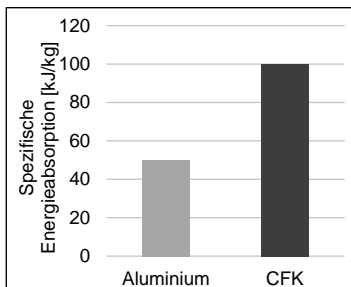
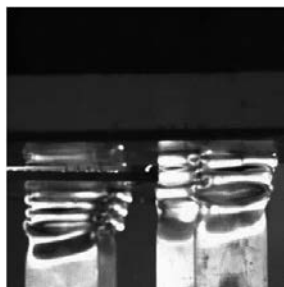


Bild 4: Vergleich Kosten und Aufwand für Gelege- und Faser-Direkt-RTM (Resin Transfer Moulding) basierend auf fünf RTM-Platten.

3. Einsatz von 2D-Crushing

Bei einer ebenen schlagartigen Belastung wird die Energie bei Metallen wie Aluminium durch duktile Deformation umgewandelt, siehe Abbildung 5 links. Hingegen erfolgt bei gleicher Belastung die Energieabsorption bei CFK-Laminatstrukturen durch Crushing, einem Brechen und Zerkleinern des Laminats, siehe Abbildung 5 rechts. Vergleicht man die spezifischen Energieabsorptionswerte, ergibt sich daraus ein theoretisches Leichtbaupotential von 50% bei CFK- zu Aluminiumstrukturen.

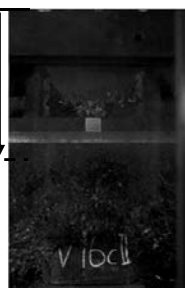
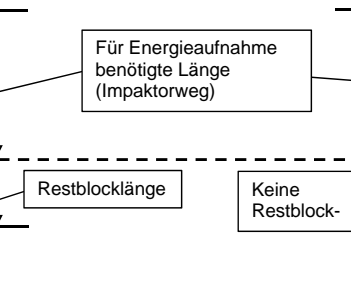
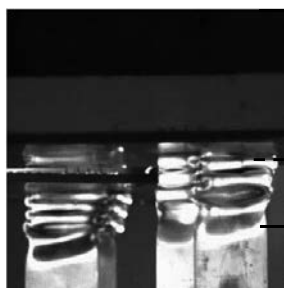
Überdies bildet sich bei der duktilen Deformation der Aluminiumstruktur ein Restblock, siehe Abbildung 6. Wenn ein Entweichen der gebrochenen CFK-Elemente sichergestellt wird, erfolgt hingegen die Energieabsorption durch Crushing des CFK's ohne Restblock. Dies kann zum Beispiel genutzt werden, um den Platzbedarf im Fahrzeugvorderbau durch den Einsatz von CFK-Profilen statt metallischen Strukturen in Fahrzeuginnenrichtung zu reduzieren. Die daraus folgenden Vorteile können in der geometrischen Integration, für vergrößerte Konstruktions- und Designfreiheiten genutzt werden.



Aluminium: Energieabsorption durch duktile Deformation

CFK: Energieabsorption durch Crushing

Bild 5: Vergleich der Energieabsorption von Aluminium und CFK unter ebener schlagartiger Belastung [4, 5].



Aluminium: Energieabsorption durch duktile Deformation → Bildung eines Restblocks	CFK: Energieabsorption durch Crushing → kein Restblock
---	--

Bild 6: Deformation des Aluminiumprofils mit Restblockbildung und Crushing des CFK-Profils [4, 5].

Zur frühzeitigen Bewertung und Sicherung der oben beschriebenen Anwendungsbeispiele und Potentiale wurden bei der BMW Group Crushingversuche basierend auf zweidimensionalen (2D) Versuchscoupons [6, 7] eingeführt. Das bedeutet: für die erste Bewertung der Crasheigenschaften von Faserverbundwerkstoffen sind nun keine aufwendigen dreidimensionalen (3D) Profilversuche mehr notwendig. Folglich findet der Austausch und Abgleich zwischen Hardware und Simulation im neuen Entwicklungspfad in der Entwicklungs-/Absicherungs-Pyramide eine Ebene früher statt wie bisher, siehe Abbildung 7. Mit den 2D-Crushingversuchen und dem Hardware-Simulations-Abgleich können auf der Coupon-Ebene bereits Aussagen zu dem Crushingverhalten, zum Beispiel im Fahrzeugcrash,

getroffen werden und eine erste Varianteneingrenzung durchgeführt werden. Nachfolgende und teure Crushingversuche mit Profilen werden damit zum Teil vermieden.

Um Aussagen zum Crushingverhalten von 3D-Geometrieelementen wie Kantenradien und Wandstärkenänderungen und deren Einfluss auf die CFK-Struktur im Crash zu erhalten, werden im 2D-Crushing standardisierte Laminat- und Versuchsaufbauten geprüft [6, 7]. So werden zum Beispiel in der Prüfvorrichtung für 2D-Crushing zusätzlich Bolzen verschraubt, um das gleiche Delaminations- und Crushingverhalten von 2D-Proben wie in Radien von 3D-Geometrien zu erhalten. Die Bolzen sind so angebracht, dass sie wie der Radius eines Profils eine frühzeitige Delamination in der Crushingzone verhindern können. Die Aussagekraft der 2D-Crushingversuche ist ausreichend um mit dessen Versuchsergebnissen Simulationsmodelle der Finite-Elemente-Methode (FEM) von 3D-Strukturen erstellen zu können. Mit diesen Simulationsmodellen können die ersten Variantenbewertungen und Strukturoptimierungen hinsichtlich Crushing erfolgen bevor die ersten 3D-Hardwareversuche durchgeführt wurden.

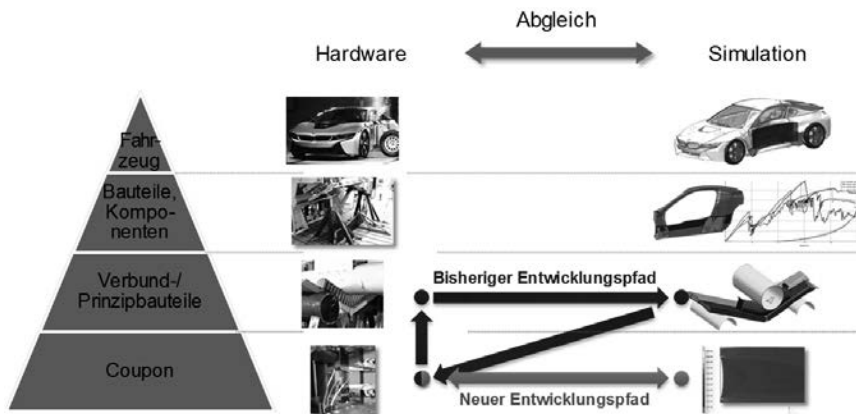


Bild 7: Entwicklungs-/Absicherungs-Pyramide [1 bis 3].

4. Zukünftige Herausforderungen

Die Mischbauweise und der damit verbundene Einsatz unterschiedlichster Werkstoffsysteme werden zur Erreichung zukünftiger Entwicklungsziele einen wesentlichen Beitrag leisten [8]. Die Entwicklung und Absicherung optimaler Lösungsräume bedeutet stets am Anfang eine hohe Variantenanzahl zu bewerten. Themen wie die Ermüdung der Fugestellen, der Korrosionsschutz sowie die unterschiedlichen thermischen Materialeigenschaften sind bei

Mischbauweisen zusätzlich intensiv zu betrachten. Zur effizienten und kostengünstigen Bewertung der Werkstoffvarianten bedarf es daher weiterer Versuchs- und Untersuchungsmethoden. Diese Methoden müssen bereits in frühen Entwicklungsphasen fundierte Bewertungen bezüglich des späteren komplexen Einsatzspektrums eines Fahrzeuges zulassen. So sind effiziente Absicherungsprogramme, basierend auf interdisziplinärem Anforderungsmanagement für Faserverbundstrukturen mit integrierten elektrischen Funktionsträgern, noch nicht durchgehend als Automobilstandard erarbeitet. Denkbare Beispiele sind hier CFK-Dächer mit Sensornetzen oder integrierter Heizfunktion [9].

Literatur

- [1] F. Dirschmid, T. Wolff und T. Weiss: The BMW i8. In: EuroCarBody, Bad Nauheim, 2014.
- [2] J. Kempf, R. Landmann, T. Müller: CFK-Klebetchnik beim BMW i8. In: VDI Kunststoffe im Automobilbau, Mannheim, 2015.
- [3] European Aviation Safety Agency - EASA: Certification Specification for Large Aeroplanes CS-25. 2003.
- [4] S. Engel, C. Boegle, J. Majamaeki, D.H.-J.A. Lukaszewicz, F. Moeller: Experimental Investigation Of Composites Structures During Dynamic Impact. The 15th European Conference On Composite Materials, Venice, 2012.
- [5] S. Engel, C. Boegle, D. Lukaszewicz: Crushing Of Composites Structures And Parameter Identification For Model Development. The 19TH International Conference on Composite Materials.
- [6] G. Barnes, S. Nixon, M. Schrank (2008): Composite Crush Simulation – Emerging Technologies And Methodologies. URL: <http://www.simulia.com/download/scs-papers/Automotive/composite-crush-simulation-emerging-technologies-2008-F.pdf> (Stand 03.12.2015)
- [7] T. Francis, J. Hobbs, D. O. Adams, R. Roberts, G. Barnes: Predicting Crashworthiness Of Composite Laminates Using Ply Decomposition. Aerospace Structural Impact Dynamics International Conference 2012.
- [8] M. Ahlers, Klaus Sammer: New BMW 7 series – Carbon Core, In: EuroCarBody, Bad Nauheim, 2015.
- [9] DE 102007040011 A1.

Das innovative "Hybrid Fleece Molding (HFM)" Konzept als nachhaltige Alternative im direkten Serienvergleich mit dem Türträger für den Volvo XC90

The innovative "Hybrid Fleece Molding" concept as a sustainable alternative in direct comparison to the series door carrier of the Volvo XC90

Dipl.-Ing. (FH) **F. Schumann**, Dipl.-Ing. **R. Ankele**,
IAC Group GmbH, Ebersberg;
M.Eng. **F. Jürgens**, IfBB, Prof. Dr.-Ing. **H-J. Endres**,
IfBB, Hochschule Hannover

Kurzfassung

In diesem Manuskript wird der Türträger des Volvo XC90 in zwei Herstellungs- und Materialvarianten hinsichtlich technischer und ökologischer Eigenschaften betrachtet. Besonderes Augenmerk wird auf die neuentwickelte Hybrid Fleece Molding Technologie gelegt, die die beiden Herstellungsverfahren Pressen und Spritzgießen in innovativer Weise miteinander kombiniert und zu nachhaltigen, leichten und steifen Trägerteilen für den automobilen Innenraum führt. Neben der technischen Betrachtung erfolgt auch eine erste ökologische Abschätzung für die Herstellungsphase und die Nutzungsphase bezogen auf das konventionelle Spritzgießverfahren und die Hybrid Fleece Molding Technologie.

1. Einleitung

Der moderne Automobilbau ist mehr denn je von einer Vielzahl sich häufig widersprechender technischer und wirtschaftlicher Anforderungen geprägt. Steigende Kundenanforderungen, strengere Gesetze und politische Randbedingungen fordern von den Fahrzeugherstellern leichte, verbrauchsarme und sichere Fahrzeuge. Der schonende Umgang mit den Energieressourcen und die gesetzlich vorgeschriebene Minimierung des CO₂-Ausstoßes, infolge der Problematik des Klimawandels, beeinflussen erheblich die Anforderungen zukünftiger Fahrzeuggenerationen. Hierbei stellt das Fahrzeuggewicht eine signifikante Stellgröße bei der Beeinflussung des Kraftstoffverbrauchs dar. [1]

Dabei wird auch vom automobilen Innenraum ein Beitrag zum notwendigen Leichtbau erwartet. Nur durch die gezielte Weiterentwicklung und den Einsatz von modernen Werkstoffen und Verarbeitungstechnologien können aktuelle Designs und zusätzliche Komfortfunktionen

gewichtsneutral umgesetzt werden. Standardmaterialien mit innovativen Eigenschaften, aber auch Verbundwerkstoffe, Verbundbauweisen sowie hybride Bauweisen schaffen neuartige Optionen für das Kraftfahrzeug von morgen. [2]

2. Hybrid Fleece Molding als alternative Fertigungstechnologie

Ein praktisches Beispiel, um mit vergleichsweise überschaubarem „Umdenken“ mehrere hundert Gramm pro Baugruppe zu sparen, ist das hier betrachtete Hybrid Fleece Molding (HFM). Dabei handelt es sich um eine Technologie der IAC Group, die sowohl auf maßgeschneiderten Materiallösungen als auch auf innovativen Prozessen und Werkzeugdetails basiert. Diese Innovation ermöglicht die Fertigung sehr leichter und trotzdem steifer Träger-teile, die in einem weiteren Prozessschritt entsprechend mit einer sichtbaren Oberfläche veredelt werden. Je nach Dekor ergeben sich ganz unterschiedliche Einsatzgebiete: HFM- Tür-träger bieten sich bspw. für Verkleidungsteile von Säulen, Türen und Kofferräumen an, aber auch für Sitzrücken und sogar als Träger in Instrumententafeln. In Bild 1 ist das konventionelle Spritzgießverfahren dem innovativen HFM- Verfahren gegenübergestellt und wird im Folgenden beschrieben.

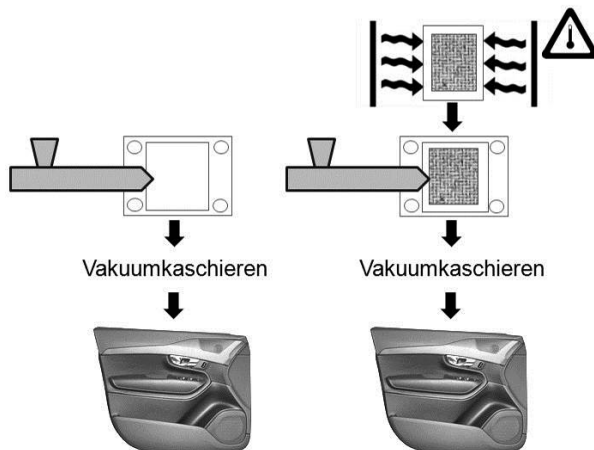


Bild 1: Spritzgießverfahren und Hybrid Fleece Molding

Grundsätzlich besteht ein HFM- Türträger aus einem thermoplastisch gebundenen Naturfasertträgerteil welches während des Pressformens gleichzeitig mit Kunststoff so hinterspritzt wird, dass alle benötigten Strukturen der Bauteilrückseite entsprechend gebildet werden.

Dies beinhaltet Rippenstrukturen aber auch Befestigungspunkte und Schweißbereiche. Die Geometriefreiheit des Urformverfahrens Spritzgießen im Vergleich zu konventionellen – und in jener Form im automobilen Innenraum seit Jahrzehnten bekannten Naturfaserpressträgern, erweitert außerdem die Möglichkeiten zusätzlicher Funktions- und Bauteilintegration. Am Beispiel einer Türverkleidung kann es sich dabei um Crashelemente handeln, aber auch um Haken oder (Kabel-) Clips.

Vorteilhaft für den Kunden sind im Vergleich mit konventionellen Spritzgießträgern Gewichtseinsparungen von bis zu 50 %, aber auch eben die Minimierung von zusätzlichen Bauteilen und Fügeverfahren zu deren Befestigung an den Träger und auch ganz generell die Verwendung nachwachsender Rohstoffe.

Die IAC Group entwickelt diese Technologie schon seit mehreren Jahren und kann bereits auf mehrere hochentwickelte Prototypen zurückblicken, siehe Bild 2.

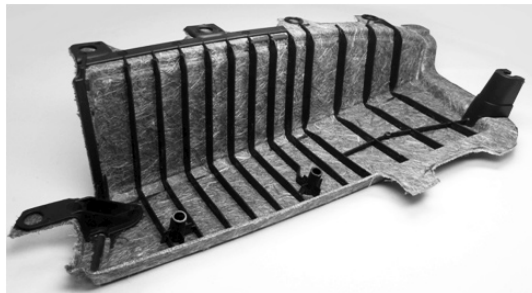


Bild 2: Rückseite einer Träger-Armauflage als Hybrid Fleece Molding Prototyp

Hierzu zählen die Armauflage für ein Skoda Modell, die B-Säule eines Daimler Fahrzeugs und nun auch die Fahrertürverkleidung für den aktuellen Volvo XC90. Diese Beispiele befinden sich jeweils als Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) Spritzgießträger in Serie. Außerdem befinden sich derzeit weitere HFM- Projekte in den USA in Erprobung.

3. Hybrid Fleece Molding in der Praxis

Im Folgenden soll das Herstellverfahren eines HFM- Trägers beleuchtet werden. Bei dem „Hybrid Fleece“ Halbzeug handelt es sich typischerweise um vorgeschchnittene, vernadelte Mischfaservliese mit Flächengewichten von 1000 g/m² (oder sogar darunter) bis 1600 g/m². Als Naturfasern kommen insbesondere Flachs, Kenaf, Hanf oder Jute in Betracht. Die Fa-

serauswahl und der Mattenaufbau sind dabei vom Bauteildesign und Verformungsgrad abhängig.

In einem ersten Schritt erfolgt die Durchwärmung der Matte in einer Flächenheizung, welche vorteilhafterweise gleichzeitig mit einem ersten Pressschritt erfolgt. Hierbei erfolgt eine Verdichtung der Matte. Die Prozessparameter und Prozessführung in diesem Schritt beeinflussen nicht nur die mechanischen Eigenschaften des späteren Fertigteils, sondern stellen auch die Vermeidung von Geruchsproblemen sicher, bspw. in dem die thermische Belastung der Naturfaser auf ein Minimum begrenzt wird.

Diese nun heiße und biegeschlafe Matte wird anschließend in ein Presswerkzeug überführt (bspw. Nadelgreifer) und unverzüglich auf die gewünschte Endwandstärke (bspw. 1,5 mm) verpresst. Dabei ist es unerheblich, ob es sich um ein vertikales Presswerkzeug auf einer Spritzgießmaschine handelt oder um ein Werkzeug auf einer Horizontalpresse, die mit einem geeigneten Spritzgießaggregat erweitert wurde.

Das Presswerkzeug verfügt in jedem Fall über die technische Ausstattung, um den gleichzeitig stattfindenden Spritzgießprozess zu ermöglichen und zu steuern. Im vorliegenden Fall der Türverkleidung wird ein Heißkanalsystem mit sieben Anspritzpunkten und Nadelverschlußdüsen eingesetzt. Unterschiedliche Kunststoffe haben sich hierbei bereits bewährt, unter anderem sind dies hochfließende Polypropylen- (PP) Typen mit 30 % Glasfaserfüllung (GF). Nachdem die eigentliche Kavitätsfüllung im Falle von HFM ausschließlich über Rippenstrukturen erfolgt, ist die Schmelzeviskosität eine kritische Größe und die Füllsimulation als Hilfsmittel zur Bauteilgestaltung unabdingbar. Die Werkzeugtemperaturen werden dabei so optimiert, dass ein Kompromiss von Abkühlzeit (der Matte) und Füllbarkeit (der Rippen) gegeben ist. Weiterhin erfolgt während des Schließens ein Beschnitt der Außengeometrie des Bauteils. Der überstehende Rand der Matte wird dabei abgetrennt, verbleibt aber bis zur Teileentnahme im Werkzeug.

4. Ökobilanzierung als Werkzeug zur ökologischen Bewertung

Um Leichtbautechnologien nachhaltig und ökologisch sinnvoll einzusetzen, muss immer die Ökobilanz des gesamten Lebenszyklus betrachtet werden. Die durch Leichtbau erzielte Energieeinsparung in der Nutzungsphase kann möglicherweise durch eine besonders energieintensive Herstellungsphase egalisiert werden. [3]

Die Ökobilanz ist ein ingenieurtechnisches Instrument, welches Flüsse von Inputs und Outputs (Stoff- sowie Energieströme, die in den Prozess mit eingehen und die aus dem Prozess

hervorgehen) sowie potentielle Umweltauswirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges oder eines Abschnitts des Lebensweges zusammenstellt und beurteilt. [4] Den internationalen Normen EN ISO 14040 und 14044 nach gliedert sich die Ökobilanz in vier Teilabschnitte, siehe Bild 3.

Der Umfang der Untersuchung und die daraus resultierenden Systemgrenzen sowie die sogenannte funktionelle Einheit (Bezugsgröße) werden im ersten Schritt festgelegt. Im zweiten Schritt wird eine Sachbilanz erstellt, die alle relevanten Stoff- und Energieflüsse (Input und Output) erfasst.

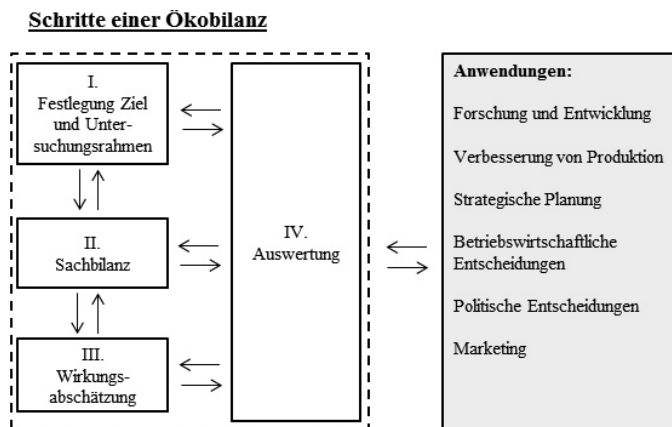


Bild 3: Schritte einer Ökobilanz [4]

Diese gilt als Basis für die Wirkungsabschätzung, die als dritter Schritt durchgeführt wird. Hierbei werden die Sachbilanzergebnisse den unterschiedlichen Wirkungskategorien zugeordnet (beispielsweise Treibhauspotential, Versauerungspotential oder Eutrophierungspotential). Abschließend werden im vierten und letzten Schritt einer Ökobilanz die Analyse und Auswertung der Bilanzergebnisse durchgeführt, sowie daraus abzuleitende Schlussfolgerungen und Empfehlungen getroffen. Ökobilanzen können zum Aufzeigen von Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Produkten in verschiedenen Phasen ihres Lebensweges, zur Entscheidungsfindung in Industrie, Regierung oder nichtstaatlichen Organisationen sowie zu Marketingzwecken verwendet werden. [4]

Ein wichtiger weiterer Bestandteil der Ökobilanz nach ISO 14040/44 ist auch eine kritische externe Prüfung durch Gutachter, die die Einhaltung der Vorgaben in den Standards verifiziert. Bei Forschungs- und Entwicklungsprojekten bieten erste ökologische Abschätzungen

Im Rahmen der Übersichts-Ökobilanz wurden die Wirkungskategorien abiotischer Ressourcenverbrauch, Versauerungs-, Eutrophierungs-, Treibhaus-, Ozonabbau- und Sommersmogpotential betrachtet. Die Bilanzierung und Wirkungsabschätzung erfolgt mittels der Ökobilanzierungssoftware GaBi und der Wirkungsabschätzungsmethode CML 2001 – Version April 2013.

Herstellungsphase

Die Herstellungsverfahren für die unterschiedlichen Türträger unterscheiden sich signifikant. So findet zur Herstellung des konventionellen Türträgers das bereits lang etablierte Verfahren Spritzgießen Anwendung. Beim neuartigen Türträger wird hingegen das innovative HFM-Verfahren in Kombination mit einer Heißpresse angewendet. Auch die Rohstoffgrundlagen unterscheiden sich bei den verschiedenen Türträgern. Wird bei dem konventionellen Türträger ausschließlich ABS verwendet, so kommt stattdessen bei der Neuentwicklung ein Vlies aus Flachs- und Polypropylenfasern sowie PP-GF30 zum Hinterspritzen zum Einsatz, siehe Bild 5.

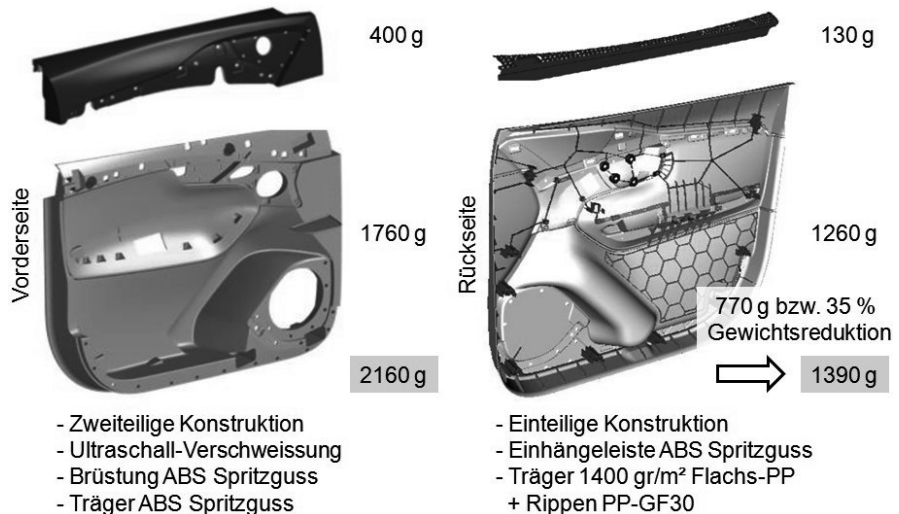


Bild 5: Das konventionelle Konzept der Türverkleidung Volvo XC90 im Vergleich mit dem Hybrid Fleece Molding Prototyp

Um eine möglichst genaue ökologische Bewertung gewährleisten zu können, wurden die jeweiligen In- und Outputs bei den unterschiedlichen Herstellungsverfahren von der IAC Group in Kooperation mit dem IfBB gemessen.

Neben diesen Primärdaten wurden zudem Sekundärdaten verwendet. Bei den Sekundärdaten handelt es sich um Daten aus den Datenbanken der Ökobilanzierungssoftware GaBi. Beispiele hierfür sind die Datensätze vom ABS sowie den Transportprozessen. Eine weitere Übersicht der Rohstoffgrundlagen, Herstellungsverfahren und Datengrundlage gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Allgemeine Informationen zu den unterschiedlichen Türträgern

	Konv. Türträger	HFM- Türträger
Rohstoffgrundlage	- ABS	- Flachs- und PP- Vlies - PP + 30 % GF
Herstellungsverfahren	- Spritzgießen	- Hybrid Fleece Molding
Datengrundlage	- Primär- und Sekundärdaten	- Primär- und Sekundärdaten

Eine vorläufige Abschätzung der ökologischen Auswirkungen in der Herstellungsphase ist in Bild 6 für unterschiedliche Wirkungskategorien dargestellt.

Die Basis für den Vergleich der verschiedenen Türträger bildet der konventionelle Türträger, welcher mit 100 % angenommen wird.

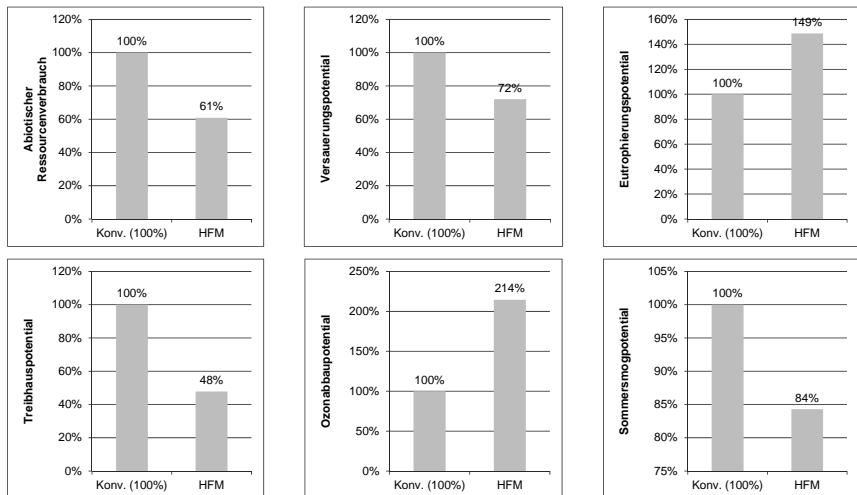


Bild 6: Ökologische Auswirkung der Herstellung des konventionellen Türträger (konv.) und des HFM-Türträger (HFM)

In den Wirkungskategorien Eutrophierungs- und Ozonabbaupotential weist das HFM- Bauteil zuweilen größere Nachteile gegenüber dem herkömmlichen Bauteil auf. Hierfür ist vor allem die Flachsfaser- sowie die Polypropylenfaser-Produktion im direkten Vergleich zum ABS ausschlaggebend. Insbesondere der Anbau des Flachses, mit dem wiederum landwirtschaftliche Prozesse wie bspw. Düngung oder Röste einhergehen, ist für die Mehremissionen maßgeblich. In den restlichen Wirkungskategorien weist der neuartige HFM- Türträger ökologische Vorteile gegenüber dem konventionellen Türträger auf. Insbesondere beim Treibhauspotential, mit einer Minimierung der Emissionen von ca. 52 %, schneidet der HFM- Türträger deutlich besser ab.

Nutzungsphase

Während der Nutzungsphase besitzt der Türträger keine direkten ökologischen Auswirkungen. Sie setzen sich im Automobilsektor somit ausschließlich aus dem Benzinverbrauch und der Herstellung des Benzins zusammen. Durch Einsparungen von Gewicht und daraus resultierende Kraftstoffeinsparungen können jedoch ökologische Auswirkungen, wie bspw. Kohlendioxidemissionen, reduziert werden.

Durch die Substitution des neuen Türträgers wird zudem im vorliegenden Fallbeispiel die Brüstung als Bauteil eingespart, was wiederum eine Gewichtsreduzierung zur Folge hat,

vergleiche hierzu auch Bild 5. Diese weitere Einsparung wurde in der Abschätzung aber noch nicht berücksichtigt.

In Bild 7 ist exemplarisch der Einfluss der Fahrleistung (von 0 bis 250.000 km) auf das Treibhauspotential dargestellt. Die Basis bildet wiederum die Auswirkung der Herstellung des konventionellen Türträgers mit 100 %. Entsprechend startet der HFM-Türträger mit einem Wert von 48 %.

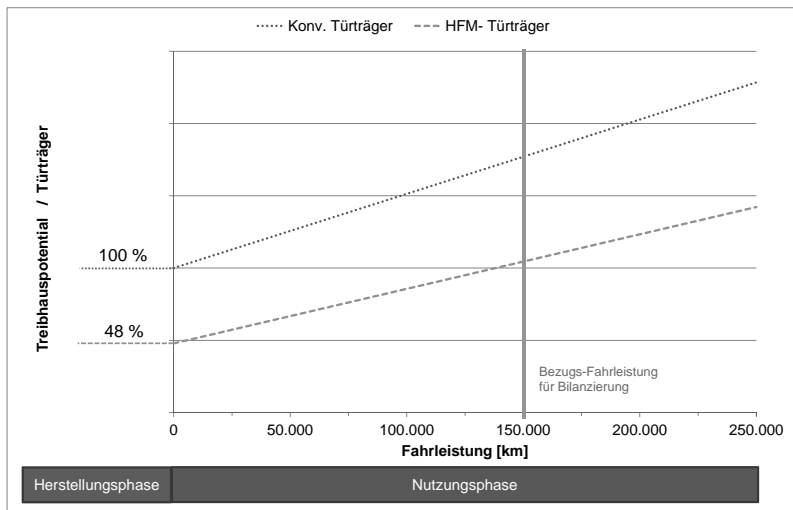


Bild 7: Einfluss der Fahrleistung auf das Treibhauspotential des konventionellen Türträgers und des HFM-Türträgers.

Aufgrund des geringeren Gewichtes des HFM- Türträgers im Vergleich zum konventionellen Türträger, hat dieser ebenfalls einen Vorteil beim Treibhauspotential über die gefahrenen Kilometer. Analog verhält es sich für alle weiteren betrachteten Wirkungskategorien, da die einzige Stellschraube in der Nutzungsphase das Gewicht und somit der Kraftstoffverbrauch ist. Für die hier durchgeführte Bilanzierung wurde eine Fahrleistung von 150.000 km angenommen und auf die technischen Daten des Volvo XC90 unter Berücksichtigung der CO₂-Emissionen bezogen. Bei 150.000 km ergibt sich für den HFM- Türträger eine Einsparung in der Nutzung von 27 % gegenüber dem konventionellen Türträger bezogen auf das Treibhauspotential.

Lebenszyklus (ohne End-of-Life)

Entsprechend ergeben sich aus den ökologischen Auswirkungen der Herstellungs- und der Nutzungsphase folgende Gesamtwerte für die unterschiedlichen Wirkungskategorien, siehe Bild 8. Hierbei wurden die Auswirkungen des konventionellen Türträgers jeweils mit 100 % angenommen und der HFM-Türträger hierauf bezogen.

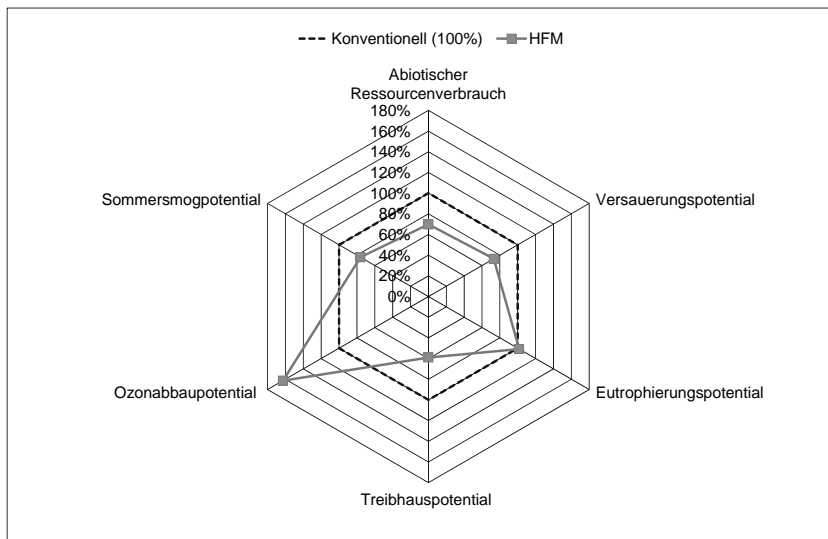


Bild 8: Ökologische Auswirkungen während des Lebenszyklus (Herstellungs- und Nutzungsphase) für konventionellen Türträger (konv.) und den HFM-Türträger (HFM)

Der HFM-Türträger zeigt unter Berücksichtigung der Herstellungs- und der Nutzungsphase bis auf die Wirkungskategorie Ozonabbaupotential Vorteile gegenüber dem konventionellen Türträger. In der wichtigen Wirkungskategorie Treibhauspotential werden Einsparungen von ca. 41 % erreicht (Dies ergibt sich aus den unterschiedlichen Absolutwerten der Herstellungsphase und der Nutzungsphase die zum Einsparungspotential beitragen).

6. Ausblick

Das Hybrid Fleece Molding Konzept bietet ein erhebliches Leichtbaupotenzial für großflächige Trägerteile im automobilen Innenraum. Bei entsprechender Umsetzung dieser innovativen Technologie kann anhand des vorgestellten Prototypens eine Gewichtseinsparung von bis zu 2,5 kg für die vier Türen eines SUV abgeschätzt werden.

Die vorliegende Übersichts- Ökobilanz bildet zudem einen ersten Schritt zur ökologischen Bewertung dieses Verfahrens. Betrachtet man den Lebenszyklus, wirkt sich das geringere Gewicht im Vergleich mit konventionellen Spritzgießträgern grundsätzlich sehr vorteilhaft aus. Die Verwendung von Naturfasern ermöglicht und unterstützt dies, allerdings wirken sich speziell die hier verwendeten Flachsfasern unterschiedlich auf die Wirkungskategorien in der Herstellungsphase aus. In einem weiteren Schritt sollten die erhobenen Werte durch Erstellung einer ISO-konformen Ökobilanzierung über den gesamten Lebenszyklus validiert werden und andere Faserarten in Betracht gezogen werden.

7. Literatur

- [1] Vollrath, K.: Leichtbau- Offensive beim Automobilbau. Blech- Rohre- Profile (2001) 2 S. 57- 58
- [2] Krenkel, W.: Verbundwerkstoffe: 17. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Darmstadt: Betz- Druck- Gmbh 2009
- [3] Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden Württemberg (e- mobil BW GmbH) & Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA): Leichtbau in Mobilität und Fertigung. Stuttgart: Fraunhofer Informationszentrum IRB 2012.
- [4] Deutsches Institut für Normung – DIN: Umweltmanagement- Ökobilanz- Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040: 2006) und Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006). Berlin: Beuth- Verlag 2006.
- [5] Lehrstuhl für Bauphysik der Universität Stuttgart, Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung: Ökobilanz und Ganzheitliche Bilanzierung 2015.
<http://www.lbp-gabi.de/46-0-Oekobilanz-und-Ganzheitliche-Bilanzierung.html>
(Zugriff: 24.11.2015)

Thermoplastische Crashabsorber aus PC/PBT (Makroblend®) als Teil des Seitenschutzkonzept des BMW i3

Dipl. Ing. (FH) **E. Meurer**, Covestro Deutschland AG, Leverkusen;
Dipl. Ing. (FH) **M. Hanigk**, BMW AG, München

Abstrakt

Auslegung und Realisierung einer energieabsorbierenden Struktur zur Reduzierung der Belastungen der tragenden Struktur im Falle des Seitencrash.

Das Crashkonzept des i3 sieht vor, den Energieeintrag auf die Karosseriestruktur zu reduzieren, die Intrusion zu begrenzen und die Verzögerungen zum Schutz der Hochvolt (HV)-Komponenten auf einem konstanten Niveau zu halten. Hierzu sind duktile Werkstoffe mit einem konstanten mechanischen Verhalten über einen breiten Temperaturbereich zwingend erforderlich. Bedingt durch den begrenzten Bauraum, ist ein definiertes Verformungsverhalten mit entsprechender Energieaufnahme des absorbierenden Systems notwendig, das für die Anforderungen aus Belastungen, Einsatztemperatur die Fahrzeugsicherheit gewährleistet.

Zur Entwicklung einer geeigneten Absorberstruktur wurden an Prototypen Vergleichsversuche durchgeführt. Der gemeinsame Abgleich des Verformungsverhalten der Prototypen ermöglichte die Optimierung von Materialkarten für die Finite Elemente Simulation, an Hand derer das finale Bauteil ausgelegt werden konnte. Die Versuche wurden in den Labors bei BMW erstellt, während bei Covestro die Simulationen durchgeführt wurden. Über diese Definition des Bauteilverhaltens, wurde in der Crashsimulation, das Verhalten des Gesamtfahrzeuges ausgelegt.

Eine weitere Herausforderung lag in der Gestaltung des Bauteiles und den Folgen für den Spritzguss. Bedingt durch die komplexe Wabenstruktur mit extrem geringer Entformungsschräge und der Länge der Kerne im Werkzeug musste eine Lösung entwickelt werden, die die Verknüpfung von rheologischen Ergebnissen mit dem mechanischen Verhalten zur Bestimmung der Entformungskräfte ermöglicht.

Die gute und enge Zusammenarbeit zwischen BMW und Covestro (ehemals Bayer Material Science AG) unter Einbeziehung des Prototypen- und Bauteilzulieferanten, Fa. Eckerle, ermöglichte einen reibungslosen Projektablauf.

Motivation:

Die weltweiten gesellschaftlichen, ökonomischen und ökologischen Veränderungen verlangen nach neuen Lösungen für die individuelle Mobilität speziell für den städtischen Raum. Elektromobilität ist dabei ein wesentlicher Schritt um nachhaltige Lösungen für die Zukunft zu entwickeln.

Geplant wurde der BMW i3 als das erste konsequent nachhaltig und von Beginn an als Elektrofahrzeug gestaltete Fahrzeug für ein urbanes Umfeld: maßgeschneidert für emissionsfreien Elektroantrieb und intelligente Fortbewegung in der Stadt und beim Pendeln.

Die BMW typische Fahrfreude bei null Emissionen, ein großes Platzangebot trotz kompakter Abmessungen optimiert für den Einsatz in der Stadt und den Anspruch hoher passiver Sicherheit galt es mit diesem Fahrzeug umzusetzen.

Dabei basiert der BMW i3 auf dem Konzept der LifeDrive-Architektur, d.h. sie setzt auf eine Kombination aus einem Drive-Modul (Rolling Chassis aus Aluminium mit sämtlichen Antriebskomponenten inkl. Hochvoltpeicher) und einem Life-Modul mit einer Fahrgastzelle aus CFK (Bild 1).

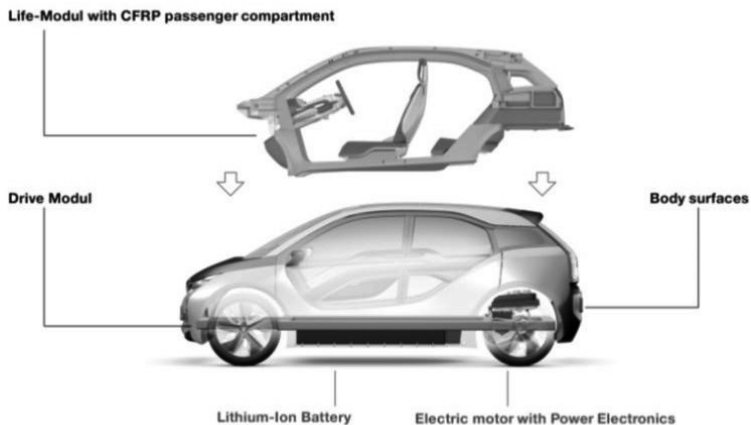


Bild 1: Prinzip der Life-Drive Trennung

Die Life-Zelle in CFK-Bauweise ermöglicht eine enorme Gewichtsreduktion (ca. 250-350 kg gegenüber einem vergleichbarem Conversion Fahrzeug mit E-Antrieb), was sich auf Reichweite und verbesserte Fahrdynamik auswirkt. Weiter kann so eine optimale Ausnutzung des Innenraums und eine sehr gute Crash-Sicherheit umgesetzt werden.

Anforderungen an die Struktur:

Der revolutionäre Ansatz der Life-Drive Architektur in Aluminium- und CFK-Technologie erfordert ein abgestimmtes Crashkonzept. Das Crashkonzept wurde so ausgelegt, dass die Front- und Heckcrash Lastfälle von der metallischen Struktur des Drive-Moduls aufgenommen werden und für den Seitencrash die Life-Zelle verantwortlich ist. Hier gilt es zum Einen den Überlebensraum der Insassen zu sichern als auch die Belastung auf den Hochvoltspeicher zu reduzieren.

Zentraler Baustein der gesamtheitlichen Betrachtung war der Hochvoltspeicher. Daraus wurden Anforderungen, welche Bauräume als Deformationszone genutzt werden können, welche Komponenten als mittragend ausgelegt sein müssen und wo aus HV-Sicherheitsgründen keine Deformation mehr zulässig ist, definiert (Bild 2).

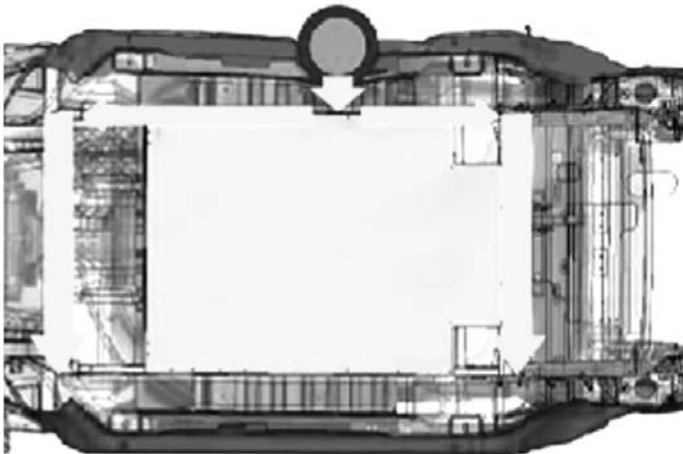


Bild 2: Lastpfade um den HV-Speicher herumgeführt

Zur Erfüllung der Seitencrashanforderungen sind der FMVSS214 Oblique Pole und IIHS Barriere Seite hervorzuheben, da diese Anforderungen primär durch die Life-Zelle in CFK-Bauweise sichergestellt werden müssen.

Im Lastfall Pfahl Seite muss die Karosseriestruktur so viel Energie aufnehmen, dass die Pfahlintrusion vor dem Auftreffen auf den HV-Speicher vollständig absorbiert wird. Dabei steht nur ein Weg < 300mm zur Verfügung. Verantwortlich hierfür ist die Dimensionierung des HV-Speichers, da dieser aus Gründen der Reichweite den Bauraum belegt.

Der Seitenrahmen aus CFK zeichnet sich durch eine hohe Festigkeit aus, dessen Versagen die Energieaufnahme begrenzt. Der Seitenrahmen außen nimmt den ersten Teil der aufgebrachten Energie auf. Die Crashwabe ist für den Großteil der Energieabsorption verantwortlich und leitet die Lasten weiter flächig in den Seitenrahmen innen ein. Der Seitenrahmen innen, als Zuggurt ausgelegt, leitet die Lasten über den Crasheschaum- Schweller und die Verstärkung Schweller an den Sitzquerträger weiter [1].

Die Crashwabe, dargestellt in Bild 3, leistet den höchsten Anteil zum Energieabbau. Im Weiteren wird auf deren Entwicklung und die speziellen Anforderungen eingegangen.



<<

(Bild 3: Thermoplastische Crashwabe mit Einbauort)

Beschreibung der Lösungsansätze:

Das erforderliche Energieniveau für die Absorberstruktur ergibt sich aus dem Gesamtfahrzeugverhalten und dem bekannten Widerstandsmoment der Struktur des Hochvoltspeichers. Bedingt durch die Aufprallgeschwindigkeit, die Masse des Fahrzeugs und der verfügbaren Deformationstiefe war das Absorptions-Niveau klar definiert. Das dieser Energieabbau nur über einen Deformationsprozess zu erzielen war stand schnell fest. Des Weiteren musste ein möglichst konstantes Kraftniveau über den zur Verfügung stehenden Weg erreicht werden. Zink-Schaum oder Aluminium-Waben erwiesen sich auf Grund der hohen Ansprechschwelle oder dem geringen Stauchvolumen als nicht ideal. Auch die PU-Schaumsysteme konnten die erforderlichen Anforderungen nicht erfüllen. Ein Vergleich der plastischen Energieaufnahme bezogen auf die Materialkennwerte sind in Bild 4 zu sehen. So konzentrierte sich die Suche auf eine Werkstoff-Struktur-Kombination, die eine definierte Steifigkeit (Ansprechschwelle) und eine lange Verformungsstrecke ermöglicht.

Als Geometrie bietet sich eine Wabenstruktur an, die in Kombination mit einem duktilen Werkstoff in einem Beulvorgang regelrecht gefaltet wird und bis zur Blockbildung konstant Energie absorbiert. Ein weiterer Vorteil der Wabenstruktur ist in der Eigenstabilisierung zu

finden. Die einzelnen Waben sind miteinander verbunden und geben somit den Faltungsweg vor.

Nicht nur die Gestaltung und Materialwahl der Fahrzeugzelle war für alle Beteiligten Neuland sondern auch die Anforderungen an die in der Struktur verbauten Komponenten. Schon in der frühen Entwicklungsphase kristallisierte sich die Notwendigkeit einer engen zielgerichteten Zusammenarbeit der Partner heraus. Auch wenn das allgemeine Produktverhalten bekannt war, so waren die Auswirkungen der Gestaltung und der Verbaulage auf das Bauteilverhalten unbekannt und mussten iterativ von den Entwicklungspartnern ermittelt und zusammengefügt werden.

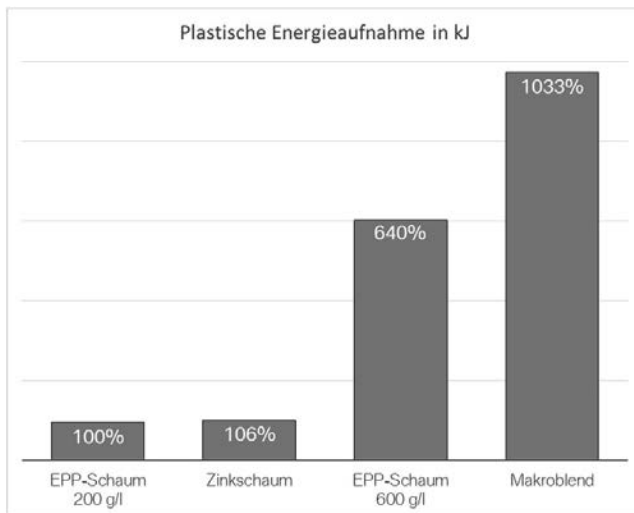


Bild 4: Vergleich Energieaufnahme verschiedener Werkstoffe

Im Zusammenspiel der drei Entwicklungspartner (Produkt, Material, Fertigung) konnte jeder sein spezielles Knowhow zur optimalen Ergebnisfindung beisteuern.

Werkstoffauswahl:

Auf Basis des gesamtwerkstofflichen Vergleiches konzentriert sich die Suche nach einem geeigneten Werkstoff auf zwei artverwandte Werkstoffgruppen. Auf der einen Seite die mehrphasigen rein amorphen Produkte und andererseits die amorphen Werkstoffe mit teilkristallinem Blendanteil. Hier bieten sich besonders die Polycarbonat (PC) basierten Blends

an. Das Polycarbonat zeichnet sich durch ein gleichmäßiges Werkstoffverhalten über einen breiten Temperaturbereich aus, die anderen Blendpartner zum Beispiel ABS oder PBT sind für verbesserte Zähigkeit besonders bei geringen Temperaturen verantwortlich. Auf Grund von Erfahrungen in ähnlichen Anforderungsprofilen und der Sichtung der mechanischen Kenngrößen der Produkte kamen letztendlich drei Produkte in die Endauswahl. Dies waren ein hochschlagzäh modifiziertes PC/ABS Bayblend® T65 HI, was ein amorphes Produkt der Fa. Covestro darstellt. Weiter ein PC/PBT Blend, das in einer vergleichbaren Anwendung schon zum Einsatz gekommen ist. Und schließlich Makroblend® KU2-7912/4, ebenfalls ein PC/PBT Blend von Covestro, das bis heute noch in Stoßfängerverkleidungen zum Einsatz kommt.

Durch Versuche an Prototypen wurden die Eigenschaftsprofile der Werkstoffe miteinander verglichen und hinsichtlich Ihrer Leistungsfähigkeit bewertet.

Das rein amorphe Produkt weist neben einer hohen Duktilität eine hervorragende Wärmeformstabilität bis zu $T=100^{\circ}\text{C}$ auf [Bild 5] mit annähernd konstanten mechanischen Eigenschaften und wurde daher zunächst favorisiert.

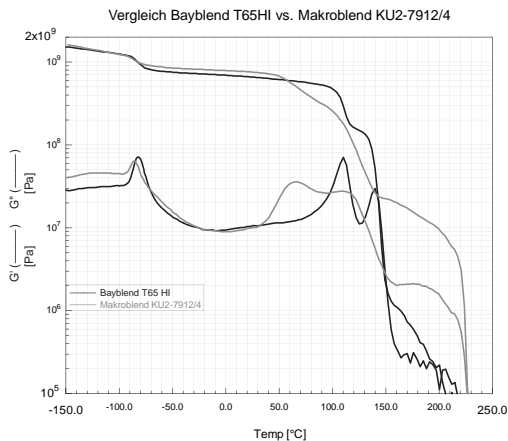


Bild 5: Schubmodulkurven von Baybend T65HI und Makroblend KU2 7912/4 im Vergleich

Bei Stauchversuchen der Prototypen Waben, insbesondere nach einem Klimawechseltest und niedrigen Prüftemperaturen, zeigt allerdings das Makroblend KU2-7912/4 ein homogenes Verformungsbild mit der gewünschten gleichmäßigen Faltenbildung.

Obwohl das rein amorphe Bayblend eine höhere Wärmeformbeständigkeit aufweist zeigte sich der Werkstoff Makroblend über alle Temperaturbereiche in seiner Deformationseigenschaft homogener, was schließlich ausschlaggebend für die Materialauswahl war.

Abgleich von Bauteilverhalten mit Simulationsmodell und Erstellung einer Materialkarte:

Ein essentieller Schritt in der Umsetzung des Projektes lag in der Validierung, der Werkstoffkennwerte an einer vergleichbaren Geometrie.

Basierend auf den Grundkennwerten der Kunststoffe konnte mittels Versuchen bei BMW die Weiterentwicklung von Materialkarten bei Covestro durchgeführt werden. Erste Schlagversuche an Prototypen ergaben einen guten Einblick in das Potenzial der ausgesuchten Werkstoffe und erlaubten Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten des Absorbers (Bild 6). Dies ist bedingt durch den begrenzten Bauraum im Fahrzeug ein wichtiges Entscheidungskriterium.

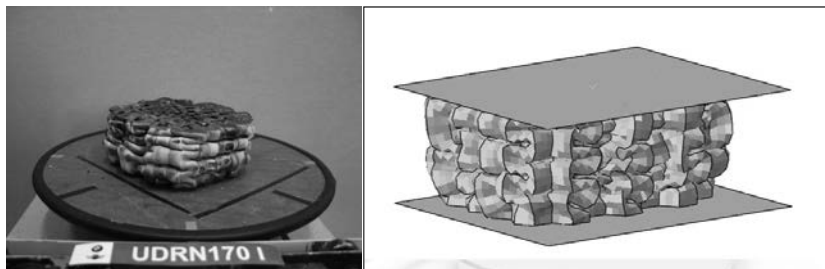


Bild 6: Prototyp und FE-Modell im Vergleich zur Bestimmung des Deformationsverhaltens

Die durch den Versuch ermittelten Kraft-Weg Diagramme wurden mit den Ergebnissen aus der Simulation verglichen. Effekte, wie der Einfluss die Wabenstruktur im Gesamten, der Deformationsvorgang der einzelnen Waben und der Versteifungsprozess des Wabenkörpers wurden an Hand von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ermittelt und mit den Simulationen verglichen (Bild 7).

Eine große Herausforderung war der Einfluss der Modelldiskretisierung um zum einen das geometrische Faltenbeulen hinreichend genau abbilden zu können, auf der anderen Seite jedoch auch ein für den Gesamtfahrzeugcrash geeignetes Modell zu erstellen. Ein zu grobes Modell führte gerade im frühen Stadium der Verformung zu unrealistischen Kraftpeaks.

So war es zum Beispiel erforderlich, das Versagensverhalten in Abhängigkeit des Spannungszustandes und der Dehnraten so anzupassen, dass die im Crash entstehenden Dehnraten nicht zu einem unrealistischen Versagen der Geometrie führen konnten.

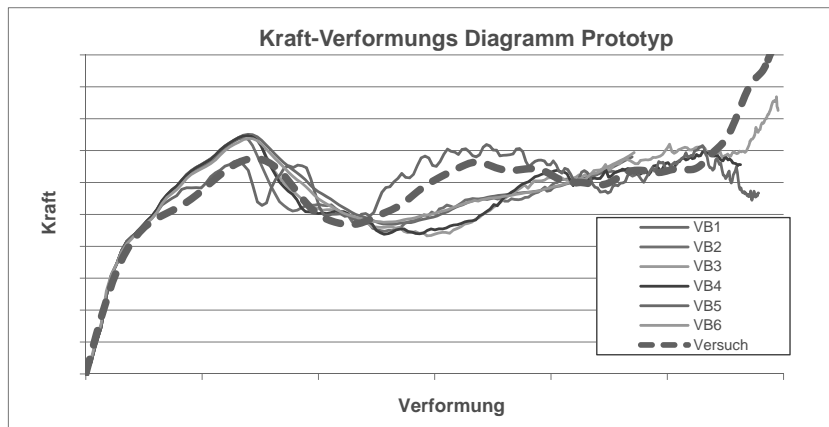


Bild 7: Identifikation von Einflussparametern auf das Kraft-Verformungs-Verhalten

Ein entscheidender Punkt in der Auslegung des Absorbers ist das Erstellen einer umfangreichen Datenbasis um das Bauteilverhalten ausreichend beschreiben zu können. Hier lieferte der Einsatz von unterschiedlichsten Komponentenversuchen mit umfangreicher Bildauswertung die nötigen Erkenntnisse um eine Validierung durchzuführen.

Nach den Versuchen wurden die Probekörper geschnitten, um einen Vergleich des Faltenbilds zu erstellen. Eine Notwendigkeit, um die Effekte auf die gewählte Diskretisierung des Finite-Elemente-Modells zu übertragen.

Eine weitere Kenngröße für das Bauteil ist das Verhalten bei verschiedenen Temperaturen. Sowohl bei niedrigen Temperaturen (-30°C) als auch bei hohen Temperaturen (+85°C) sind vergleichbare Eigenschaften darzustellen, um ausreichende Fahrgastsicherheit über den gesamten Anwendungsbereich zu gewährleisten. Die Materialkarten galt es im gesamten Temperaturbereich zu validieren, um eine gute Prognosegüte des Versagensverhaltes der Wabenstruktur zu gewährleisten.

Dass dann trotz sorgfältiger Vorbereitung immer wieder Überraschungen auftreten können zeigten, die bei -30°C durchgeführten Validierungsversuche. Beim Auftreffen der Fallmasse auf den Prüfkörper wurde dieser regelrecht gespalten. Dieser Effekt trat nach der Einbringung der Trigger-Phasen erstmals auf (siehe auch Bild 8). Dieses Versagensverhalten konnte aus der Simulation direkt nicht entnommen werden. Lediglich hohe Dehnraten in den

Randzonen der Geometrie waren ein Hinweis auf ein mögliches Materialversagen bei hoher Verformungsgeschwindigkeit und geringen Temperaturen.

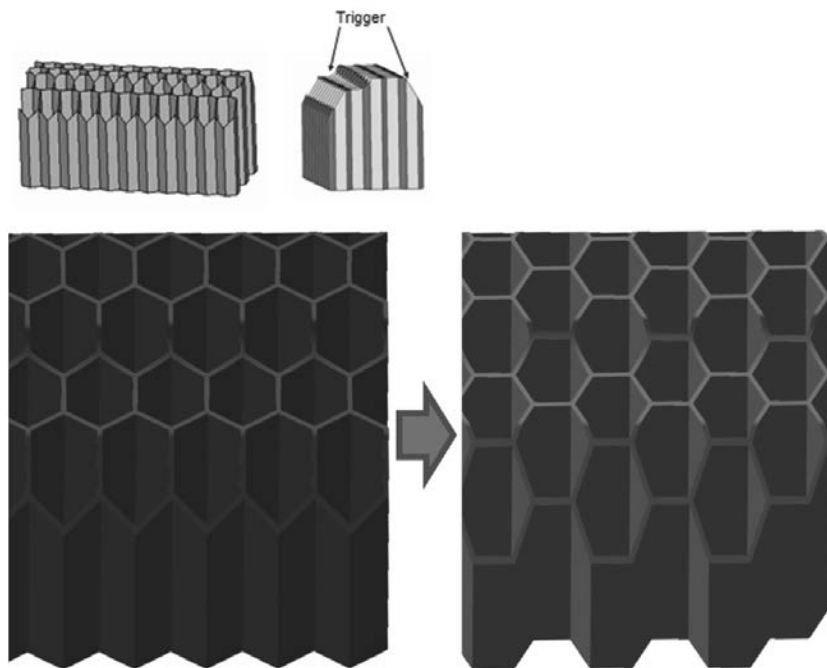


Bild 8: Prinzipielle Drehung der Waben

Durch eine Drehung der Waben um 30° (Bild 8) und somit eine dachförmige Gestaltung der primären Aufschlagszone konnte der Verformungsvorgang im kritischen Bereich vergleichmäßig werden. Somit wurden Spannungsspitzen vermieden und eine Risspropagierung in der Außenzone unterbunden.

Um einen vergleichbaren Verformungsverlauf in der Simulation darzustellen, war eine feine Vernetzung der Bauteilgeometrie erforderlich. Dieses Feinmodell war nicht für den Einsatz in die Gesamtfahrzeugsimulation geeignet. Die Erstellung eines Grobmodells, dass sowohl das Verformungsverhalten hinreichend genau abbildete, als auch als Submodell direkt, ohne die Rechenzeiten in die Höhe zu treiben, in die Gesamtfahrzeuganalyse eingebunden werden konnte, erfolgte zeitgleich. So wurde die gleiche Netzfeinheit für die Validierung des Komponentenversuchs verwendet, welche auch für die Gesamtfahrzeugsimulation notwen-

dig ist. Treiber hierfür sind die zu erwartende Prognosegüte, als auch die Rechenzeit der Crashesimulationen.

Bauteilsimulation und Übertragung in die Gesamtfahrzeuggeometrie:

Im Rahmen der engen Zusammenarbeit von BMW und dem Rohstoffhersteller Covestro konnten in den Grundsatzversuchen und der Simulation der Prototypen wichtige Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit des Crashabsorbers gewonnen werden. Die im Vorfeld ermittelten Materialkennwerte wurden dann für die Simulation der realen Bauteilgeometrie genutzt (Bild 9) und validiert.

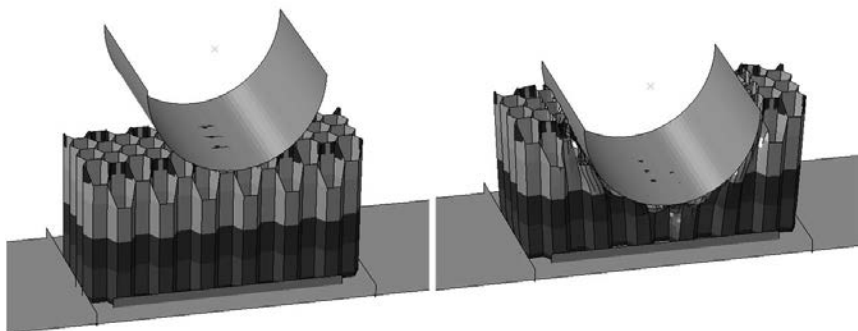


Bild 9: Segment des Serienbauteils – unverformt und bei maximaler Energieaufnahme

Bei der nachfolgenden Integration in das Gesamtfahrzeug galt es zum einen die Geometrie dem Bauraum anzupassen. Zum anderen wurde der Beschnitt der Triggerzonen festgelegt. Die Triggerung ist notwendig, um ein aufeinander abgestimmtes Lastniveau der einzelnen Bauteile zu gewährleisten, welches auch im Komponentenversuch abgeprüft wurde.

Alle, während der Entwicklung der Crashwabe gewonnenen, Erkenntnisse sind zeitgleich mit in die Gesamtfahrzeugsimulation eingeflossen. Ein iterativer Prozess, der notwendig ist, da sich die einzelnen Komponenten beeinflussen. Abschließend erfolgte eine Bestätigung durch die ersten Fahrzeug Crashversuche. Bild 10 zeigt die prozentuale Energieaufnahme der einzelnen Bauteile im Life-Modul. Deutlich nochmals herausgearbeitet welchen Beitrag die Crashwabe in diesem Lastfall leistet.

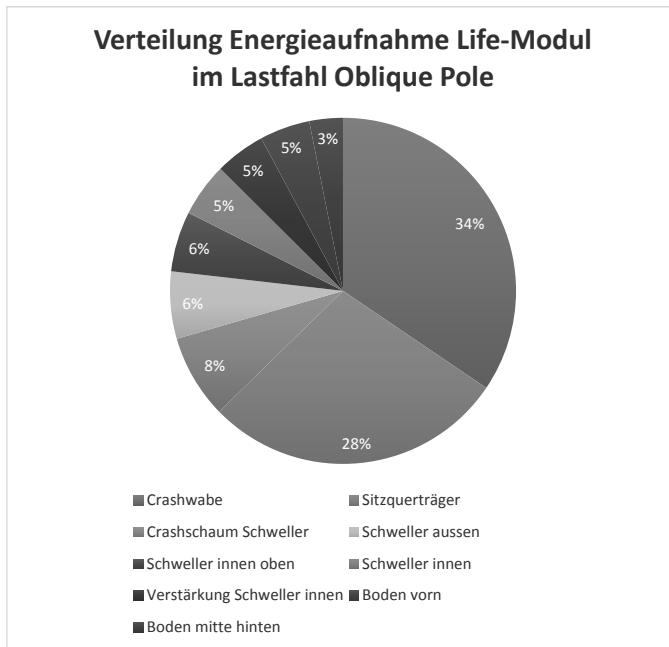


Bild 10: Verteilung Energieaufnahme im Life-Modul

Rheologische Formteilm Betrachtung und Werkzeugauslegung

Die zu realisierenden Geometrie war aus vielen Belangen auch eine besondere Herausforderung für den Werkzeugbau. Eine Vielzahl von lediglich einseitig gefangenen Kernen sollten eine möglichst gleichmäßige Temperierung der Oberfläche ermöglichen und trotz allem noch eine ausreichenden Stabilität aufweisen, da eine Verformung der Kerne auch direkt eine Änderung der Füllung zur Folge haben würde. Schon leichte Änderungen in der Fließfront führen zu unterschiedlichen Druckbelastungen auf die relativ feinen Kerne. Daher war der Füllsimulation ein hoher Stellenwert beizumessen, eine Bewertung der erhaltenen Simulationsdaten allerdings eine besondere Herausforderung. Hier galt es Einflussfaktoren wie Schmelztemperatur, Oberflächentemperatur der Kerne, Wärmetauschpotenziale der Kerne mit in Betracht zu ziehen und bei den Betrachtungen der Simulationsergebnissen entsprechend zu bewerten.

Konnten mit der rheologischen Betrachtung die Herstellung im Spritzguss beantwortet werden, so lieferten sie allerdings keine Aussagen zu der Entformbarkeit des Absorbers. Bei mehr als 110 Einzelkernen, die jeweils eine Länge von ca. 150mm aufwiesen, waren die

Bedenken des Werkzeugmachers zu den aufzubringenden Entformungskräften mehr als angebracht. Weiterhin machten die äußerst geringen Entformungsschrägen der Kerne, die sich aufgrund der Energie Absorption ergeben hatten, die Werkzeuggestaltung nicht einfacher.

Um sich einen besseren Überblick zu verschaffen wurde anhand der in der Füllsimulation ermittelten Schwindungswerte des Produktes die entsprechenden Schrumpfspannungen ermittelt und in ein ABAQUS Ersatzmodell übertragen (Bild 11).

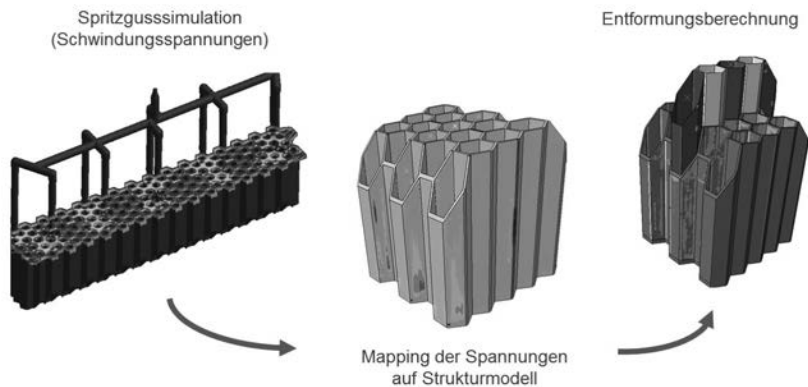


Bild 11: Entformungssimulation – Mapping von Ergebnissen der Spritzgussimulation auf ein Strukturmechanik Modell

Aus den Spannungen konnten dann die Presskräfte ermittelt werden. Anhand von Reibversuchen ermittelten Haftreibungs-Koeffizienten ließen sich dann die Abzugskräfte pro Kern ermittelt (Bild 12). Die durch den Verbund möglich Kompensation der Schrumpfkkräfte wurde wissentlich nicht berücksichtigt, da hier die möglichen Maximalkräfte von Interesse waren.

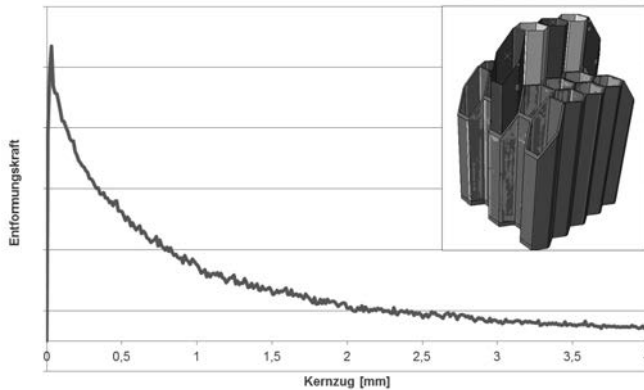


Bild 12: Simulation der Entformungskräfte an einer Einheitszelle

Lesson Learned

Bei immer knapper werdenden Ressourcen, kürzeren Entwicklungszeiten und knapperen Entwicklungsbudgets kann man durch Bündeln von Know-how und eine fokussierte Zusammenarbeit selbst über die Firmengrenzen hinweg eine optimale Produktentwicklung gewährleisten. Die Entwicklung des Crashabsorbers hat in eindeutiger Weise gezeigt, wie reibungslos sich einzelne Expertisen zusammenfassen lassen, ohne dabei die Interessenssphären der Entwicklungspartner zu verletzen. Klar definierte Schnittstellen erlauben den Transfer von Informationen die dem Projekt dienlich sind, jedoch firmenspezifisches Knowhow schützen. Ein weiterer Vorteil der Vorgehensweise hat sich deutlich in dem Projektablauf ergeben. Der klare Fokus, die definierten Arbeitsschritte und das Bündeln des vorhandenen Fachwissens haben dafür gesorgt, dass das Projekt in den vorgegeben Zeitrahmen ohne Störungen abgewickelt werden konnte.

Weiter lassen sich die im dem Projekt gesammelten Erkenntnisse, nun in neue Fragestellungen zum Thema Energieabsorption überführen und umfassender bewerten. Sollten die Anforderungsprofile dann den neuen Gegebenheiten nicht vollständig entsprechen, so lassen sich die Erkenntnisse jedoch in neue Aufgabenstellungen transferieren, und somit die Leistungsfähigkeit einer Absorber-Struktur schnell und auch präzise bewerten.

Literaturangabe

[1] Thomas Schnauffer; Die Leichtbaustruktur des i3.

Aachener Karosserietage (EuroCarBody) 2013

Lokale Endlosfaserverstärkungen in der Serienfertigung

Local reinforcement in series production

Dr. rer. nat. **B. Pfeiffer**, Celanese AG, Sulzbach;
Dipl.-Ing. **S. Tönnies**, Ford Motor Company, Köln

Kurzfassung

Die lokale Endlosfaserverstärkung oder kurz „lokale Verstärkung“ ist serienreif. Bei Celanese wurde ein Verfahren entwickelt, mit welchem Celstran Tapes mit einem Roboter ohne Werkzeugänderung eingelegt und mit Kunststoffschmelze überspritzt werden können. Dabei können die mechanischen Eigenschaften lokal bis zu einem Faktor 6 erhöht werden. Dies wurde erstmals zusammen mit der Firma Ford Motor Company bei der Ford Transit Courier B460 Türinnenverkleidung im Griffbereich in Serie gebracht.

1. Langfaser- und Endlosfaserverstärkte Werkstoffe der CELANESE

Seit mehr als einem Jahrzehnt ist CELANESE mit Celstran® LFT Langfaser Spritzgussmaterial Markt – und Technologieführer. Der nächste Innovationssprung im Bereich der Langfaserverstärkung ist die Endlosfaserverstärkung. Mit der Pultrusionstechnologie ist eine vollständige Faserimprägnierung möglich.

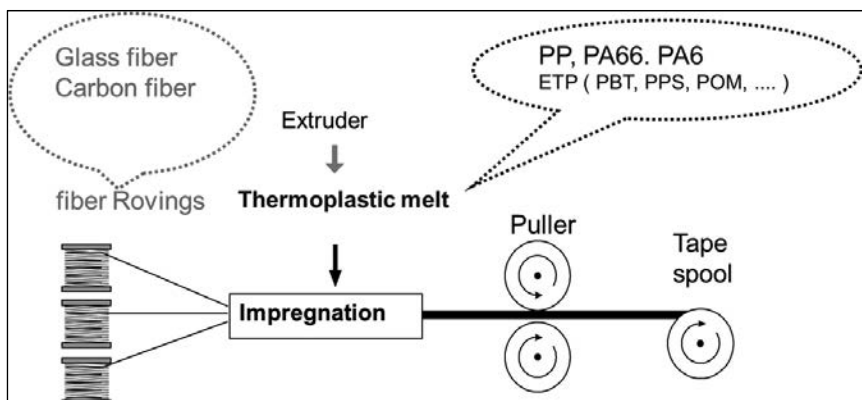


Bild 1: Pultrusion zu Celstran® Tapes (Source: Celanese Process Chart)

Bei Celstran® Tapes wird das Pultrudat nicht zu Pellets geschnitten, sondern auf Spulen aufgewickelt [Bild 1]. Hierbei entstehen Celstran® „Tapes CFR-TP“ (CFR-TP = **C**ontinuous **F**iber **R**einforced **T**hermo**P**lastics), u.a. mit 305 mm Breite, 0.10-0.50 mm Dicke und einem Fasergewichts Anteil von 60-70 Gew.-%.

Bei Langfaserspritzguss mit Polypropylen-Matrix **Celstran® PP-GF 30 bis PP-GF 50** (Glasfasergehalt 30-50 Gew.-%) liegt die Zugfestigkeit bei 100-130 MPa und der Zug-E-Modul bei 6-12 GPa [1].

Ein **Celstran® Tape PP-GF 70** besitzt eine Zugfestigkeit in Faserrichtung von 900 MPa und einen Zug-E-Modul von 34 GPa [2].

2. „Lokale Verstärkung“

Extremer Leichtbau ist möglich, wenn die Tapes lokal an den Stellen eingebracht werden, wo die höchsten Belastungen auftreten. Man spricht in diesem Fall von „lokaler Endlosfaserverstärkung“ oder kurz „lokaler Verstärkung“. Celanese liefert die Celstran® Tapes als Halbzeuge auf Spulen gewickelt aber auch fertig „konfektionierte“ Tape Einleger.

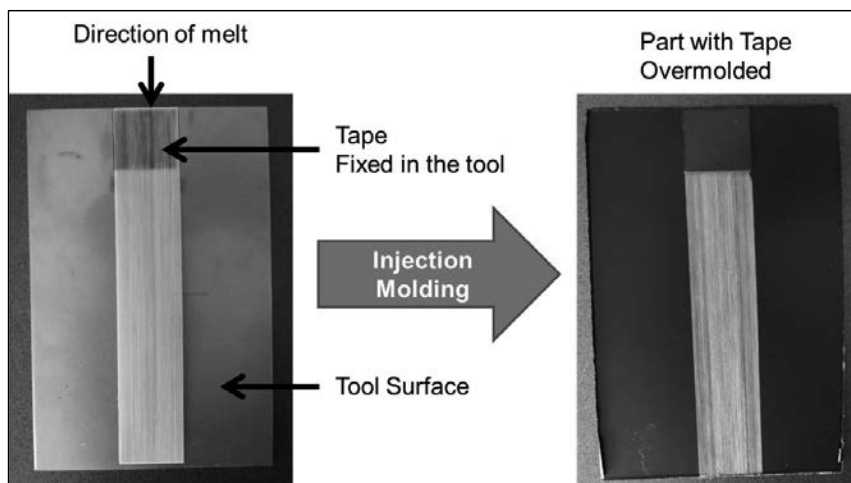


Bild 2: Celstran® Tape Fixierung im Spritzgusswerkzeug (Klebe- oder Magnetfixierung)
(Source: Celanese Tool Mold Shop)

Bei Celanese wurde ein kostengünstiges Verfahren entwickelt [Bild 2], mit welchem das lokale Einlegen und Überspritzen auch in bestehenden Werkzeugen ohne Werkzeugänderung vollständig automatisiert werden kann.

Ein Roboter entnimmt die Einleger einem Magazin. Die Einleger werden mittels Klebe- oder Magnetkraft auf der Werkzeugoberfläche fixiert und überspritzt. Ein Vorheizen der Einleger ist nicht erforderlich. Die Wärmekapazität der Spritzgusschmelze reicht aus, um die Tapes ausreichend an der Oberfläche anzuschmelzen. Die Schmelze geht mit dem Tape eine stoffschlüssige Verbindung ein.

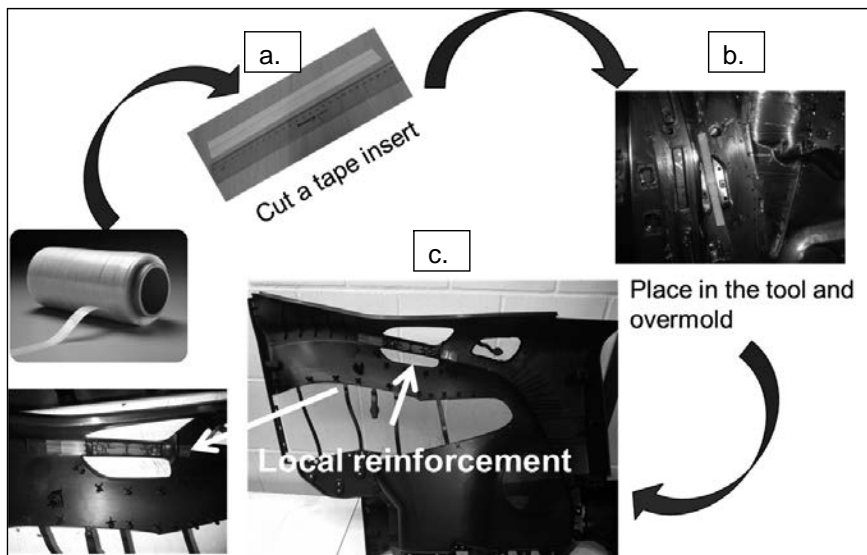


Bild 3: Stark vereinfachter Prozessablauf der „Lokalen Verstärkung“: a. Einleger werden zugeschnitten, b. Fixierung der Einleger auf der Werkzeugoberfläche, c. Bauteil mit lokaler Verstärkung wird dem Spritzgusswerkzeug entnommen. (Source: Celanese intern)

3. Mechanische Eigenschaften der „Lokalen Verstärkung“

Zur mechanischen Charakterisierung der „Lokalen Verstärkung“ wurden bei der Firma Celanese Celstran Tapes PP-GF 70 mit einer Dicke von 0,25 mm in einem DIN A 4 Plattenwerk-

zeug (Plattendicke ca. 2 mm) mit Celstran PP und verschiedenen Glasfasergehalten (0 Gew. %, 20-40 Gew. %) überspritzt. Dabei wurden die Tapes auf der Ober- und Unterseite in Fließrichtung und senkrecht dazu eingelegt und die Probekörper in Fließrichtung und senkrecht dazu entnommen [Bild 4]. Die Probekörper wurden mit Wasserstrahlschneiden aus den DIN A 4 Platten herausgeschnitten.

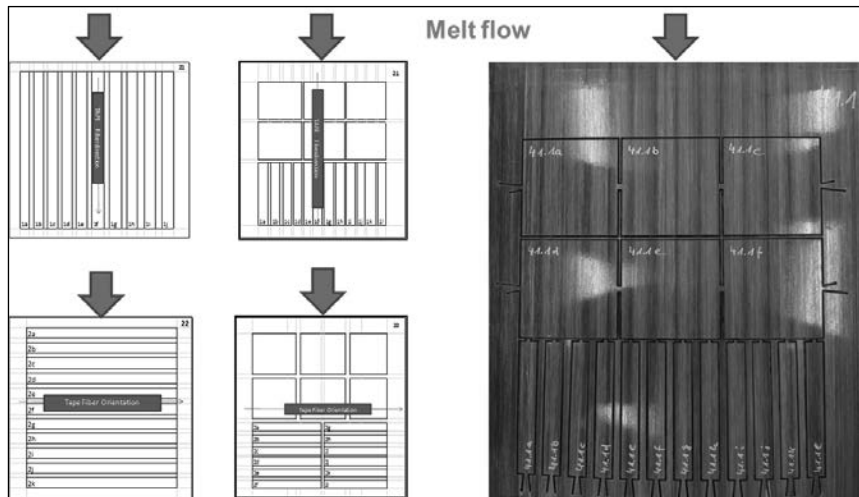


Bild 4: „Lokale Verstärkung“, mechanische Charakterisierung: Probekörper wurden mit Wasserstrahl aus DIN A4 Platten herausgeschnitten. (Source: Celanese intern)

Die Ergebnisse sind auf den folgenden Seiten dargestellt [Bild 5-8]. die Mechanik wurde im Zug-, Biege, Schlagbiege- und Durchstoßversuch ermittelt.

Es zeigt sich im Zug- und Biegeversuch, dass die Festigkeit um den Faktor 1,5, die Steifigkeit um den Faktor 2 und die Schlagzähigkeit (Charpy gekerbt und Multiaxial) sogar um den Faktor 6 gesteigert werden kann. Insbesondere bei der Schlagzähigkeit ist es besonders vorteilhaft, wenn die Tapes obenliegend auf der Seite der Krafteinleitung positioniert werden.

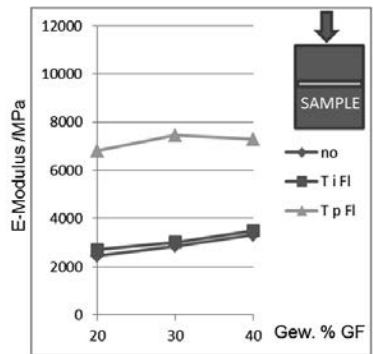
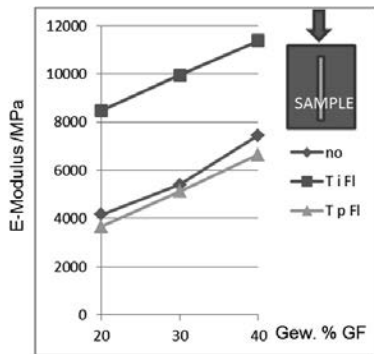


Bild 5: „Lokale Verstärkung“, mechanische Charakterisierung:
Zugtest ISO 527-1 / -2 – E-Modul (Source: Celanese intern)

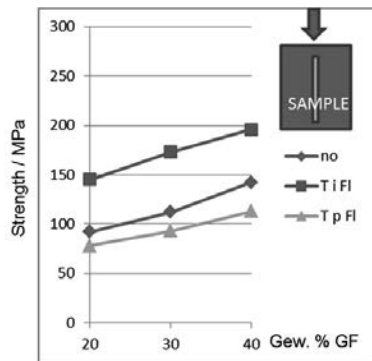
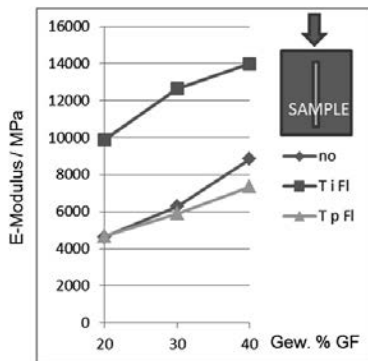


Bild 6: „Lokale Verstärkung“, mechanische Charakterisierung:
Biegetest ISO 178 – Biegemodul und Biegefestigkeit. (Source: Celanese intern)

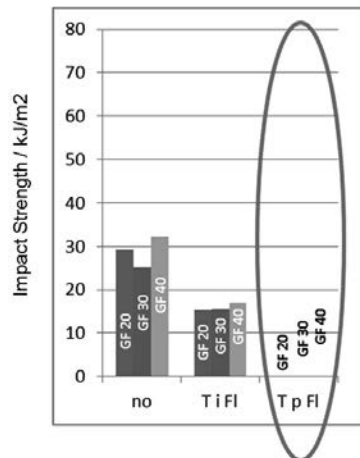
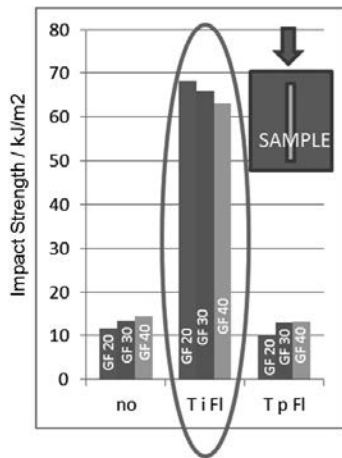


Bild 7: „Lokale Verstärkung“, mechanische Charakterisierung:
Schlagzähigkeit Charpy gekerbt ISO 179-1. (Source: Celanese intern)

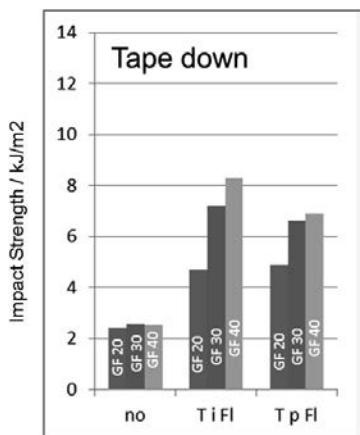
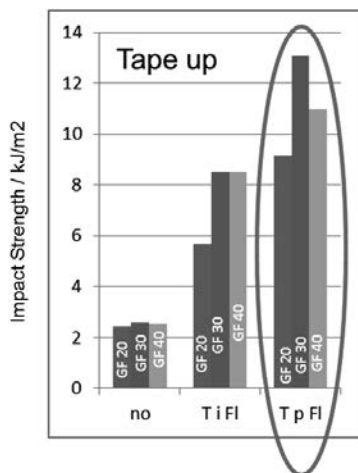


Bild 8: „Lokale Verstärkung“, mechanische Charakterisierung:
Schlagzähigkeit Multiaxial ISO 6603-2 (instrumentierter Durchstoßversuch).
(Source: Celanese intern)

4. Ford Transit Courier Türinnenverkleidung mit „Lokaler Verstärkung“

Dieses Verfahren konnte erstmals bei der Türinnenverkleidung Ford Transit Courier B460 eingesetzt und in die Serienfertigung gebracht werden.

Im Griffbereich treten hohe Spannungen besonders im Crashfall auf. Hier konnte eine lokale Tape-Verstärkung Kosten und Gewicht sparen. Im Vortrag werden neben dem Serienbauteil die Grundlagen des Verfahrens vorgestellt. Hierzu werden Tapes in dem Griffbereich mit einem Roboter in das Werkzeug eingelegt, mit Hilfe von einer Klebung oder magnetischen Haftung auf der Werkzeuoberfläche fixiert und mit der Kunststoffschmelze überspitzt [Bild 3]. Die Türinnenverkleidung und das Tape auf der Rückseite der Türinnenverkleidung ist in Bild 9 gezeigt.



Bild 8: „Lokale Verstärkung“ in der Türinnenverkleidung des Ford Transit Courier B460
(Source: Ford Motor Company)

Wegen der großen Flexibilität des Verfahrens ist in Zukunft mit einem weiten Einsatzbereich zu rechnen.

4. Rezyklierbarkeit der Endlosfaserverstärkung

Bei jedem zukünftigen Bauteil im Auto nimmt der Druck bezüglich der Wiederverwertbarkeit von Materialien bei der Produktion und nach dem Lebenszyklus immer stärker durch gesetzliche Rahmenbedingungen zu. Hierbei hat die Celanese zusätzlich die Rezyklierbarkeit der Endlosfaserverstärkung untersucht, um den ganzheitlichen Ansatz bewerten zu können. Die Studie zeigt Möglichkeiten der Verwertbarkeit und Eigenschaften von Tape Rezyklat in Verbindung mit Celstran® LFT Neuware auf. Hierbei nimmt die Imprägnier Güte der Werkstoffe eine entscheidende Schlüsselrolle ein. Celanese ermöglicht den Kunden mit diesem Prozess die Materialien vollständig auszunutzen und bietet dadurch ein hohes Potential an Ressourcenschonung und Kosteneinsparungen.

LITERATUR:

- [1] CELANESE Broschüre: Celstran® LFT Produkt-Kurzinformation
- [2] CELANESE Produktdatenblatt: Celstran® CFR-TP PP GF70-13

Neue Fertigungstechnologie für Werkstoff-Hybrid-Leichtbau-Lösungen am Beispiel einer FVK-Metall-Hybridbodenstruktur

Dr.-Ing. Dipl.-phys. **O. Täger**, Dipl.-Ing. **F. Häusler**,
Dipl.-Ing. **J. Lohmann**, Volkswagen-Konzernforschung, Wolfsburg;
Prof. Dr.-Ing. **N. Modler**, Dipl.-Ing. **T. Weber**, TU Dresden, Dresden

Kurzfassung

Der Beitrag behandelt die Erarbeitung einer werkstoffgerechten Fertigungstechnologie für werkstoffhybride automobile Bauteile aus thermoplastischen Faser-Verbund-Kunststoffen (FVK) und Metallen am Beispiel einer FVK-Metall-Hybridbodenstruktur. Unter den Aspekten von Konstruktion, Prozess- und Werkzeuggestaltung wird in einem seriennahen Technikum-Umfeld der erarbeitete Demonstrator fertigungstechnisch umgesetzt.

1 Einleitung und Motivation

Im Spannungsfeld sich stetig erhöhender Ansprüche an die Mobilität von morgen und der Notwendigkeit zur Reduzierung von Treibhausgasen, insbesondere das bei Verbrennungsmotoren entstehende CO₂, besitzt der Karosserie- und Strukturleichtbau als Katalysator für die Umkehr der Gewichtsspirale (Bild 1) weiterhin hervorgehobenen Stellenwert [1]. Die Werkstoffklasse der Faser-Verbund-Kunststoffe (FVK) besitzt dabei ein hohes **Leichtbau-Potential** auch über den Bereich geringer Stückzahlen und Kleinserien hinaus. Denn durch insbesondere die Verwendung von thermoplastischen Matrixsystemen in Kombination mit großserienfähigen Fertigungsprozessen ermöglicht Zykluszeiten, mit denen grundsätzlich Großserie abgebildet werden können [2]. Darüber hinaus bieten die thermoplastischen FVK weitreichende gestalterische Möglichkeiten für hochintegrative Konstruktionen, so dass dem für größere Stückzahlen wesentlichen Anspruch an Wirtschaftlichkeit durch eine geringere Einzelbauteilanzahl und somit durch geringere Werkzeugkosten entsprochen werden kann. Als Demonstrator-Großstruktur wurde hier ein Fahrzeug-Unterboden als FVK-Metall-Hybridstruktur ausgeführt, welcher virtuell umgesetzt und unter Aspekten einer seriennahen Prozess- und Werkzeuggestaltung als Demonstrator im Prozess- und Extrusionszentrum des Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik gefertigt wurde.



Bild 1: Umkehrung der Gewichtsspirale: Sekundäreffekte und Potentiale durch Karosserie-leichtbau

2. Auslegung einer FVK-Metall-Hybridbodenstruktur

Als Grundvoraussetzung für die strukturelle Verwendung von thermoplastischen Halbzeugen liegt der Fokus der konstruktiven Auslegung der ausgewählten Primärstruktur auf den einzuhaltenden Lastfällen. Ferner soll auf Basis der Integralbauweise mit thermoplastischen FVK ein Mehrwert gegenüber konventionellen **Bodenstrukturen** generiert werden.

In Bezug auf die Auslegung eines PKW-Unterbodens stehen vor allem die Belastungen im dynamischen und hochdynamischen Beanspruchungsfall im Vordergrund der Untersuchungen. Exemplarisch wurde hier vor allem auf den Seiten- und Frontalaufprall fokussiert. Bei der statischen Beanspruchung der Struktur wurden vorwiegend die auftretenden Torsionslasten betrachtet. Diese Hauptbeanspruchungen bildeten neben den prozesstechnologischen Randbedingungen die Basis des konstruktiven Gestaltungsprozesses.

In Bild 2 sind zwei Evolutionsstufen der Konstruktion dargestellt. Hierbei wird das Konzept einer zweischaligen Grundstruktur deutlich. In der Evolutionsstufe I ist neben der zweischaligen Konstruktion auch der Einsatz von Rippenstrukturen in unterschiedlichster Ausprägung vorgesehen. Vor allem im Bereich der Sitzquerträgeraufnahmen und im Bereich des Mitteltunnels ist hier eine ausgeprägte Rippentopologie konstruktiv umgesetzt. Eine Weiterentwicklung unter Berücksichtigung von Fertigungs-, Gewichts- und Kostenrestriktionen zeigt die Evolutionsstufe 4.

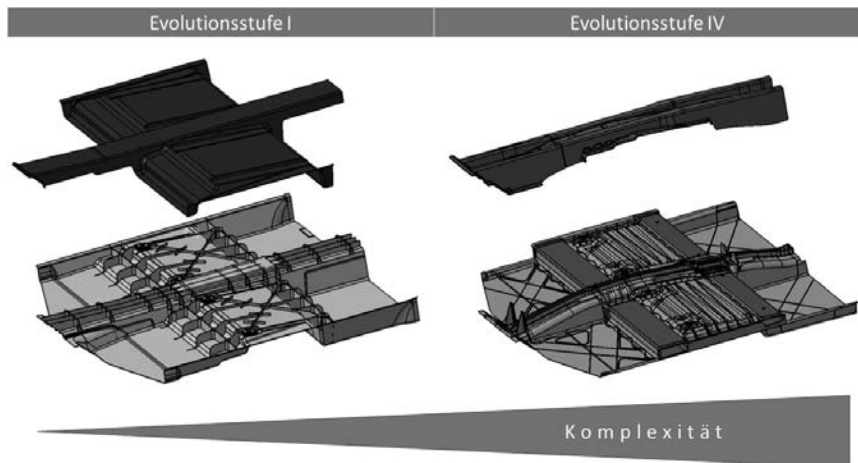


Bild 2: Vergleich verschiedener Evolutionsstufen

Bild 3 zeigt den Detailaufbau der finalen Konstruktion. Um einem hohen Leichtbauanspruch unter vernünftigen ökonomischen Gesichtspunkten gerecht zu werden, ist ein glasfaserintensiver Materialeinsatz Grundlage der Halbzeugauswahl für diese Unterbodenstruktur. Dabei dienen lokale kraftpfadorientierte Einleger zur Versteifung der Gesamtstruktur bzw. zur lokalen Verstärkung in den Bereichen der Sitzquerträgeranbindung und im vorderen Tunnelbereich.

Die Grundstruktur bilden dabei Polyamid 6-Glasfaser- (PA6-GF-) Organobleche, welche zum Aufbau der Unterbodenwanne dienen. Diese muss aufgrund von fertigungstechnischen Randbedingungen in Längsrichtung entlang des Mitteltunnels geteilt ausgeführt werden. Dabei wird der Überlappungsbereich vollständig von Glasfasermatten-Thermoplast (GMT) Pressmasse überdeckt. Zur Übertragung der Crashlasten in Querrichtung des Fahrzeugs hin zu den metallischen Energieaufnehmern, dienen vorkonsolidierte Polyamid 6-Kohlefaser (PA 6-CF) Hohlprofile aus unidirektionalen (UD)-Halbzeugen, deren dominierende Faserausrichtung in Fahrzeug y-Richtung verläuft. Dabei erfüllt die Profilrohrgeometrie und deren Lagenaufbau die Voraussetzung hinsichtlich einer Fertigung im Pultrusionsverfahren und der damit verbundenen Bereitstellung als vorkonsolidierte Halbzeuge in Meterware.



Bild 3: Detailaufbau des finalen Konstruktionsstandes

Die Gestaltung der Rippentopologie der faserverstärkten (z. B. GMT-) Pressmasse dient hier zum einen der Strukturversteifung durch gezielte Erhöhung des Trägheitsmomentes. Zum anderen wird hiermit eine funktionsintegrative Bauweise umgesetzt. Wie in Bild 4 dargestellt dient die thermoplastische Matrix (PA6) als Interphase zwischen den unterschiedlichen Werkstoffen im Bauteil (FVK und Metall). Weiterhin werden durch das Aufbringen der Oberschalenstruktur in Kombination mit den Rippenstrukturen entlang des Mitteltunnels geschlossene Querschnitte erzeugt, die als Medienleitung (z. B. für Kabel, Kühlwasser) dienen können. Ein Hauptaugenmerk galt dabei der Zulufführung für den Fondbereich.

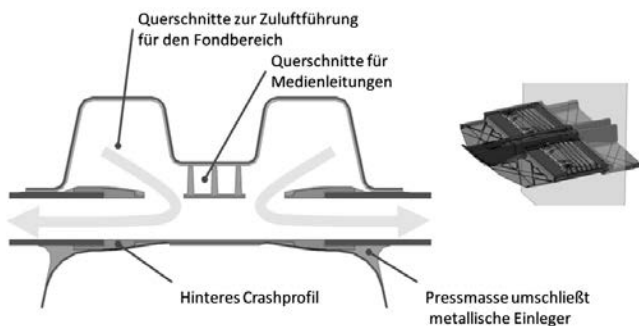


Bild 4: Darstellung der Synthese des Rippenbildes zur Funktionsintegration

3. Prozessentwicklung

Das hervorgehobene Ziel der prozesstechnischen Forschungsarbeiten lag in der Abbildung eines serienfähigen automatisierten Fertigungsprozesses für Halbzeuge bzw. Bauteile in Abmaßen von ca. 2000 mm x 1600 mm.

Die grundlegende Herausforderung bestand in erster Linie in der robusten und reproduzierbaren Handhabung der großen biegeschlaffen thermoplastischen Organoblech-Halbzeuge (Bild 6). Aus diesem Grund wurde bereits in einer frühen Phase des Projektes ein getrenntes Vorwärmen und Einlegen der Halbzeuge festgelegt.

In Bild 5 sind die zwei prinzipiellen Ansätze einer getrennten Werkzeug-Bestückung dargestellt.



Bild 5: Zuführungskonzepte mit einem (links) und zwei Robotern (rechts)

Zum einen kann hierdurch der Handhabungsrahmen in seiner Bauweise kleiner und weniger komplex ausgeführt werden, was einer genaueren Ablage des biegeschlaffen Halbzeuges und einem robusten Einsatz der Zuführeinheit dienlich ist. Zum anderen wird ein Einlegen mit minimaler zeitlicher Verzögerung des linken und rechten Halbzeugs ermöglicht.

Um die Haltezeiten des Organoblechs im offenen Werkzeug so kurz wie möglich zu halten wurden Pressmasse und Organoblech zeitgleich auf Temperatur gebracht und die Pressmasse in Form von entsprechend vordefinierten Pressmasseinseln auf dem erwärmten Endlosfaserhalbzeug in die Werkzeugkavität eingebracht. Die Verwendung von GMT mit PA6 Matrix bietet den Vorteile einer genaueren Konfektionierung und partiellen Verteilung der Pressmasse. Aufgrund des Überlappungsbereiches können beide Organobleche nicht in gleicher Weise mit Pressmasse bestückt werden. Das sogenannte Roboter-Mastersystem (Bild 7, rechts) übernimmt die Zuführung des Organoblechs mit der



Bild 6 Dimensionen einer Organoblech-Hälfte

Pressmasse für den Mitteltunnelbereich. Dieses Mastersystem übernimmt dann die Regelung des sogenannten Roboter-Slavesystems, das wiederum entsprechende Signale (Heizfeldtemperatur, Position, etc.) an den Robotermeister als Entscheidungskriterium übermittelt. Auch die Kommunikation mit der Presse findet ausschließlich über das Mastersystem statt.

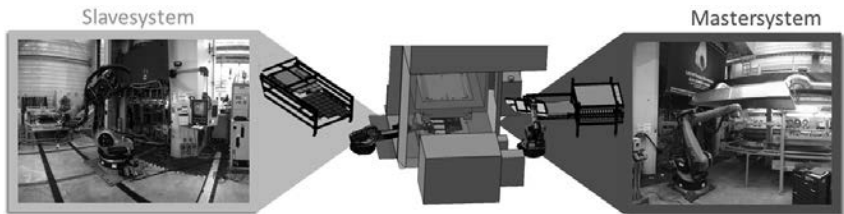


Bild 7: Übersichts- und Hierarchiedarstellung des Anlagenlayouts mit Definition der Hierarchien

Die restlichen GMT-Pressmassenzuschnitte werden auf beiden Organoblech-Zuschnitten gleich verteilt. Die Aufteilung und Positionierung der Pressmassen wird dabei so gewählt, dass sich das berechnete Rippenbild ausformt und die Struktureinleger (vorkonsolidierte Hohlprofile und metallische Einleger) vom Werkzeugoberteil zugeführt werden können.

In Bild 8 wird das Handhabungskonzept an ausgewählten Positionen verdeutlicht.

In den Bereichen, in denen das GMT-Material aufgrund der zweischaligen Bauweise freiliegt, kommen entsprechende Pressmassegreifer mit langen Nadeln zum Einsatz. Durch das synchrone Einlegen der Organobleche und der Pressmassen können trotz der Komplexität der Einlegechoreografie auf der verwendeten Schnellhubpresse Offenzeiten unter 20 s erreicht werden. Zur Ausformung der Rippen sind Schließkräfte von ca. 2200 -2500 t notwendig.



Bild 8: Darstellung des Handhabungskonzeptes an ausgewählten Positionen

Bei einer Gesamtzyklusdauer von unter 3 min, inklusive Entformung (Bild 9), ist eine Stückzahl von ca. 100.000 Stück/a für eine komplexe Struktur mittels **One-shot-Fertigungsverfahren** für werkstoffhybride Bauteile ableitbar.



Bild 9: Seitliche Entformung des Bauteils aufgrund von Hinterschnitten notwendig

4. Herausforderungen der werkzeugtechnischen Umsetzung

Eine werkstoff- und verfahrensgerechte Werkzeuggestaltung ist die Grundlage für die erfolgreiche Umsetzung des Stoff- und Fertigungsleichtbaus für die Hybridbodenstruktur. Die hier konzipierten Ansätze einer semi-integralen Bauweise erfordern spezielle werkzeugtechnische Lösungen. Aufgrund der Ausrichtung des Rippenbildes im Werkzeugunterteil befinden sich die notwendigen Stellmechaniken im Werkzeugoberteil (Bild 10).

Zum einen sind die Hohlstrukturen gegen den Pressdruck abzustützen und dürfen erst nach dem Einlegen der Organobleche, beim Schließen des Werkzeugs, in Endlage gebracht werden. Zum anderen ist durch den packagebedingten Freiraum unter den hinteren Hohlprofilen ein Hinterschnitt werkzeugtechnisch abzustützen. Das hat zur Folge, dass der hintere Kernmechanismus auf dem Schiebermechanismus schließt. Aufgrund der Verwendung einer Schnellschließeinheit (800 mm/s) wird auf eine rein mechanische Kontaktsteuerung bei der Positionierung der entsprechenden Mechanismen während des Vorgangs des Werkzeugschließens zurückgegriffen. Dabei sind die massiv ausgeformten Schieber temperiert, da diese in großem Umfang Erstkontakt zum endlosfaserverstärkten Halbzeug haben und gleichzeitig als Drapierhilfe dienen.

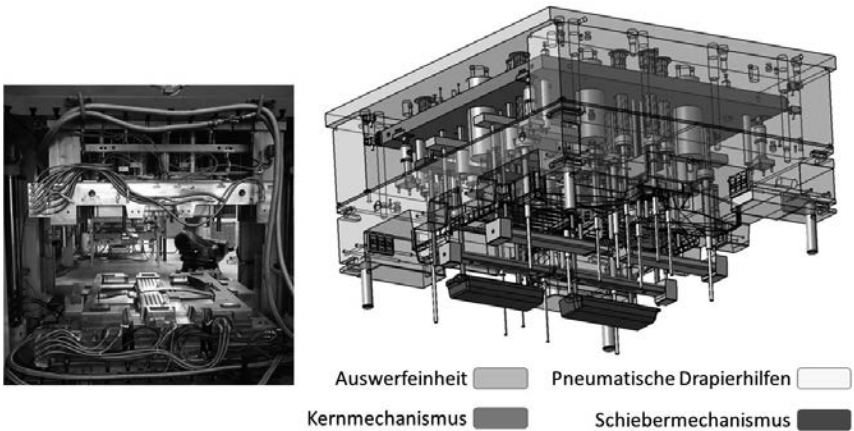
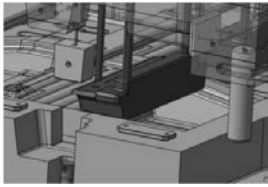


Bild 10: Unterbodenpresswerkzeug und Virtuelles Detailmodell des Werkzeugoberteils

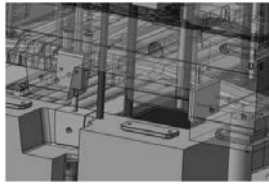
Zur Abstützung der Hohlprofile kommen untertemperierte Stahlkerne zum Einsatz. Diese müssen nach dem Pressen mechanisch gezogen werden. Innerhalb der hinteren Kernstruktur wirkt das geschlossene Hohlprofil stabilisierend. Im vorderen Kernbereich kommt eine einschalige metallische Konstruktion zum Einsatz, welche als leichte Freiformfläche ausgeführt ist. Hier wird die Haltekraft mittels pneumatischen Greifern unter Verwendung von Schweißbolzen auf dem metallischen Einleger generiert.

Die mehrstufig ausgeführten pneumatischen Drapierhilfen greifen ausgehend vom Mitteltunnel kaskadierend in den Organoblechbereich ein. Hierbei dient der Ersteingriff im Mitteltunnel zur Fixierung der beiden sich überlappenden Halbzeughälften.

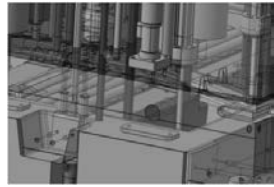
Eine weitere Herausforderung für die Werkzeuggestaltung ist die Verwendung einer Tauchkante während des Schließvorgangs. Dabei wird die Tauchkante beim Einfahren der Kernblöcke (Bild 10, grün) in das Werkzeugunterteil geschlossen. In Bild 11 ist der prinzipielle Ablauf des Schließmechanismus dargestellt.



a)



b)



c)

Bild 11: Ausgewählte Stadien des Schließvorgangs, a) Eintauchen des Schiebers in die untere Werkzeugkavität, b) Definition des Kernblocks im Unterwerkzeug, c) Werkzeug vollständig geschlossen

Mit Hinblick auf einen getakteten Serienbetrieb müssen vor allem die Öffnungsmechanismen, hier insbesondere das Entformen der Kerne, hydraulisch gestellt werden können.

5 Fertigung von Demonstratorbauteilen

Die gefertigten Demonstratorbauteile sollen die prinzipielle Machbarkeit der Fertigung einer hochintegrativen FVK-Metall-Hybridbodenstruktur unter der Prämisse des lastpfad- und beanspruchungsgerechten Einsatzes aufzeigen.

In Bild 12 ist eine der gefertigten Hybridbodenstrukturen abgebildet. Viele konstruktive Ansätze konnten dabei umgesetzt werden. Fertigungsbedingte Einschränkungen bestehen aktuell jedoch hinsichtlich des filigran gestalteten Rippenbereiches. Hier war es zum vollständigen Füllen des Rippenbildes notwendig, zusätzliche Fließwege der Pressmasse zu schaffen und weitere Bauteilbereiche für die Pressmasse freizugeben. Dies gilt vor allem im Bereich unter den Sitzen der vorderen Passagiere. Dieser Bereich muss aufgrund der beschriebenen prozesstechnischen Randbedingungen um eine Deckschichtlage aus Pressmasse ergänzt werden, damit eine vollständige Ausfüllung der benachbarten Rippenstruktur gewährleistet werden kann. Eine weitere Anpassung wurde im Bereich des Kernmechanismus vorgenommen. Um ein definiertes Eintauchen der Kernvoreiler in die untere Werkzeugkavität (siehe hierzu auch Bild 11) sicherstellen zu können, mussten in diesem Bereich Aussparungen im Organoblech vorgenommen werden.

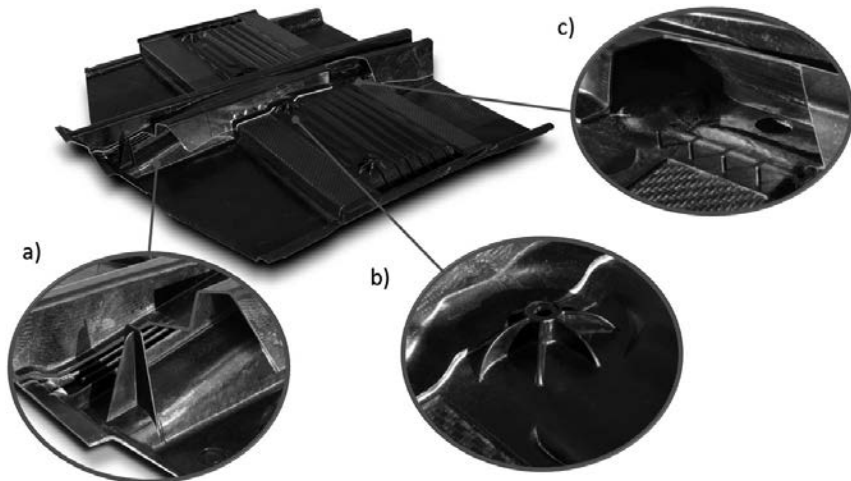


Bild 12: Aufgebaute Hybridbodenstruktur mit Detaildarstellung; a) Vorderes Zuluftschott und Schließbereich der Mitteltunnelrippen, b) Rippenversteifung für Sitzquerträgeranbindung, c) Hintere Crashstruktur mit Einleger für Zuluftführung.

Aufgrund des Einfahrens der Kernblöcke vor der endgültigen Drapierung der biegeschlaffen Einleger, ist die Faltenbildung des Endlosfasermaterials bzw. ein Einklemmen des Einlegers zwischen unterer Werkzeughälfte und Kernverblockung in diesem Bereich zu verhindern. In Bild 13 ist der angepasste Zuschnitt des Einlegers abgebildet.



Bild 13: Angepasster Organoblechzuschnitt

6 Fazit und Ausblick

Die hier vorgestellte Realisierung einer FVK-Metall-Hybridbodenstruktur zeigt die grundlegende Machbarkeit der Herstellung einer leichtbau- und kostengetriebenen Primärstruktur im Multi-Material-Design für größere Stückzahlen. Der auf der Presstechnologie basierende hochintegrierte Fertigungsprozess ermöglicht sowohl die Reduzierung von Einzelbauteilen, als auch die Integration von zusätzlichen fahrzeugspezifischen Funktionen. Dabei zeigt sich

der erweiterte Pressprozess mit GMT zur Gestaltung eines definierten Rippenbildes in Kombination mit endlosfaserverstärkten Basislagen als robuste Fertigungstechnologie. Weiterhin zeichnet sich der Pressprozess durch geringere Werkzeugkosten gegenüber dem sturktur-analogen Spritzgussprozess aus, wobei allerdings Nachteile in Bezug auf die prozessbedingt größeren Fließquerschnitte und somit niedrigere Leichtbaugüten in Kauf genommen werden müssen.

Um den Einsatz FVK-intensiver Hybridbauteile vor dem Hintergrund konkurrierender metallischer Werkstoffsysteme im Serienprozess zu etablieren, sind neben der Verfügbarkeit von endlosfaserverstärkten thermoplastischen (glasfaserverstärkten) Halbzeugen zu wirtschaftlichen Preisen, vor allem noch Lücken in der virtuellen Abbildung der Werkstoffe und der entsprechenden Fertigungsprozesse zu schließen. Die simulative Abbildung des Fertigungsprozesses muss auf Basis des verarbeitungsspezifischen Verhaltens (Drapierung, Fließwege, etc.) der verwendeten Werkstoffe verlässliche Aussagen in Bezug auf Faserorientierung und -verteilung treffen können, um einen konkurrenzfähigen Entwicklungsprozess generieren zu können [3,4]. Weiterhin muss sich eine Eigenschaftsprüfung der gefertigten Demonstratoren insbesondere in Hinblick auf Ihre Dimensionsstabilität unter Temperaturbelastungen anschließen.

- [1] Friedrich, H.E.: Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013
- [2] Eckstein, L., Ickert, L., Goede, M., Dölle, N.: Leichtbau-Bodengruppe mit Verstärkungen aus CFK und GFK, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift (2011), S. 256-261
- [3] Modler N., Adam F., Maaß J., Kellner P., Knothe P., Greuther M., Irmeler C.: Intrinsic lightweight steel-composite hybrids for structural components, Materials Science Forum, V. 825-826, S.401-408
- [4] Sachs U., Akkerman R., Fetfatsidis K., Vidal-Sallé E., Schumacher J., Ziegmann G., Allaoui S., Hivet G., Maron B., Vanclooster K., Lomov S.V.: Characterization of the dynamic friction of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 67, 2014, S. 289-298

Entwicklung einer Leichtbau I-Tafel-Tragstruktur

Werkstoff- und Fertigungskonzept des I-Tafel-Tragrohres aus langglasfaserverstärktem teilaromatischen Polyamid für den BMW M4 GTS

Dipl.-Ing. **R. Krischke**, Dipl.-Ing. **R. Poltrock**, BMW AG, München;
Dipl.-Ing. **S. Stein**, BMW AG, Landshut

Kurzfassung

Die Tragstruktur wird originär als Aggregate-Träger für das Integrationsmodul Cockpit ausgelegt und trägt in dieser Hauptfunktion auch zur Struktur-Steifigkeit der Karosserie im Bereich Stirnwand bei. An ihr montiert werden u. a. Instrumententafel, Handschuhkasten, Airbags, Lenksäule und EE-Komponenten.

Das Bauteil muss eine hohe Steifigkeit über den kompletten Temperaturbereich im Interieur aufweisen und wird sowohl im Fahrbetrieb als auch in Crash-Situationen durch hohe statische und dynamische Kräfte beansprucht.

Tragstrukturen werden üblicherweise als Metall-Schweißkonstruktionen (Stahl, Aluminium) oder Magnesium-Druckguss Bauteile dargestellt.

Im Rahmen eines Vorentwicklungsprojektes wurde eine Tragstruktur aus langfaserverstärktem, thermoplastischem Kunststoff entwickelt, die für die Sonderserie M4 GTS zur Serienreife entwickelt und industrialisiert wurde.

Durch die Verwendung eines langfaserverstärkten Thermoplast-Werkstoffes konnte eine Gewichtseinsparung von ca. 1,6 kg gegenüber dem Serienbauteil aus Stahl erzielt werden.

Bauteilanforderungen und die daraus resultierende Werkstoffauswahl, unterstützt durch mechanische und rheologische Berechnungen sowie verfahrenstechnische Aspekte, werden im Rahmen dieses Beitrages vorgestellt.

1. Einleitung

Im Herbst 2015 hat die BMW M-GmbH den auf 700 Exemplare limitierten M4 GTS vorgestellt.

Der M4 GTS wurde mit wegweisenden Technologien gezielt für den Einsatz auf der Rennstrecke konzipiert. Gleichzeitig bleibt die Straßenzulassung uneingeschränkt erhalten.

Das Triebwerk des M4 GTS verfügt über die innovative Wassereinspritzung in Verbindung mit dem M Doppelkupplungsgetriebe mit Drivelogic.

Das M spezifische 3-Wege Gewindefahrwerk, Frontsplitter und Heckflügel sind manuell einstellbar, so dass das Fahrzeug auf die jeweilige Rennstrecke oder auf den Einsatz im regulären Straßenverkehr individuell abgestimmt werden kann.

Exklusive Carbon-Komponenten garantieren optimale Gewichtsverteilung und Aerodynamik mit variablem Abtrieb. Zu den Teilen in CFK Sichtoptik zählen neben dem Heckdiffusor der Heckflügel mit einstellbarem Flügelblatt und ein ebenfalls einstellbarer Frontsplitter sowie die Domstrebe. Die CFK-Fronthaube ist in Wagenfarbe lackiert.

Die eigenständig geformten Tür- und Seitenverkleidungen werden aus einem Leichtbauwerkstoff aus nachwachsenden Rohstoffen gefertigt und wiegen nur halb so viel wie die Serienteile. Sie tragen ebenso wie die gewichtssparend konstruierte Mittelkonsole zur Gewichtsreduktion des M4GTS gegenüber dem Serienmodell bei.

In diesem Beitrag wird die Entwicklung der Instrumententafel-Tragstruktur des M4 GTS aus einem langfaserverstärkten Thermoplast-Werkstoff beschrieben, mit dem eine Gewichtsreduzierung von 1,6 kg gegenüber dem Serienbauteil aus Stahl realisiert werden konnte.

2. Anforderungen an die Instrumententafel-Tragstruktur

2.1 Allgemeines

Im Fahrzeug befindet sich die Tragstruktur im trockenen Innenraum, direkt seitlich angebunden an den A-Säulenknoten, der Trennwand zum Motorraum und dem Getriebetunnel. Primäre Funktion ist die Anbindung der Lenksäule, der Instrumententafel und weiterer fahrzeugspezifischer Komponenten wie z.B. HUD (head up display), Klimaanlage, u.a.

Zum anderen hat die Tragstruktur eine Aussteifungsfunktion, in deren Rahmen sie zu einer hinreichenden Steifigkeit der Karosserie beitragen soll.



Bild 1: Leichtbau I-Tafel Tragstruktur

Die besondere Herausforderung in diesem Projekt lag in der kundenrelevanten Auslegung der Anforderungen über einen kunststoffspezifischen Temperaturbereich.

In der unten stehenden Grafik ist aufgezeigt, das sich die Tragstruktur auf 65°C – 80°C unterhalb der Instrumententafel im Rahmen einer Sonnensimulation für ein stehendes Fahrzeug aufheizt (die Messpunkte 88.1 und 102.0 liegen im direkten Einstrahlungsbereich).

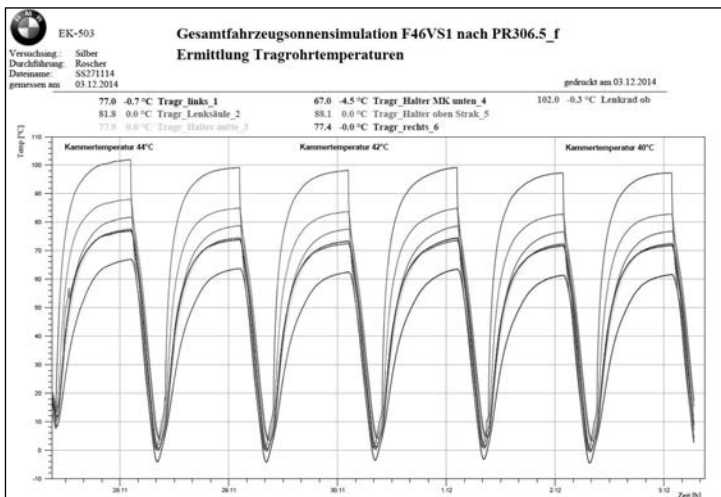


Diagramm 1: Temperaturanalyse einer Tragstruktur im Fahrzeug mittels Sonnensimulation

2.2. Anforderungen

- Steifigkeit / dazugehörige kundenrelevante Auslegungsgrößen
 - Schwingungskomfort Lenksäule/Lenkrad („Lenksäulenschwingung“),
 - Verdrehsteifigkeit der Lenksäulenaufnahme (fahrzeugspezifisch)
 - Y-Knicksteifigkeit (fahrzeugspezifisch, Seitencrashrelevant)
 - Eigenfrequenz des Instrumententafelmoduls („Shakertest“),
 - Eigenfrequenz HUD im Instrumententafelmodul (fahrzeugspezifisch), beschreibt die zitterfreie Bildanzeige
 - Lenksäulen- und Klimaakustik (fahrzeugspezifisch)
- Statische und dynamische Lasten
 - Mantelrichttest, beschreibt die Auslenkung des Lenkrads bei Zugbelastung in $-z/x$
 - Fahrzeugspezifische lokale Steifigkeiten, z.B. Halter Handschuhkasten, Klimaanlage, Abstützbereiche für Airbagsysteme u.a.
 - Durchhang Instrumententafelmodul in der automatisierten Bandmontage
- Craschanforderungen / Verbraucherschutzanforderungen
 - Craschanforderungen gemäß europäischer technischer Vorschriften im Rahmen der Typgenehmigung, UN-R94 u.a.
 - Euro NCAP
 - Craschanforderungen gemäß US-amerikanischer technischer Vorschriften im Rahmen der Typgenehmigung, FMVSS 208 u.a.
 - US NCAP
 - IIHS
 - Weitere länderspezifische Tests (z.B. VR China, u.a.)

Alle genannten Anforderungen werden zunächst am Datenmodell simuliert und bewertet.

3. Entwicklung des Werkstoffkonzeptes

3.1 Allgemeines

Auf Basis der Anforderungen an die Tragstruktur wurde das Werkstoffkonzept entwickelt. Entwicklungsziel war die Realisierung des Bauteiles durch Werkstoffe mit thermoplastischer Matrix im vorgegebenen Bauraum.

Im Gegensatz zur Auslegung von Bauteilen auf Festigkeit liegt der Focus dieses Strukturbauteiles auf einer hohen Bauteilsteifigkeit über den gesamten relevanten Temperaturbereich als Auslegungskriterium.

Die geforderte Steifigkeit kann nur durch faserverstärkte Werkstoffe erreicht werden.

Weitere Anforderungen wie gutes Verhalten bei dynamischer Beanspruchung (Crash), Wärmeformbeständigkeit, Chemikalienbeständigkeit, Alterungsverhalten, Verarbeitbarkeit,... dürfen dabei natürlich nicht außer Acht gelassen werden und sind sowohl vom Matrixwerkstoff als auch von der Verstärkungsfaser beeinflusst. Zusätzlich sind noch Gewichts- und Kostenziele einzuhalten.

Zu Beginn des Projektes wurde sowohl der Einsatz von Organosheets zur Verstärkung der Bauteile (Sprifformtechnologie), als auch der Einsatz von kohlefaserverstärkten Werkstoffen untersucht. Deshalb mussten bei der Auswahl des Matrixwerkstoffes die Verfügbarkeit von Organoblechen und die Kompatibilität mit Kohlefasern berücksichtigt werden.

3.2 Matrixwerkstoff

Bei Berücksichtigung der genannten Anforderungen gelangt man sehr schnell zur Familie der Polyamide als Matrixwerkstoff.

(Glas)-Faserverstärkte Polyamide werden in Fahrzeugen bei vielen hochbeanspruchten Bauteilen z.B. Motorraumbauteilen, Strukturbauteilen (Motorträger, Getriebequerträger, Luftfederabrollkolben....) eingesetzt.

Alle Polyamide nehmen Feuchtigkeit auf. Die Feuchtigkeitsaufnahme bis zur Sättigung und die Aufnahmegeschwindigkeit sind für die verschiedenen Polymertypen unterschiedlich.

Durch die Feuchtigkeitsaufnahme verändern sich die mechanischen Eigenschaften. Feuchtigkeit macht die Bauteile zäher, aber auch weniger fest und steif. Im Fahrzeugbetrieb stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, der von den klimatischen Verhältnissen des Betriebsortes abhängig ist. Für die Absicherung von Polyamid-Bauteilen muss deshalb sowohl der gesättigte feuchte Zustand, als auch der spritzfrische trockene Zustand abgesichert werden.

Festigkeit und Steifigkeit faserverstärkter Polyamide mit gleichem Faseranteil unterscheiden sich bei Raumtemperatur nur geringfügig. Der Einfluß des Matrixwerkstoffes wird bei Bruchdehnung und Schlagzähigkeit deutlich. Bei den Eigenschaften über Temperatur und Feuchtigkeit dominiert der Matrix-Einfluss.

Tabelle 1: Eigenschaftsvergleich Polyamidwerkstoffe+50%GF aus Datenblättern [1]

Bezeichnung	Einheit	Zustand	PA6T/6I	PA6T/66	PA66+ PA6I/6T	PA66	PA6
Zug-E-Modul ISO 527	[MPa]	trocken	18000	17500	18000	17000	17000
		feucht	17500	17000	17000	12500	11000
Zugfestigkeit ISO 527	[MPa]	trocken	250	250	250	245	245
		feucht	240	225	220	180	165
Bruchdehnung ISO 527	[%]	trocken	2	2	2,5	2,5	2,5
		feucht	2	2	2,5	3,5	4,5
Schlagzähigkeit ISO 179-1eU	[kJ/m²]	trocken	80	85	90	95	90
		feucht	80	85	90	100	100
Kerbschlagzähigkeit ISO 179-1eA	[kJ/m²]	trocken	11	13	15	18	15
		feucht	11	13	15	25	25
Glasübergangstemperatur	[°C]	trocken	125	95	80	60	60
		feucht	105	75	60	40	40
Schmelzpunkt	[°C]		325	310	260	260	220
Werkzeugtemperaturbereich	[°C]		140-160	100-140	80-120	80-100	80-100
Verarbeitungstemperatur	[°C]		330-345	315-340	270-300	280-300	280-300
Dichte	[g/cm³]		1,65	1,62	1,56	1,56	1,55

Bei der Auslegung eines Strukturbauteiles auf Steifigkeit ist zu beachten dass die Glasübergangstemperatur mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt abnimmt. Der Abfall der Steifigkeit über die Temperatur verschiebt sich zu niedrigeren Temperaturen.

Üblicherweise werden DMA oder Schubmodulkurven in logarithmischen Maßstab dargestellt. Hier lässt sich unser Auge durch die gewählte Darstellung täuschen, da aufgrund der logarithmischen Darstellung der Abfall an Steifigkeit bis T_g wesentlich undramatischer aussieht als er in Wirklichkeit ist, wie Diagramm 2 verdeutlicht.

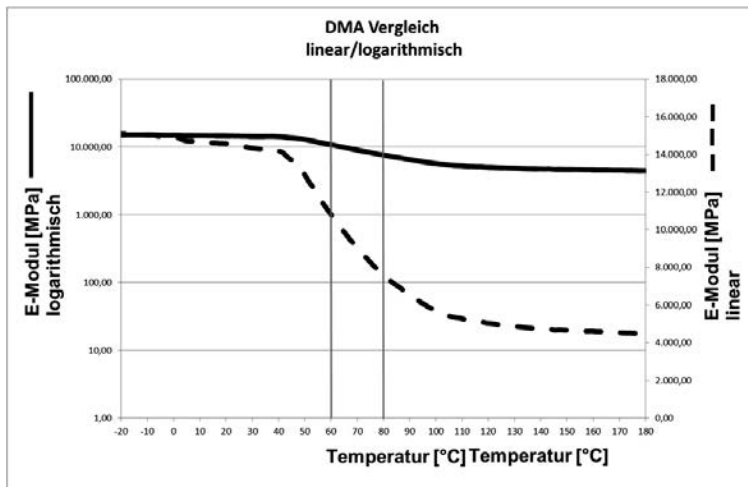


Diagramm 2: DMA Vergleich logarithmische/ lineare Darstellung an einem Werkstoff

Diagramm 3 zeigt den Abfall der Steifigkeit im sog. DMA Versuch (dynamische Biegeprüfung) über Temperatur für verschiedene Polyamidtypen in unterschiedlichen Konditionierungszuständen.

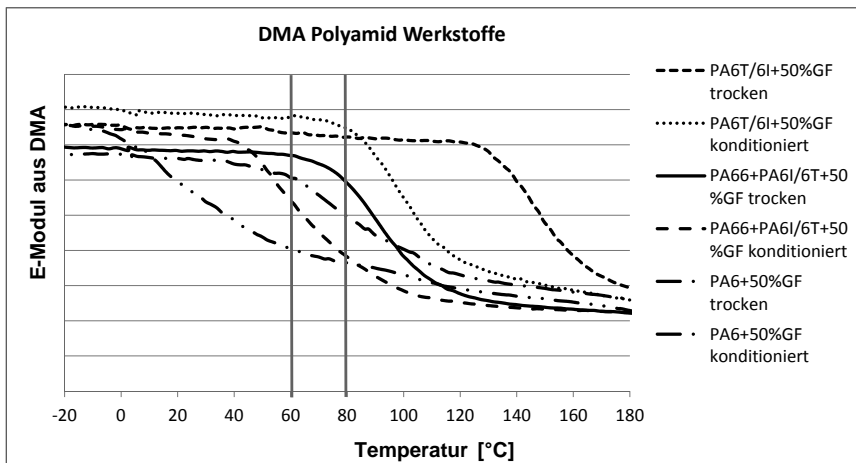


Diagramm 3: DMA Vergleich Polyamid-Werkstoffe, lineare Darstellung

Im Diagramm 4 ist der prinzipielle Verlauf der Steifigkeit über der Temperatur dargestellt. Der Steilabfall beginnt ca. 20°C vor der Glasübergangstemperatur (Umkehrpunkt der Kurve). Bei möglichst gleichbleibender Steifigkeit bis zur Temperatur T muss die Glasübergangstemperatur mindestens $T + 20^{\circ}\text{C}$ betragen.

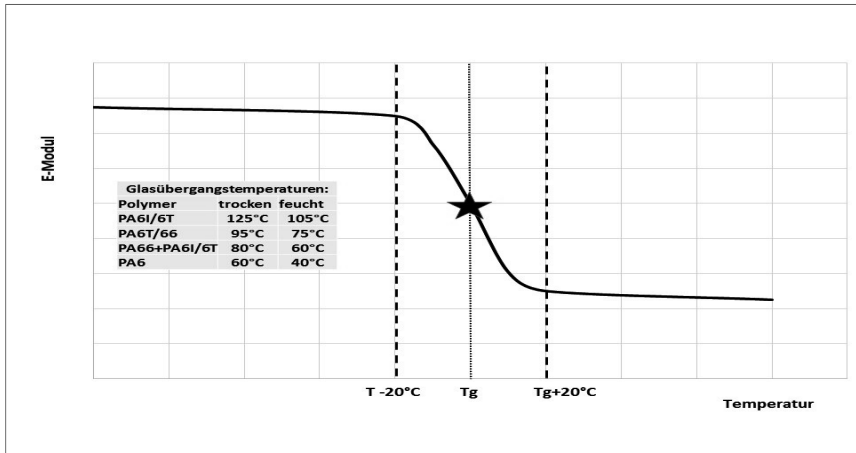


Diagramm 4: Steifigkeit über Temperatur

3.3 Verstärkungsfasern

Bei Spritzgußwerkstoffen werden üblicherweise Glasfasern (GF) eingesetzt. Zu Beginn des Projektes waren aber auch Kohlefasern (CF) im Focus der Überlegungen.

In Tabelle 2 sind die unterschiedlichen Fasereigenschaften gegenüber gestellt.

Tabelle 2: Mechanische Kennwerte von Verstärkungsfasern

MECHANISCHE KENNWERTE FASERN (GROBE RICHTWERTE)	
Typische Eigenschaften von HT-Kohlenstofffasern	
Dichte	1,8 g/cm ³
Filamentdurchmesser	6 µm
Zugfestigkeit	3,5-4,5 GPa (kN/mm ²)
Zug-E-Modul	220-240 GPa
Bruchdehnung	1,5 %
Typische Eigenschaften von Glasfasern	
Dichte	2,45...2,58 g/cm ³
Filamentdurchmesser	5...24 µm
Zugfestigkeit	1,8...5 GPa (kN/mm ²)
Zug-E-Modul	70...90 GPa
Bruchdehnung	< 5 %

Der Vorteil der Kohlefasern liegt in der niedrigen Dichte der Fasern und sehr hoher Steifigkeit, allerdings mit dem Nachteil einer deutlich geringeren Bruchdehnung.

Aufgrund früherer, positiver Erfahrungen mit Polyamiden als Matrixwerkstoff für CF-verstärkte Spritzgußwerkstoffe wurden auch Carbonfasergranulate aus Produktionsreststoffen untersucht.

In dieser Phase der Entwicklung war noch keine wirtschaftliche Produktion von Carbonfasergranulaten aus Produktionsreststoffen in ausreichender Menge möglich. In einem Herstellungsprozess, der für eine Produktionsmenge von maximal 10t/a darstellbar war, konnte aber nachgewiesen werden, dass mit diesen Werkstoffen nur minimal schlechtere mechanische Kennwerte erreicht werden können, wie die von Werkstoffen mit „neuen“ Kohlefasern.

Bei der Fakuma 2014 [2] und der VDI Tagung Kunststoffe im Automobil 2015 [3] wurden Carbonfasergranulate aus Produktionsreststoffen aus Serienanlagen und deren Eigenschaften vorgestellt.

3.4 Werkstoffauswahl

Untersuchungen an Probekörpern und Platten sowie einem Versuchswerkzeug (Erlanger Träger), auch in Verbindung mit Organosheets, ließen kein eindeutiges Ergebnis zur endgültigen Werkstoffauswahl zu.

Daher wurde das Werkzeug auf den nach unserer Meinung am schwierigsten zu verarbeitenden Werkstoff, ein mit 50%lang(glas)faserverstärktes PPA (PA6T/6I) ausgelegt.

Nach unseren Informationen gab es bis dahin kein ähnlich großes Bauteil in dieser Fa-ser/Matrix Kombination.

Durch diese Auslegung (mehr dazu im Kapitel 4 Werkzeugkonzept) waren wir werkzeu-gsei-tig nicht eingeschränkt und konnten verschiedene Materialien durch ausgewählte Ersatzver-suche erproben. *Bauteile wurden aus Werkstoffen von PA6 +L(GF/CF) über PA66+PPA +L(GF/CF bis PAA+(L)GF/CF hergestellt.*

Tabelle 3 zeigt eine Auswahl der erprobten Werkstoffe inclusive subjektiver und objektiver Bewertungen zur Herstellbarkeit bzw. Erprobung.

Tabelle 3: Materialmatrix

Bezeichnung		Norm	PA6T/6I +40%CFrec	PA6T/6I +50%GF	PA6T/6I +50%LGF	PA66+6I/X +40%CF	PA66+PA6I/X +40%LCF	PA66+PA6I/X +30%LCF	PA66+PA6I/X +50%LGF	PA66+PA6I/X +60%LGF
Zug-E-Modul	[Mpa]	ISO 527	30000	18000	19500	31000	29500	22500	18000	24000
Zugfestigkeit	[Mpa]	ISO 527	265	250	275	260	335	315	260	310
Reißdehnung	[%]	ISO 527	1,2	2	1,9	1,5	1,5	1,6	2,2	2,2
Schlagzähigkeit	[kJ/m2]	ISO 179/1eU	45	80	75	55	75	65	95	120
Kerbschlagzähigkeit	[kJ/m2]	ISO 179/1eA	6	11	30	7	18	16	30	45
Füllstoffgehalt	[%]	EN ISO 1172	40%CF	50%GF	50%LGF	40%CF	40%LCF	30%LCF	50%LGF	60%LGF
Herstellbarkeit/ Entformverhalten			n.i.O	i.O.	i.O	i.O	i.O	i.O	i.O	i.O
statischer Ersatzversuch			i.O	i.O.	i.O.	i.O	i.O	i.O	i.O	i.O
dynamischer Ersatzversuch			n.i.O	n.i.O.	n.i.O	n.i.O	n.i.O	n.i.O	bedingt i.O.	i.O.

Als bester Kompromiss zwischen Steifigkeit und dynamischem Verhalten erwies sich ein PA66+PA6I/X + 60%LGF mit speziellen Langglasfasern.

Die reinen PA6T/6I Werkstoffe haben zwar Vorteile bei Steifigkeit und Festigkeit, besonders bei höheren Temperaturen, aber Nachteile bei Bruchdehnung und Schlag-, bzw. Kerbschlagzähigkeit. Diese Eigenschaften werden zusätzlich durch die Fasereigenschaften überlagert.

Der Nachteil der CF-verstärkten Werkstoffe ist im dynamischen Verhalten zu sehen. Die GF-verstärkten Werkstoffe haben dagegen niedrigere Steifigkeiten. Hybridwerkstoffe mit GF+CF oder auch schlagzäh modifizierte CF-Werkstoffe konnten die Nachteile der Grundwerkstoffe nicht kompensieren.

Lang(glas)fasern verbessern das dynamische Verhalten des Verbundwerkstoffes. Die me-chanischen Eigenschaften über Temperatur werden in Richtung höhere Temperatur ver-schoben (Diagramm 5).

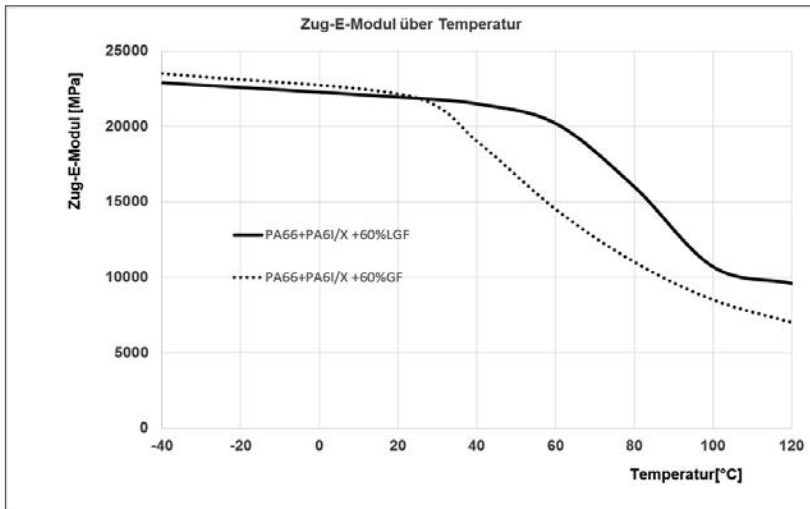


Diagramm 5: Vergleich Zug-E-Modul über Temperatur eines kurz- bzw. langglasfaser-verstärkten Werkstoffes

Bei Bauteilen aus langfaserverstärkten Spritzguß-Werkstoffen bildet sich ein Fasergewölle, das nach Veraschung des Matrixwerkstoffes die Bauteilkontur beibehält. (Bild 1),

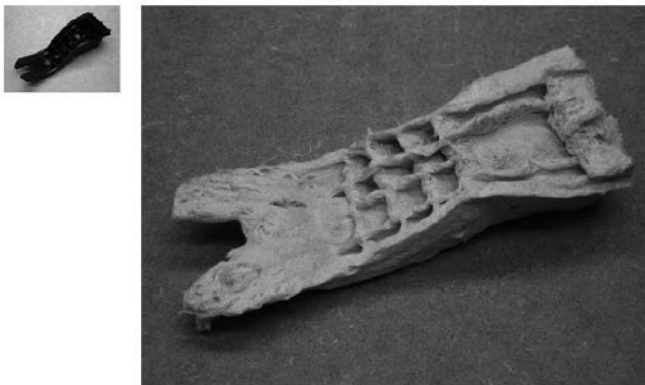


Bild 2: Glasfaser-Gewöllestruktur (nach Veraschung) bei optimalem Verarbeitungsprozess

Die Werkstoffauswahl stützt sich im ersten Schritt auf einen Werkstoffvergleich an spritzgegossenen Probekörpern, aber letztendlich muss das Bauteil alle Anforderungen erfüllen und nicht der Probekörper.

3.5 Eigenschaften des ausgewählten Werkstoffes im Bauteil

Zur rechnerischen Absicherung des Bauteiles wurde eine Materialkarte generiert. Die Probekörper werden aus spritzgegossenen Probeplatten in verschiedenen Orientierungen herausgearbeitet. Dabei werden dehnratenabhängige Materialkennwerte in verschiedenen Konditionierungszuständen und bei unterschiedlichen Temperaturen ermittelt. Derzeit wird die Berechnung noch mit einem gemittelten Materialkennwert ohne Berücksichtigung der Faserorientierung durchgeführt.

Die Ermittlung von Materialkennwerten aus dem Bauteil gestaltet sich schwierig, da es nur wenige Stellen gibt, an denen normgerechte Prüfkörper entnommen werden können. Daher wurde ein Probekörper definiert, der aus verschiedenen Stellen am Bauteil herausgearbeitet werden kann. An diesen Probekörpern kann eine Biegeprüfung durchgeführt werden. Dies kann aber nur zerstörend erfolgen.

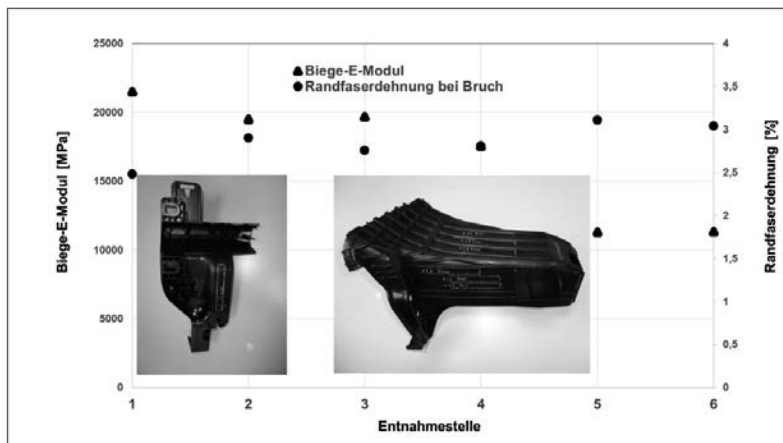


Diagramm 6: mechanische Kennwerte aus dem Bauteil

In die Kavität des Tragrohres wurde ein für die Montage benötigter Halter sowie ein Probekörper nach DIN EN ISO 527 integriert. Nach der Entformung werden der Halter und der

Probekörper vom Tragrohr abgetrennt. Der Probekörper wird zur Qualitätssicherung verwendet.

3.6 Ausblick aus Werkstoff Sicht

Die Materialeigenschaften des ausgewählten Werkstoffes genügen den Anforderungen an das vorgestellte Bauteil. Für die Entwicklung neuer Bauteile mit anderen geometrischen Randbedingungen bzw. erhöhten Steifigkeitsanforderungen z.B. aufgrund schwererer Lenksäulen, ist die Entwicklung eines Werkstoffes mit erhöhter Glasübergangstemperatur bei gleichzeitigem Erhalt der Bruchdehnung und des Verhaltens bei dynamischer Beanspruchung notwendig.

4. Werkzeugkonzept

4.1 Allgemeines

Wie bereits im Kapitel 3 erwähnt, war zum Zeitpunkt der Werkzeugauslegung nicht klar entschieden, ob bzgl. Bauteilsteifigkeit und Bauteilfestigkeit mit einem Organosheet gerechnet werden musste, und mit welchem Werkstoff das Werkzeug auszulegen ist.

Somit wurde für das Entwicklungswerkzeug, welches ebenso für die Kleinststückzahl als Serienwerkzeug verwendet worden ist, folgendes Auslegungskonzept entschieden:

1. Reine Spritzgussvariante, die bzgl. der Auslegung die höhere Priorität einnahm, da kostentechnisch ein Organosheet die schlechtere Variante darstellte.
2. Organosheet-Variante, bekannt aus der Spri-Form-Technologie, bei der ein aufgeheiztes Organosheet in das Spritzgusswerkzeug eingelegt, umgeformt und hinter-spritzt wird.



Bild 3: Variante 1 - Reine Spritzgussauslegung



Bild 4: Variante 2 - Organosheet im Querverbund und mit Thermoplast hinter-spritzt

Ebenso wurde für die Werkzeugauslegung entschieden, das verarbeitungstechnisch kritischste Material zu verwenden. Dabei stellte das PA6T/6I mit 50% Langglasfasern die höchsten Ansprüche an das Werkzeugkonzept.

Somit wurden, unter anderem, folgende Auslegungskriterien getroffen:

- Werkzeugtemperierung bis 160°C aufgrund des hohen Glasübergangspunktes von PPA-Materialsystemen.
- Angussystem ausgelegt auf Langglasfaser (faserschonend)
- Schmelzetemperatursensoren für die Überwachung im Heisskanalsystem (2 Stück) aufgrund des sehr engen Verarbeitungsfensters hinsichtlich Schmelzetemperatur.
- Heisskanalvolumen muss geringer als das Bauteilvolumen sein. Lange Verweilzeiten bei hohen Massetemperaturen sind bei PPA-Materialtypen extrem kritisch zu bewerten.
- Alle Heisskanal-Verteilerstrecken müssen bei einem Spritzguss-Zyklus komplett durchspült werden, um die Temperaturbelastung auf das Material so gering wie möglich zu halten.
- Extrem gute Werkzeugentlüftung wg. Brenner-Gefahr und erhöhtem Reinigungsaufwand.

4.2 Rheologie

Eine frühzeitige, rheologische Analyse des Bauteils sichert die Vermeidung klassischer stumpfer Bindenähte die sich erfahrungsgemäß unter der zu erwartenden hohen Bauteilbelastung negativ auswirken.

Ebenso wurde auf Lufteinschlüsse geachtet, die bei PA6T/6I-Materialsystemen zu starkem Materialabbau führen.

Durch intelligente Positionswahl der Düsen hat es sich bewährt, entstehende Bindenähte (durch weiteres Füllen vom Material) im Kernbereich abzuschwächen, um eine Systemfestigkeit aufrecht zu halten.

Am Bild 4 und 5 kann man erkennen, dass bei Entstehung der Hauptbindenähte noch kein Bereich der Form zu 100% gefüllt ist. Somit ist gewährleistet, dass im Kernbereich weiterhin ein Materialfluss gegeben ist und somit keine Abschwächung der Struktur erfolgt, die bei einer stumpfen Bindenaht entstehen würde.

Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass in der Nähe der Hauptbindenähte immer ein weiterer, geometrischer Bauteilabgang existiert, damit eine Bindenahtschwächung durch die bauteilbedingte Geometrie stabilisiert wird.

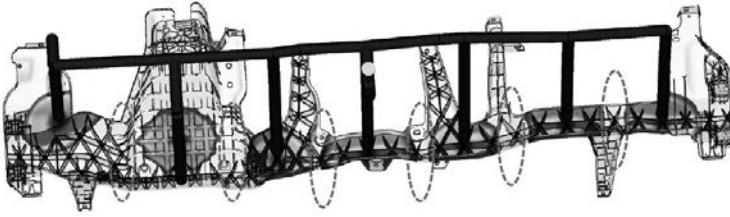


Bild 5: Entstehung der Hauptbindenähte – 40% Formfüllung



Bild 6: Hauptbindenähte an der Oberfläche geschlossen, weiteres Durchspülen wg. fehlender Formfüllung → Bindenähte werden im Kern verschoben.

Zusätzlich wurden sicherheitsrelevante Anbindungspunkte wie Lenksäulenanbindung oder Knieairbaganbindung nicht werkzeugfallend mit einem Durchbruch ausgestattet, sondern werden in einem Nachfolge-Prozessschritt frästechnisch erzeugt.

Damit wird der hohen Bindenahtschwäche von Langglasfaser-Materialien entgegengewirkt.

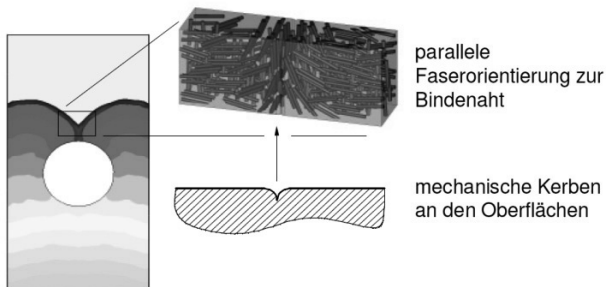
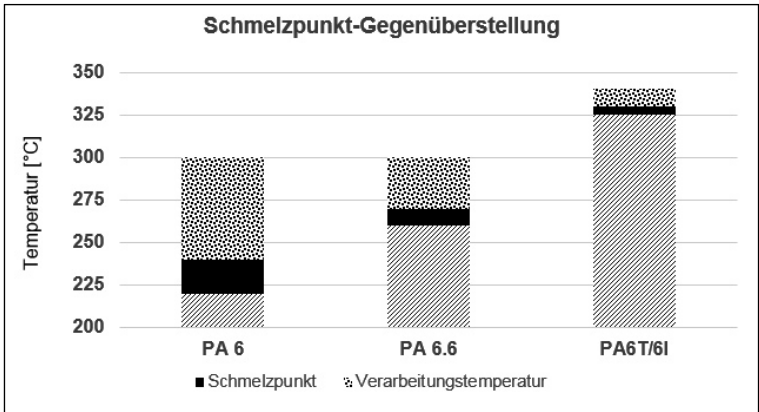


Bild 7: Klassische rheologische Situation bei einem Durchbruch [4]

Ein weiterer, sehr wichtiger Aspekt bei einer Werkzeugauslegung mit einem PPA-Material ist der Faktor Verweilzeit im Heisskanal.

PPA-Materialien werden in einem sehr hohen Temperaturprofil verarbeitet, welches nur ein sehr geringes Toleranzfenster zulässt.

Diese beiden Faktoren (hohe Verarbeitungstemperatur mit geringem Verarbeitungsfenster und so kurze Verweilzeiten wie möglich) haben die rheologische Auslegung deutlich beeinflusst.



Quelle: Fa. EMS-Chemie, Domat, Schweiz.

Diagramm 7: Schmelzpunkt-Gegenüberstellung von klassischen Polyamiden gegenüber einem PA6T/6I]

Für das Tragstruktur-Spritzgusswerkzeug für den M4 GTS ergab sich somit folgende Situation für die Heisskanalauslegung:

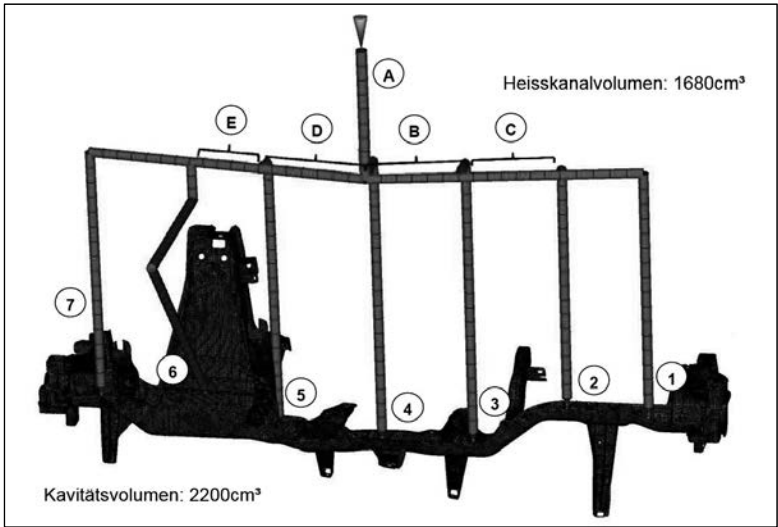


Bild 8: Heisskanalardarstellung Tragstruktur-Werkzeug

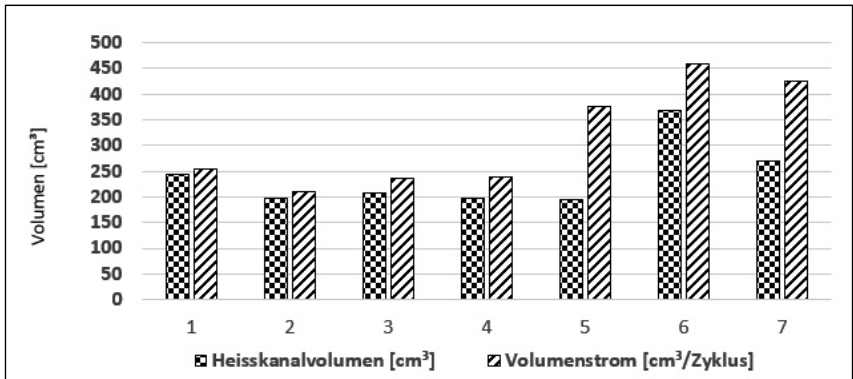


Diagramm 8: Heisskanalvolumen vs. Volumenstrom pro Zyklus. HK-Segmente A-E sind prozentual in den Heisskanalzweigen beinhaltet.

In Diagramm 8 ist zu erkennen, dass alle Verteilerbalken bei einem Spritzgusszyklus komplett mit neuem Material durchspült werden. Somit konnte die bestmögliche Variante in der Heisskanalauslegung für einen PA6T/6I-Matrixwerkstoff erreicht werden.

5. Fertigungskonzept

Für das Fertigungskonzept der Sonderserie M4 GTS wurde am Produktionsstandort BMW-Werk Landshut auf eine modulare Fertigungslinie gesetzt.

Je nach Stückzahlnachfrage wird dieses modulare System innerhalb einer Stunde aufgebaut, der Wochenbedarf an Bauteilen produziert und dann wieder platzsparend verstaut, um die Fertigungsfläche einer weiteren Technologie für den M4 GTS zur Verfügung zu stellen. Mit dieser modularen Variante wird die maximale Effizienz für eine Sonderserie erreicht.

Die Prozessschritte für die Thermoplastische Tragstruktur M4 gliedern sich wie folgt auf:

1. Spritzguss:



- Fertigung aller Serienteile im Pulk
- Metallische Einlegeteile für A-Säulenanbindung
- Zykluszeit: 86 sec.

2. Fräsen:



- Fräsen aller funktions- und crashrelevanten Durchbrüche
- Zykluszeit: 9,6 min.

3. Nietbolzen setzen:



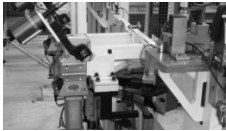
- Manuelles setzen von Blindnietbolzen und Blindnietmuttern über kraftgesteuerte Setzgeräte
- Taktzeit: 2,8 min.

4. Montage Anbauteile:



- Montage von C-Clipsen, Abstandshaltern, toleranzausgleichender Systeme zum Rohbau, Handschuhkastenhalter etc.
- Taktzeit: 6,4 min.

5. Ultraschall-Schweißen:



- US-Schweißen von toleranzausgleichenden Elementen (PA6) mit der Tragstruktur
- Taktzeit: 1,2 min.

6. Bauteilprüfungen

Zur Freigabe des Bauteiles wurden gemäß der in 2. genannten Anforderungen an die Instrumententafel-Tragstruktur alle erforderlichen internen und gesetzlichen Prüfungen durchgeführt.

Dies umfasst an Bauteil und Gesamtfahrzeug unter anderem folgende Prüfungen:

- Kriechverhalten unter Last bei verschiedenen Temperaturen
- Klimashaker
- Airbag Standversuch
- FMVSS 201 Kopfaufschlag (Pendelversuche)
- Schlittenversuche
- EMV-Prüfung
- Mantelrichttest
- Klopfprüfung zur Bestimmung des Lenksäulenschwing- und Akustikverhaltens
- HUD-Zittern im Fahrzeug
- Front- und Seitencrash

Nach erfolgter Fahrerprobung sowohl auf dem Messgelände als auch im Straßenbetrieb über Sommer- und Winterperiode wurde für den M4 GTS die Bauteilfreigabe erteilt.

7. Zusammenfassung

Durch die Verwendung eines mit speziellen Langglasfasern verstärkten, teilaromatischen Polyamidwerkstoffes (PA66+PA6I/X + 60%LGF), mit ausgewogenem Verhältnis zwischen Steifigkeit und Verhalten bei dynamischer Beanspruchung, in Kombination mit einer optimierten Werkzeugauslegung, unter Berücksichtigung der rheologischen Rahmenbedingungen, konnte bei der I-Tafel-Tragstruktur des M4 GTS eine Gewichtseinsparung von 1,6kg realisiert werden.

Literatur:

- [1] Datenblätter, Fa. EMS-Chemie, Domat, Schweiz.
- [2] Broschüre Fa. Akro-Plastic, Veröffentlichung Fakuma 2014
- [3] Nachhaltig mit Carbon, Vortrag Dr. Stephan Huber 39.VDI Kongress Kunststoffe im Automobilbau 2015

Consideration of local thicknesses within finite element simulation of injection molded thermoplastics

Dipl.-Ing. **M. Franzen**, Dr.-Ing. **O. Ghouati**,
Ford Werke GmbH, Aachen

1 Introduction

Today the automotive industry is challenged by a continuously rising number of demands having a strong influence on the development process. The need for CO₂ reduction and hence the resulting need to reduce the vehicle weight as well as the need to constantly improve occupant and pedestrian protection makes it necessary to fully utilize the deployed materials as efficiently as possible.

In order to be able to meet the increased requirements within the context of shorter cycle times and rising cost pressure, the use of virtual development tools is intensified. For crash simulations the explicit Finite Element Method (FEM) has been applied for a long time. However this process can only be successful when numerical methods are capable and there is a high confidence level.

Within current crash simulations not only the deformation characteristic of a part is of importance but especially assessment of the fracture risk. In 2003 Ford Motor Company R&A in cooperation with external partners therefore started several projects to address these issues. Within these projects the material model MF-GenYld+CrachFEM was developed for various material applications. This material model is capable of accounting for the high degree to which hardening and fracture behavior depend on the load condition and strain rate. This user-defined material model is suitable for the explicit FEM programs LS-DYNA and RADIOSS and is installed on the Ford Motor Company supercomputer cluster, making it applicable to all car-lines within the Ford Motor Company.

To correctly predict the failure risk within Finite Element (FE) crash simulations an advanced material model is only one step in the right direction. Due to the fact that fracture is highly dependent on local thickness, this information must be available as well. In injection-molded thermoplastic parts, however, the local thickness can vary significantly, e.g. in ribs, joints, local reinforcements or attachment points.

Thickness measurements on headlamp lenses showed that in this specific part the local thickness varies significantly. Similar variations have been found in other typical injection-molded parts used in Ford vehicles. It is obvious that ignoring these variations will lead to

false simulation results. However current practice is to use 2D mid-plane shell elements with a uniform thickness of the part or to divide the part manually into sub-areas to account for local thickness changes. This is very time-consuming and not applicable in daily product development. Solid elements are an alternative but this is also not at the moment applicable to full vehicle simulations.

Ford R&A in cooperation with the University of Minho (Portugal) as well as Altair Engineering GmbH (ALTAIR) has therefore developed a tool that automatically calculates the local thickness and transfers it to a Finite Element (FE) mid-plane shell mesh within minutes, even for big models. The tool is implemented into the standard software Hyper Works from Altair which is used by the Ford Motor Company and is globally available for the Ford CAE community. The calculation functionalities as well as the graphical user interface (GUI) are tailored to Ford Motor Company needs worldwide, facilitating the daily use of the tool within product development.

2 Technical approach

For injection-molded parts the local wall thickness is a design feature and this information is therefore included in the CAD data. For blow-molded thermoplastics the thickness is not specified exactly within the CAD data because the final part thickness is a result of the manufacturing process. For this reason the developed method described in this report is only applicable to injection-molded parts. For blow-molded parts a manufacturing simulation must be performed to derive the final local thickness distribution.

The idea of this local thickness measurement and assignment tool called CAD2FE is thus to obtain the local thickness from the CAD data. The basic approach is to calculate the thickness of an FE mid-plane shell element by shooting a ray from this element in both directions. The distance between the origin of the ray and its intersection with the CAD data will then give the local thickness (Figure 1).

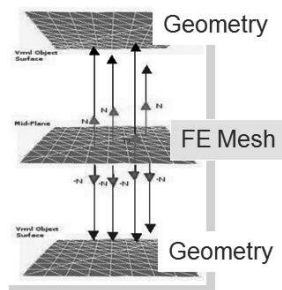


Fig. 1: Basic function of thickness measurement

However in realistic problems the following issues may occur which would significantly impair correct thickness calculation if no countermeasures were applied:

- The FE mesh may not lay parallel within the CAD surfaces, leading to incorrect (too large) thickness calculations.
- The FE mesh may even be outside the CAD surfaces, due to simplifications within the FE models, leading to no thickness measurement at all.
- Within the root of a fin the thickness would not be calculated correctly.

To overcome these limitations the final CAD2FE functionality includes several functionalities for identifying possible incorrect thickness calculation results and applying corrected thickness results. Within the project both the algorithm and the graphical user interface (GUI) were developed by the ALTAIR team. Ford R&A steered the validation procedure as well as the functionalities with the feature.

The final CAD2FE functionality is included in the HyperMesh V13 release and is now a standard feature. The functionality is based on a specification developed by R&A in cooperation with Ford Motor Company development teams all over the world:

- Ford of Europe (FoE)
- Ford North America (FNA)
- Ford of Mexico (FoM)
- Ford of Brazil (FoB)
- Ford of Australia (FoA)
- R&A Europe

The method is applicable to all injection-molded thermoplastics such as:

- Door trim, pillar trim, IP, console, glove box, LLS, GOR, headlamp, cowl, and so on

It can be used in the following attribute simulations:

- Low-Speed Damageability
- Crash
- NVH
- Durability

The tool is currently working for the following FE software tools:

- RADIOSS
- LS-DYNA
- ABAQUS
- NASTRAN

As mentioned before this method is not applicable to blow-molded thermoplastics such as fuel tanks, canisters or gas bottles.

3 Validation examples

Several validation examples have been analyzed at Ford R&A to verify the quality of the CAD2FE functionality as well as to develop best practice and lessons-learned procedures to be applied by Product Development (PD). Some of these validation examples are presented below.

3.1 Headlamp lens

The first validation example is a headlamp lens. The original simulation results in comparison with physical tests can be seen in Figure 2. To identify the variation within the physical parts three physical tests have been performed.

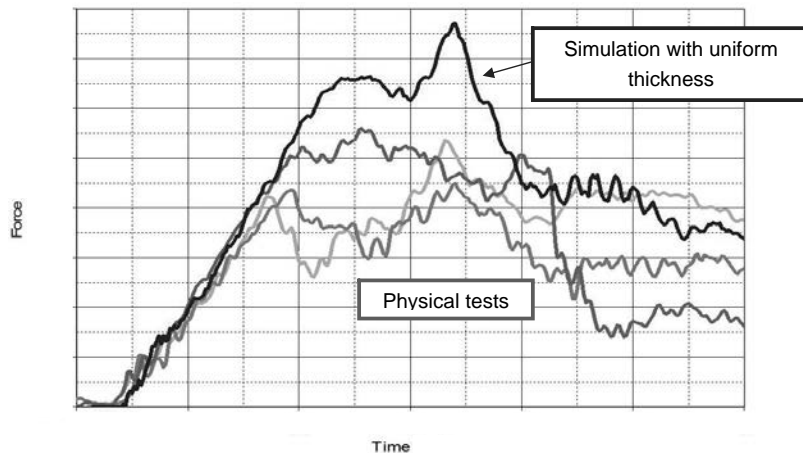
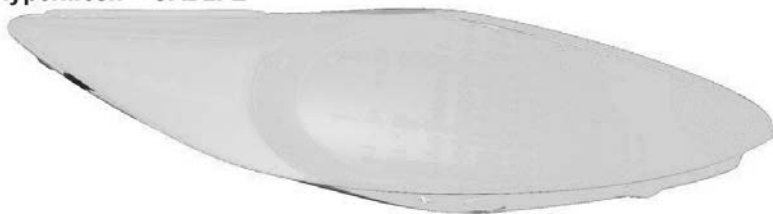


Fig. 2: Crash simulation vs. physical test, impact on lens, uniform thickness

These simulations have been performed with a lens which uses only two different thickness values within the FE simulation, which is a very simple but nevertheless a state of the art approach. In response to this unacceptable deviation between simulation and physical tests a laser scan of a physical lens was carried out to identify the true physical thickness of the parts. An example of such measurements is given in Figure 3.

HyperMesh – CAD2FE

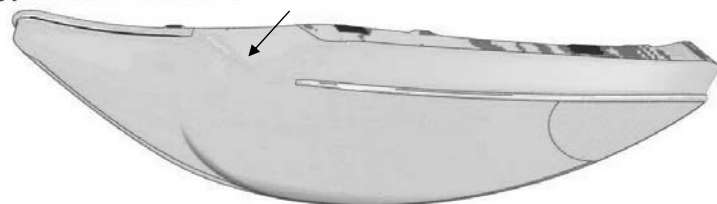


Physical 3D Laser Scan



Fig. 4: Comparison between physical thickness measurement and calculated thickness

HyperMesh – CAD2FE



Physical 3D Laser Scan

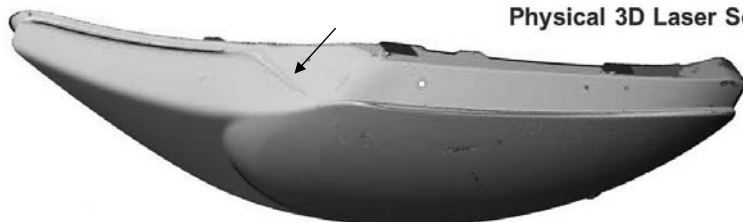


Fig. 5: Comparison between physical thickness measurement and calculated thickness

On the basis of these thickness calculations the simulations were repeated with the same settings, with only the local thickness values calculated by the HyperMesh functionality CAD2FE being added (see Figure 6).

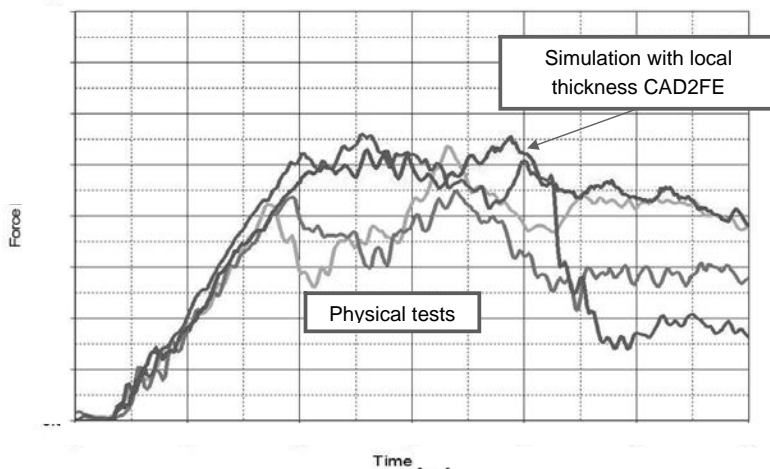


Fig. 6: Crash simulation vs. physical test, impact on lens, CAF2FE thickness

In comparison with the standard uniform thickness simulations (see Figure 2), the simulation quality regarding force-displacement behavior is significantly increased. The simulated forces now fall within the scatter of the test data.

3.2 Armrest

Additional quality checks have been performed with an armrest structure. Within these validations CAD2FE calculations were performed with HyperMesh 13 (see Figure 7), then transferred to the crash mesh and finally 3-point bending simulations were performed. These simulations are then compared with physical tests results as well as simulations with design thickness values. Results are shown in Figure 8.

The armrest simulation results show a significant quality increase when local thickness values are taken into account. The stiffness (elastic range) is represented in a much more accurate manner. The maximum force can now be correctly predicted, giving a quality increase of about 16%. The standard simulation predicts excessively high forces. After the first force drop the physical part exhibits several cracks and local fractures which can also be accurately represented with CAD2FE-based simulations, correctly representing the energy absorption of the part.

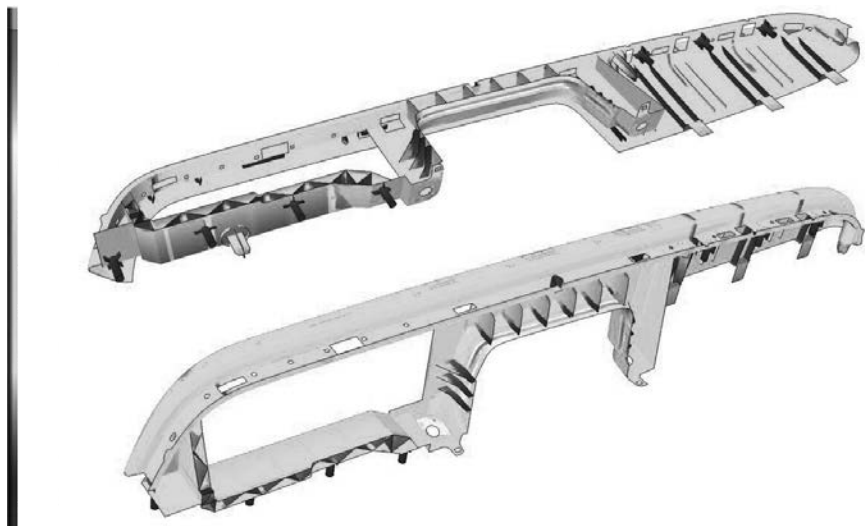


Fig. 7: Armrest, CAF2FE calculation results, local thickness

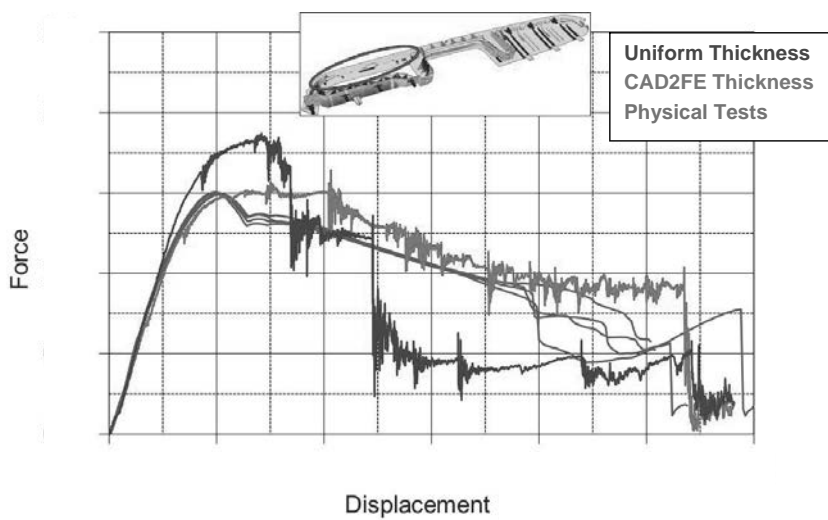


Fig. 8: Armrest 3-point bending test results vs. simulations

These good results are only achievable when the following boundary conditions are met:

- A fine mesh must be used to correctly represent the geometry of the part including all ribs and features.
- An advanced material model must be used to take into account complex deformation and fracture behavior of the thermoplastic (MF-GenYld+CrachFEM).
- The local thickness values must be taken into account (CAD2FE).
- If fiber-reinforced plastics are used then the local fiber orientation must be taken into account (injection simulation mapped onto the crash mesh).

4 Summary

To achieve high-quality simulation results detailed finite-element simulations are required. This includes the detailed definition of local thickness values for injection-molded and cast parts. To be able to take into account the local thickness distribution on an automated basis, Ford R&A together with Altair Engineering GmbH have developed a tool called CAD2FE which has been implemented and integrated into HyperMesh. This tool enables automatic consideration of local thickness values for mid-plane shell meshes within RADIOSS, LS-DYNA, NASTRAN and ABAQUS. The effectiveness and quality of this tool has been verified with several validation parts.

Werkzeugsensorik in der vernetzten Spritzgiessfertigung

Eine Voraussetzung für Industrie 4.0

Dr.-Ing. R. Vaculik, Kistler Instrumente AG, Winterthur

Kurzfassung

Industrie 4.0 ist allgegenwärtig und wird zur Zeit in unterschiedlichen Ansätzen in der Industrie umgesetzt. Auch die kunststoffverarbeitende Industrie hat sich diesem Ansatz verschrieben und zeigt in zahlreichen Demonstrationen die Möglichkeiten von Industrie 4.0 auf. Das Ziel ist es hierbei, durch Digitalisierung und Vernetzung der Daten innerhalb des Produktlebenszyklus Synergien zu gewinnen und letztendlich die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. Im Bereich der Spritzgiessproduktion bieten Sensoren im Werkzeug die Möglichkeit, den Prozess zu überwachen und transparenter zu gestalten. Gerade eine Überwachung des Werkzeuginnendrucks hat sich bewährt, da sie eine hohe Korrelation zur Bauteilqualität sicherstellt.

Seit langer Zeit schon ist die automatisierte Überwachung und Ausschusseparierung mittels Werkzeuginnendrucküberwachung in vielen sensitiven Industriezweigen Standard und ermöglicht den Betrieben deutliche Kosteneinsparungen. Das Zusammenführen der gewonnenen Daten in einem virtuellen Produktionsumfeld bietet dazu noch weitergehende Möglichkeiten, nicht nur den einzelnen Spritzgiesszyklus, sondern den gesamten Prozessablauf zu überwachen und zu optimieren.

Die Sensorik im Spritzgiesswerkzeug bietet hierzu die Basis. Der Beitrag zeigt den aktuellen Stand der Werkzeugsensorik sowie Zukunfts-Trends im Bereich der Sensorik und Weiterverarbeitung der Daten auf. Hierbei dient die einfache, intuitive Nutzung der Komponenten und die gewonnene Transparenz in der Produktion als Schlüsselfaktor für die Akzeptanz der Technologie und letztendlich den erzielten wirtschaftlichen Vorteil.

1. Industrie 4.0 – die vierte industrielle (R)Evolution

Das Schlagwort Industrie 4.0 ist letztendlich auch in der Kunststoffverarbeitung angekommen und bewegt aktuell unsere Industrie. Zahlreiche Bestrebungen zur Automatisierung und Vernetzung von Produktionsvorgängen, sowie die Digitalisierung der Fertigungsumgebung wer-

den zurzeit unter diesem Begriff zusammengefasst. In Bezug auf die Automatisierung ist dies jedoch kein neuer Ansatz, bereits in der achtziger Jahren gab unter dem Begriff CIM (Computer Integrated Manufacturing) zahlreiche Ansätze zur Vernetzung der Produktion meist mit dem Ziel einer mannlosen Fertigung.

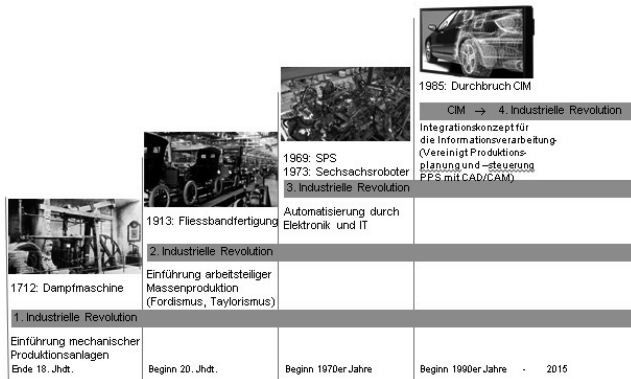


Bild 1: Die Stufen der industriellen Revolution [1;2]

Die heutigen Ansätze von Industrie 4.0 gehen jedoch über dieses Ziel weit hinaus. Hier wird ebenfalls der komplette Life Cycle eines Produktes betrachtet und der Mensch in den Mittelpunkt gestellt. Ein weiteres Kriterium liegt in der Sammlung und systematischen Nutzung aller Daten, die auch in entferntem Zusammenhang mit dem Produkt stehen. Dies bezieht sich auf den Bereich der Entwicklung, Fertigung oder Nutzung.

Das heisst für diesen Aspekt von Industrie 4.0 spielt die Datenerfassung im Prozess und die Korrelation mit der Qualität und dem Produktionszustand eine grosse Rolle. Als Hersteller von Sensoren und Messtechnik bietet die Fa. Kistler mit ihren Produkten die Basis und eine wesentliche Voraussetzung für die Vernetzung und sinnvolle Nutzung der Daten.

Das Ziel eines solchen Ansatzes ist es natürlich nicht nur die Daten zu sammeln, sondern diese auch gewinnbringend einzusetzen. Ohne den starken Fokus auf Qualität und der Wirtschaftlichkeit einer Lösung wird sich das Gesamtkonzept nur sehr schwer in unseren mittelständisch ausgerichteten Betrieben umsetzen lassen.

2. Prozessüberwachung mit Werkzeugsensorik

Die Prozessüberwachung des Spritzgiessprozesses mittels Werkzeuginnendruck und –temperatur ist ein bewährte Vorgehensweise, die Qualität abzusichern und im Prozess Kosten zu sparen. Wie schon sehr lange bekannt, spiegeln sich Prozessabweichungen sehr direkt im Verlauf der Werkzeuginnendruckkurve. Sowohl Abweichungen des Materials, als auch sonstige Störgrößen bewirken eine charakteristische Veränderung des Kurvenverlaufs. Somit ist es möglich, an Hand des Signals eine Entscheidung zu treffen, ob es sich bei dem gefertigten Bauteil um ein Gutteil oder mit hoher Wahrscheinlichkeit um ein Schlechtteil handelt. In diesem Fall wird das Bauteil automatisch separiert.

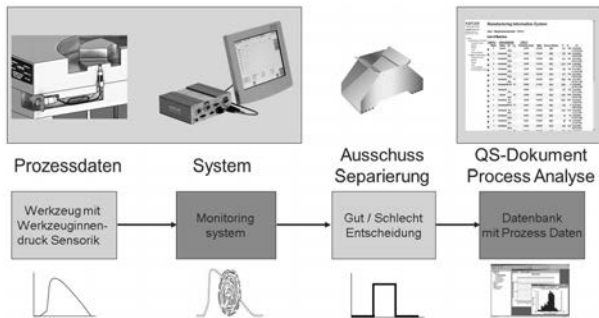


Bild 2: Messwerterfassung und Gut/Schlechtentscheidung

Das Ergebnis aller Bewertungen wird gespeichert und steht für weitere Auswertungen zur Verfügung. In einer zentralen Datenbank können die Kurvenverläufe zentral abgespeichert und verwaltet werden.

3. Die Werkzeugsensorik wird digital

Die Messung des Werkzeuginnendrucks erfolgt wegen der hohen Dynamik und der hohen Belastbarkeit der Sensoren heute ausschliesslich mit piezoelektrischen Drucksensoren. Hierbei erzeugt das Messelement durch den piezoelektrischen Effekt eine Ladungstrennung, die proportional zum Druck oder der Kraft ist. Die Ladung muss dann über ein sehr hoch isolierendes Kabel und Steckverbindungen zum sog. Ladungsverstärker übertragen werden, der das Ladungssignal in ein Spannungssignal umwandelt. Der Ladungsverstärker oder der

System Monitor ist in der Regel maschinenfest montiert und liefert anschliessend ein digitales oder analoges Signal an die Maschinensteuerung. Dies kann der Kurvenverlauf zur Visualisierung, ein Steuersignal für Roboter / Ausschussweiche oder ein direkter Eingriff, wie Umschaltsignal / Regeleingriff sein.

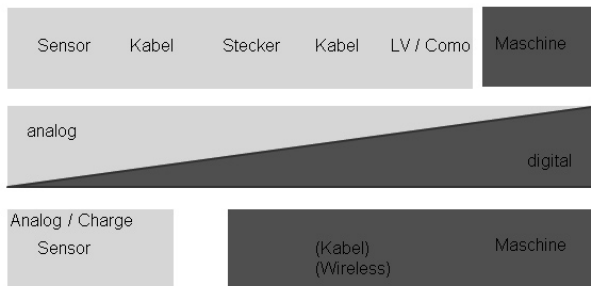


Bild 3: Digitalisierung der Messwerterfassung

Im Zuge der Digitalisierung der gesamten Spritzgiessfertigung ist es notwendig, die Umwandlung in ein digitales Standardformat möglichst frühzeitig in der Messkette vorzunehmen. Die Idealvorstellung ist, dass der Sensor selbst schon ein digitales Signal erzeugt, das heißt der Ladungsverstärker ist bereits in den Sensor integriert. Dieser Ansatz ist sicher langfristig das Ziel, stößt aber in der aktuellen Umsetzung auf verschiedenen Herausforderungen. Dies sind die

- fortschreitende Miniaturisierung der Sensorik. Allein durch die Größe des Steckverbinders sind Grenzen aufgezeigt.
- Temperaturen im Werkzeug. Gängige Elektronik ist bis ca. 80°C spezifiziert. Teilweise herrschen aber in den Werkzeugen deutlich höhere Temperaturen.
- Verkabelung allgemein. Die Versorgung der Elektronik mit Spannung und die digitale Datenübertragung erfordern immer ein mehradriges Kabel. Insofern wird auf absehbare Zeit der Wunsch nach einer kabellosen Datenübertragung innerhalb des Werkzeugs nicht realisierbar sein.

4. Vernetzung von Prozessdaten

Das zentrale Thema in der Prozessdatenverarbeitung ist die Vernetzung und Ablage in einer zentralen Datenbank. Die Lösung im Spritzgiessbereich der Fa. Kistler heisst Como-

DataCenter (CDC) und legt die kompletten Prozess- und Produktionsdaten auftragsbezogen ab. Die Datenbank ist ähnlich aufgebaut wie ein MES System, geht jedoch in seiner Funktionalität nicht so weit. Der Fokus liegt vielmehr auf prozessrelevanten Daten inklusive der kompletten Kurvenverläufe. Somit ist der Anwender in der Lage, auf der Basis einfacher Filterfunktion bestimmte Datensätze zu finden und im Detail zu analysieren. Die Auswertefunktion beschränken sich konsequenterweise auf die Prozessdaten und weniger auf die Produktionsdaten.

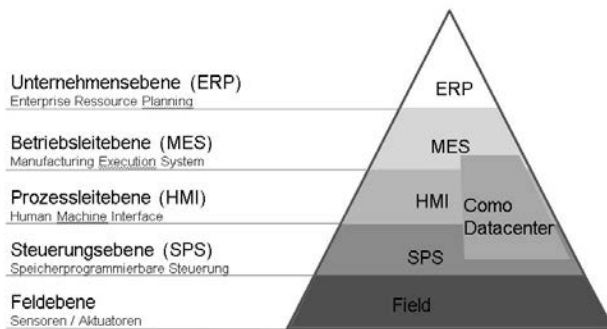


Bild 4: Kommunikationsebenen im Produktionsbetrieb

In Bild 4 ist die Kommunikationsstruktur zwischen den unterschiedlichen Steuerungs- und Planungsebenen im Unternehmen dargestellt. Die Pyramide basiert auf den Basisdaten aus Sensoren und Aktuatoren und aggregiert die Information weiter bis auf die Unternehmenssteuerebene mit dem ERP System. Die Datenbanksoftware CDC ist im Wesentlichen auf der Ebene Prozessleitebene einzustufen und kommuniziert mit höheren Ebenen wie einem MES oder ERP System.

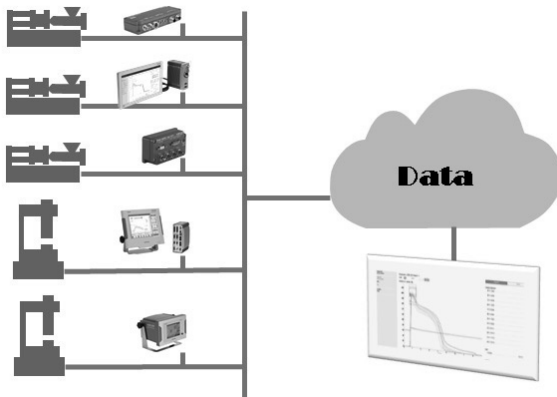


Bild 5: Vernetzung von Produktionsmitteln in der Spritzgiessfertigung

Die eigentlichen Daten, d.h. Messkurven, Gut/Schlecht-Ergebnis sowie weitere Produktionsdaten werden durch verschiedene busfähige Geräte über eine Ethernet Verbindung eingespeist. Dies ermöglicht eine Vernetzung über ein firmeninternes Netzwerk oder sogar über eine gesicherte Internetverbindung weltweit. Zur NPE 2015 wurden beispielsweise fünf Produktionsstandorte in USA und Europa vernetzt und eine virtuelle, weltweit vernetzte Produktionsumgebung als Live-Demo gezeigt. Da die Visualisierung ebenfalls auf Web Technologie basiert, ist der Nutzer nicht orts- oder geräteabhängig und kann von überall auf die einzelnen Spritzgiessprozesse zugreifen und sich im Detail die Prozessdaten ansehen.

6. Prozessanalyse

Im Folgenden werden einige Beispiele gezeigt, wie mit den in der zentralen Datenbank gespeicherten Prozessdaten weitergehende Analysen durchgeführt werden können. Dies geht über die Bewertung des einzelnen Spritzgiesszyklus und Ausschussbewertung hinaus und ermöglicht die Bewertung einer Prozesses. Die Bewertung erfolgt derzeit durch den Benutzer mit seinem persönlichen Erfahrungswissen. Es werden jedoch derzeit intelligente Algorithmen implementiert die in der Lage sind, Fehler zu indentifizieren und dem Anwender Hinweise zur Korrektur zu geben.

In Bild 6 sind die Prozessdaten eines Chipkartenbauteils dargestellt. Bei dieser Chipkarte mit umspritzten Chip, ist die Überwachung des Maximaldruckbereichs besonders wichtig, da beispielsweise ein zu hoher Druck den eingelegten Chip beschädigen kann. Im rechten Teil

des Bildes sind die Werkzeuginnendruckkurven für angussferne und angussnahe 2,5 mm Druckaufnehmer (6182A mit Single Wire Technik) und die Überwachungsfenster dargestellt. In der Trendanalyse ist der Wert dargestellt bei dem die Kurve in das Überwachungsfenster eintritt. Es zeigt sich deutlich dass der Prozess extrem konstant und robust läuft.

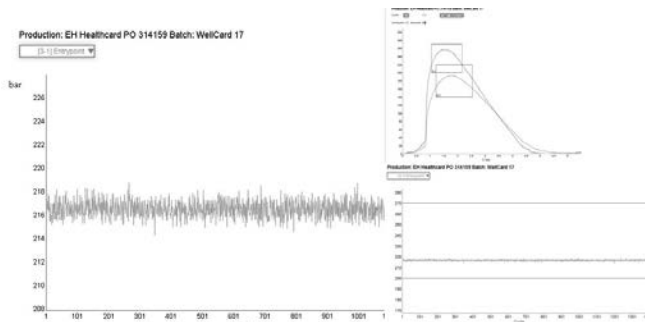


Bild 6: Prozessdatenauswertung einer Chipkartenproduktion

Der überwachte Druckwert schwankt lediglich im Bereich weniger bar, somit ergibt sich ein cpk Wert grösser als 5, was eine sehr stabile Produktion bescheinigt.

Das zweite Beispiel entstammt einer Produktion, die im Rahmen der NPE Demo aufgezeichnet wurde. Es handelt sich hierbei um ein 8 Kavitäten Steckerwerkzeug. Überwacht wurde der maximale Werkzeuginnendruck als Indikator für ein nicht vollständig gefülltes Teil, ein sog. Short Shot. Auf den ersten Blick ist schon zu sehen, dass in dieser Produktion zwar die Überwachungsgrenzen bis auf wenige Ausnahmen eingehalten wurden, aber verschiedenen Störungen aufgetreten sind. Das Werkzeug ist mit einem Heißkanal ausgestattet und jede Kavität enthält zur Überwachung einen angussfern platzierten 1mm Druckaufnehmer (6183A). Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in dieser Grafik lediglich eine Kavität gezeigt. Die sinusartige Schwingung nach dem Anfahren des Prozesses deutet auf einen ungünstig eingestellten Heißkanalregler hin. Die Regelparameter sollten optimiert werden, dann kann dieses Verhalten vermieden werden. Die einzelnen Peaks des Maximaldrucks nach unten oder oben zeigen zufällig auftretende Störungen, die zu einem Ausschussteil führen. Im Fall des Unterschreitens der Minimalgrenze handelt es sich um einen Short Shot wohingegen beim Überschreiten eine Überspitzung vorliegt.

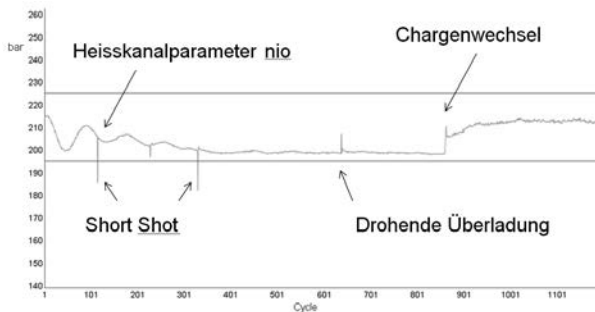


Bild 7: Trenddarstellung des Maximaldrucks bei einem Steckerbauteil

Die Überwachung mit einem Temperatursensor an der gleichen Position am Fließwegende wäre in diesem Fall nicht in der Lage gewesen, den Fehler zu erkennen, und das Bauteil auszusortieren.

7. Ausblick

Es zeigt sich, dass mit Hilfe Werkzeuginnendrucktechnik beim Spritzgießen der einzelne Zyklus aber auch die langfristige Entwicklung des Prozesses sicher überwacht werden kann. Der Verarbeiter ist somit heute schon in der Lage maschinenunabhängig seinen Prozess zu überwachen und Ausschuss zu vermeiden. Die zukünftige Entwicklung geht dahin den Anwender auch bei der Fehlervermeidung zu unterstützen und typische Fehler zu identifizieren. Eine vollautomatische Regelung des Prozesses ist jedoch lediglich in Teilelementen sinnvoll umsetzbar. Dem Verarbeiter zu suggerieren, dass mit einem simplen eindimensionalen Regelkreis ein so komplexes System wie der Spritzgießprozess quasi als Black Box behandelt werden kann, wird nicht die Lösung sein. Der Mensch steht weiterhin im Mittelpunkt, wichtig ist es jedoch, ihn durch einfache Handhabung und intelligente Assistenzsysteme in seinen Entscheidungen zu unterstützen.

- [1] Bild analog DFKI Bericht, 2011
- [2] Kagermann, Wahlster, Helbig - Promotorengruppe Kommunikation der
Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft: Umsetzungsempfehlungen für das Zu-
kunftprojekt Industrie 4.0, 2012

Tanksysteme aus Kunststoff, Energieträger für zukünftige Fahrzeugkonzepte

Dr.-Ing. **U. A. Karsch**, Kautex Textron, Bonn

Kurzfassung

Die Mehrheit der heutigen Kraftstofftanksysteme in aller Welt besteht aus Kunststoff, mehrheitlich aus hochmolekularem Polyethylen (HDPE) in Einschicht- und Mehrschicht-Wandaufbau, hergestellt im Blasformverfahren. Steigende Anforderungen hinsichtlich Emissionsdichtigkeit und z.B. Geräuschentwicklung haben die Entwicklung vom einfachen Blasformprozeß hin zu der Herstellung von Tanks im Halbschalenverfahren vorangetrieben.

Die Funktionsweise der Halbschalenfertigung wird beschrieben. Mit dieser Halbschalentechnologie können alle erforderlichen Tankvarianten einschließlich druckbeaufschlagter Tanks für Hybridfahrzeuge gefertigt werden. Hintergründe zur Drucktankentwicklung werden erläutert. Zahlreiche Detailentwicklungen und Anpassungen des Tankdesigns ermöglichen heute Tanks für Hybridfahrzeuge in Vollkunststofflösung.

Ein Technologiewandel im Herstellverfahren hat sich auch bei Tanks für SCR-Tanksysteme in Dieselfahrzeugen vollzogen. Von ehemals blasgeformten Behältern werden heute Tanks im Spritzgießverfahren mit hoher Funktionsintegration produziert. Nahezu alle Dieselfahrzeuge werden zukünftig mit SCR-Tanksystemen zur Abgasreinigung durch Stickoxidreduzierung (NO_x) ausgestattet.

E- Mobility wird den Kunststofftank nicht gefährden. Tanks für Hybridfahrzeuge profitieren von der Weiterentwicklung des Kunststofftanks. Flüssigkraftstoffe wie Benzin und Diesel haben nach wie vor die größte gewichtsspezifische Energiedichte. Kunststofftanks sind die weiterhin bevorzugten Energieträger dieser Kraftstoffe. Hochdrucktanks für gasförmige Kraftstoffe als Energieträger für alternative Antriebe werden kurz diskutiert

1. Stand der Technik heute

Tanksysteme heutiger Fahrzeuge bestehen in dem Europäischen und Nordamerikanischen Markt zu über 90% aus Kunststoff, in den BRIC Staaten sind inzwischen ebenfalls Anteile über 60% zu verzeichnen (**Bild 1**). Dabei fand der Einzug des Kunststoffkraftstoffbehälters (Kurz: KKB) in den PKW erst mit der Großserienfertigung des VW Passat ab 1973 so richtig statt, dann allerdings mit jährlichen prozentualen Wachstumsraten im zweistelligen Bereich. Möglich wurde das durch die kostengünstige Fertigung im Blasformverfahren, die Verwendung des hochmolekularen Polyethylens (HDPE) und die Anforderungen der OEM, volumenoptimierte und korrosionsfreie Tanks zu erhalten.

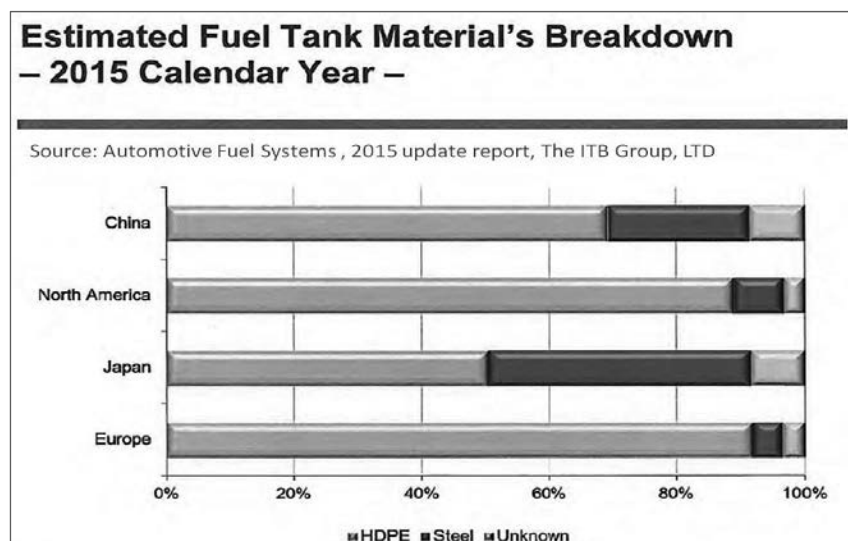


Bild 1: Anteile des Kunststofftanks regional nach Materialien

Die Weiterentwicklung der Blasformtechnologie, und die parallel sich verschärfenden gesetzlichen und OEM-Anforderungen haben dazu geführt, dass heute zur Erfüllung der Emissionsanforderungen ein Wechsel von einschichtiger HDPE Mono-Tankwandstruktur zu fast ausschließlich mehrschichtiger Coex-Wandstruktur erfolgt ist (**Bild 2**). Dazu wird in den Wandaufbau eine für Kraftstoffmoleküle undurchlässige Schicht aus Ethylenvinylalkohol (EVOH) eingebaut, ohne dass sich die positiven Eigenschaftsmerkmale des Kunststofftanks verändert haben [1, 2]. Die beiden Kunststoffe HDPE und EVOH sind nicht direkt miteinander

der verschweißbar, daher erfolgt die Einbindung der EVOH-Schicht mit Hilfe von Haftvermittlerschichten auf Basis eines maleinsäureanhydrid-modifizierten Low Density Polyethylens (LDPE). Die Haftung zwischen den Schichten und auch die Mechanik der zwei unterschiedlichen Kunststoffe werden somit sichergestellt. Die Haftvermittlerschichten und die EVOH-Schicht sind meist in Summe nicht dicker als 0,5 mm, bei einer mittleren Gesamtwanddicke von ca. 4-5mm. Eine weitere Schicht im Wandaufbau, die sogenannte Regeneratschicht, besteht aus wieder aufgearbeitetem Produktionsabfall, dem „Butzen“, der bei jedem Blasformprozeß durch das Abquetschen der Ränder des Tanks entsteht. Somit ist der Blasformprozeß nahezu abfallfrei. Eine aus kosmetischen Gründen schwarz eingefärbte Außenschicht aus HDPE komplettiert den Wandaufbau und gibt den Tanks ihr typisches schwarzes Aussehen.

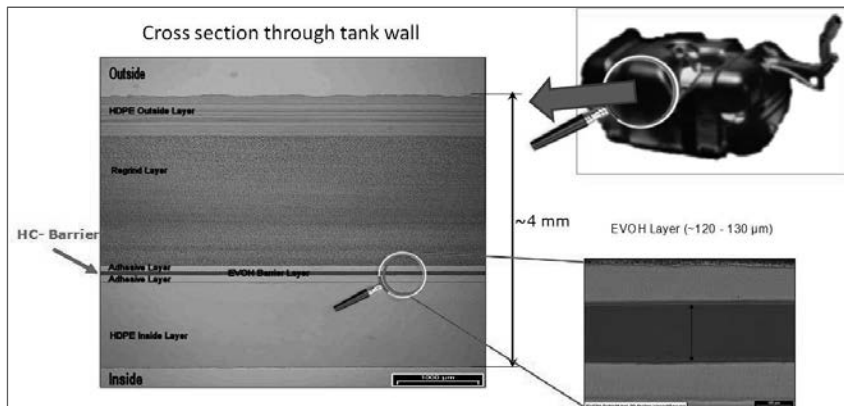


Bild 2: Ausschnitt und Querschnitt durch eine 6-schichtige Tankwand

Die Vorzüge dieser heute so aufgebauten KKB liegen auf der Hand:

Der Kunststoff HDPE ermöglicht eine nahezu unbegrenzte Gestaltungsfreiheit, die Tanks sind korrosionsfrei, haben eine hohe Crash-Sicherheit durch zähelastisches Materialverhalten auch bei tiefen Temperaturen, sind durch den Coex-Sechsschichtaufbau emissionsdicht, sind vergleichsweise leichter als vergleichbare Stahltanks, und haben sich wegen des Blasformverfahrens mit hoher Stückzahlausbringung auch wirtschaftlich durchgesetzt.

2. Wandel der Herstelltechnologien für Kraftstoff- und SCR-Systeme

a) Kraftstoffsysteme:

Die oben beschriebenen Anforderungen für Tanksysteme haben sich im Laufe der Zeit weiterentwickelt. Eine Forderung ist maximales Füllvolumen bei bestehendem Bauraum im

Fahrzeug, eine andere ist optimales Betankungs- und Entlüftungsverhalten unter allen auftretenden Fahr- und Standbedingungen. Zudem macht der zunehmende Fahrkomfort, insbesondere bei Mittel- und Oberklassefahrzeugen, die Geräuscentwicklung im Tank zu einem Problem. Die Passagiere dürfen vom Tank nichts spüren oder hören. Schwappgeräusche z.B. bei einem Start-Stopp-Betrieb sind nicht gestattet.

Diese Anforderungen machen es notwendig, dass die Ventiltechnik im Tank perfekter werden musste, d.h. Ventile müssen z.B. in nur schwer zugängliche Ecken eines Tanks platziert werden. Zusätzlich müssen Schwallwände zur Vermeidung der Schwappgeräusche im Tank installiert werden. Es kommen also zahlreiche Komponenten in den Tank hinein. Eine Lösung dafür ist, dass nach Fertigstellung des Tankkörpers an den Stellen, wo Ventile oder andere Bauteile wie z.B. Schwallwände befestigt werden, Löcher in die Tankhülle geschnitten werden und die Bauteile von außen angeschweißt werden. Diese Vorgehensweise ist heute für Niedrig/Null-Emissionstanks nicht mehr praktikabel. Die aufgeschweißten Bauteile sind aus Emissionsgründen aufwändige 2-Komponenten Teile (meist PA 12 mit HDPE umspritzt), da sie einerseits an den HDPE Tank angeschweißt werden müssen, andererseits auch ein Maximum an Emissionsdichtheit aufweisen sollen. Schwallwände sind von den Dimensionen her nicht über den herkömmlichen Blasformprozeß in einen Tank zu integrieren.

Die Lösung für die oben beschriebenen Herausforderungen ist die Integration der Intank-Komponenten in eine offene Tankhalbschale. Im herkömmlichen Blasformverfahren wird über eine Runddüse ein runder Schmelzeschlauch extrudiert, in der Form aufgeblasen und anschließend entformt. Damit ist ein geschlossener Hohlkörper (Tank) entstanden. Es ist sehr schwierig, in diesen vom Durchmesser her begrenzten runden Schlauch entsprechende Tankeinbaukomponenten, insbesondere, wenn sie großflächig angeordnet sind, einzubringen. Vom Thermoformverfahren ist bekannt, dass man Komponenten in offene Halbschalen einbringen kann. Jedoch muss man bei diesem Verfahren, bei dem der Kunststoff in Platten vorliegt, diese Platten zweimal erwärmen. Zum ersten Mal wird der Kunststoff für die eigentliche Plattenextrusion aufgeschmolzen, zum zweiten Mal werden die bereits extrudierten, masslich konfektionierten Platten zur eigentlichen Umformung in die Tankhälfte im Thermoformprozess erneut erwärmt. Um diese zwei Erwärmungsschritte zu sparen, ist man dazu übergegangen, diese Platten für die Tankherstellung inline zu fertigen. Dazu wird der ursprünglich runde Schmelzeschlauch durch eine geeignete doppelt wirkende Breitschlitzdüse in zwei parallele Plattenschmelzeströme aufgeteilt, die jeweils noch ihren 6-schichtigen Wandaufbau besitzen. In **Bild 3** wird dieses Prinzip gezeigt.

Diese kontinuierlich extrudierten Platten werden dann mittels Vakuum in die entsprechenden Tankformhälften des Tankwerkzeugs gezogen, das sich unterhalb der Breitschlitzdüse in Position befindet. Damit das Vakuum im Werkzeug wirken kann, werden die Platten durch ein zwischen die Platten eingebrachtes mehrteiliges Mittenwerkzeug entsprechend abgedichtet.

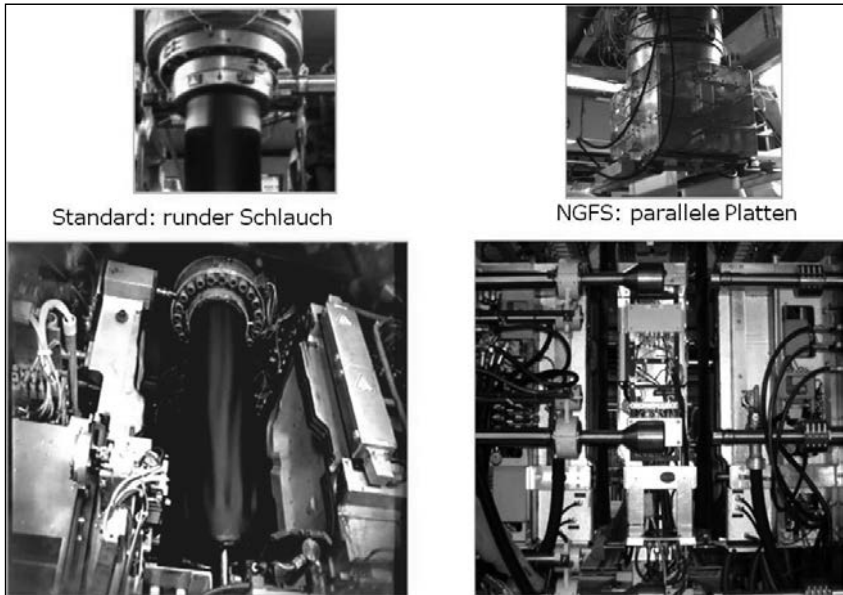


Bild 3: Vergleich herkömmliche Extrusion mit NGFS® Verfahren

In diesem Mittenwerkzeug sind, getrennt nach Tankober- und -unterseite, die jeweiligen Tankeinbaukomponenten positioniert, die nach Ausbildung der Tankhälften in die entsprechenden Tankseiten platziert und fixiert werden. Die gesamte Einheit aus Werkzeug und Mittenrahmen wird dann unter der Breitschlitzdüse wegbewegt, damit die kontinuierliche Extrusion der Platten nicht behindert wird.

Die eingebrachten Komponenten werden an der Tankwand fixiert. Das Mittenwerkzeug verlässt das eigentliche Tankwerkzeug, dieses wird nun final geschlossen und die Quetschnaht am Tank ausgebildet. Nach einer weiteren Abkühlphase im Werkzeug und Spülung des Innentankbereichs mit kalter Luft wird der Tank anschließend entformt und zur weiteren Bearbeitung transportiert. Die Zykluszeit mit diesem Verfahren entspricht der gleichen Zykluszeit wie bei einem herkömmlich hergestellten Tank.

Dieses Verfahren der inline geformten Tankhalbschalen wird bei Kautex Textron NGFS® (Next Generation Fuel System) genannt. **Bild 4** zeigt den schematischen Ablauf. Das Verfahren der inline geformten Tankhalbschalen ist seit ca. sieben Jahren im Serienprozess. Zu Beginn der Einführung dieses neuen Verfahrens gab es nur wenige Tankprojekte, die mit NGFS® in Serie gefertigt wurden. **Tabelle 1** zeigt die Entwicklung dieser Technologie bei Kautex Textron. Inzwischen wird dieses Verfahren von nahezu allen Tankherstellern global ausgerollt. Es gibt dabei von Hersteller zu Hersteller geringfügige

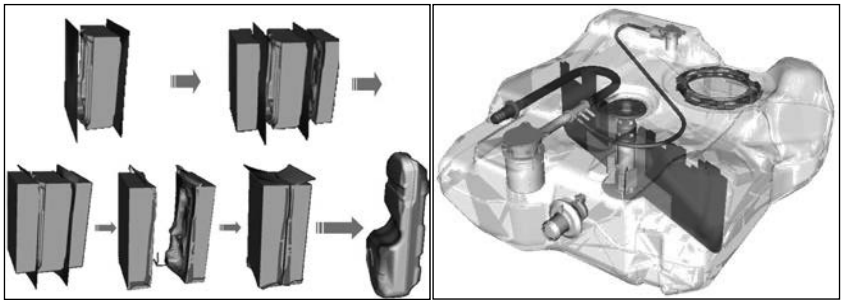


Bild 4: In der linken Hälfte schematischer Prozessablauf, rechts transparenter Blick in das Innere eines so hergestellten Tanks mit Schwallwand und weiteren Intank-Komponenten

Unterschiede im eigentlichen Verfahrensablauf, auch die Benennung des Verfahrens ist unterschiedlich, aber grundsätzlich wird das Tankhalbschalenprinzip verwendet. Das spricht

Tabelle 1	2009	2015
Customers	2	7
Projects	2	18
Production locations	2	13
Machines	3	21

zum einen für die Vorteile des Verfahrens, die auf der Hand liegen, da man nun Tankkomponenten vor dem Fügen der Halbschalen beliebig in den Tank einbauen kann. Zum anderen ermöglicht es dem

OEM, komplexe Tankgeometrien mit ebenso komplexen Innenleben weiterhin in Kunststoffbauweise einsetzen zu können. Insbesondere für die Einbringung der den Geräuschpegel senkenden Schwallwände im Tank eignet sich das Verfahren ganz besonders.

Neben den anderen üblichen Komponenten wie Ventilen, Schwalltöpfen, Leitungen, Saugstrahlpumpen, Schwallwänden (**Bild 5**) etc. ist dieses Verfahren dazu prädestiniert, auch die für den Hybridtank notwendigen Versteifungselemente in den Tank zu platzieren.

Weitere Vorteile des Verfahrens bestehen darin, dass die extrudierten Platten getrennt in ihrer Wandstärke geregelt werden können. Damit lassen sich im Vergleich zum herkömmlichen Blasformverfahren Gewichtsreduzierungen bis zu 8% am Tank erzielen.

Die Anwendung dieses Halbschalen-Verfahrens für Tanks für Hybridfahrzeuge wird im nächsten Kapitel beschrieben.

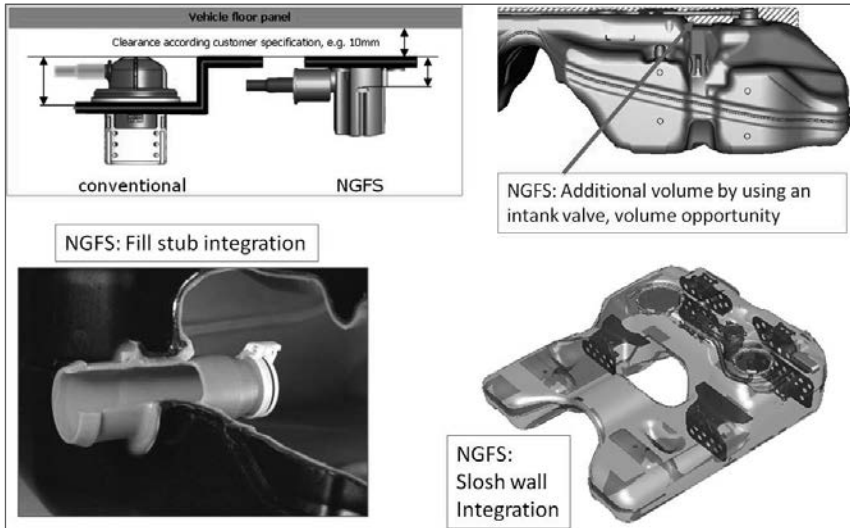


Bild 5: Vergleich Volumengewinn durch NGFS® und Integration von Komponenten

b) SCR-Systeme:

Ein Technologiewandel hinsichtlich des Herstellprozesses von Tanks für SCR-Systeme (Selective Catalytic Reduction) hat sich in den letzten Jahren ähnlich vollzogen wie beim Herstellverfahren für Kraftstofftanks. SCR-Tanksysteme sind nicht in erster Line Energieträger, sondern nur indirekt, da durch die Einspritzung der wässrigen Harnstofflösung in den Auspuffstrang der Dieselfahrzeuge Verbrauchsreduzierungen zwischen 3-8% erzielt werden können. Hier soll nicht weiter auf die Spezifika der SCR-Technologie eingegangen werden, sondern auf den Wandel des Tankherstellprozesses aus Kunststoff [3].

Bevorzugtes Material für den SCR-Tank im Dieselfahrzeug ist ebenfalls HDPE, aus ökonomischen wie auch mechanischen Gründen. Die ursprüngliche Herstelltechnologie ist gleichfalls das Blasformen. Allerdings sind die Anforderungen an einen SCR-Tank im Vergleich zum Kraftstofftank anders gelagert. Die wässrige Harnstofflösung, die aus 32,5% Harnstoff (Urea) und 67,5% Wasser besteht, ist am bekanntesten unter dem Handelsnamen AdBlue®.

Man findet aber auch sehr häufig, speziell im angloamerikanischen Raum, die Bezeichnung DEF (Diesel Exhaust Fluid) oder AUS 32 (Aqueous Urea Solution). Diese Flüssigkeit hat im Gegensatz zu handelsüblichen Kraftstoffen einige spezielle Eigenschaften, die bei der Auslegung eines Tanksystems besondere Berücksichtigung finden müssen: Gefrierpunkt bei -11°C , Kristallisation bei Trocknung, Alterung bzw. hydrolytischer Abbau bei erhöhter Temperatur ($>40^{\circ}\text{C}$), Geruchsentwicklung und Emission von gasförmigem Ammoniak, wegen des Ammoniakgehaltes chemisch aggressives (korrosives) Verhalten.

Insbesondere das Einfrierverhalten bei -11°C stellte die Ingenieure vor neue Herausforderungen. Nicht dass man Angst vor der Deformation des Kunststofftanks durch Eis hätte, aber der Eisdruck ist in der Lage, wichtige Intank-Komponenten nachhaltig zu zerstören. Daher ist das Design entsprechend auszulegen und das System muss beheizt werden, damit nach einem Kaltstart bei entsprechenden „kalten“ äußeren Bedingungen nach einer kurzen Auftauphase von z.B. 20 min bereits flüssiges AdBlue® bereitsteht, das dann in das Auspuffsystem eingespritzt werden kann, wobei mindestens 200°C im Auspuff erreicht sein müssen.

Es werden elektrische Heizsysteme bei PKW Tanks eingesetzt. Dabei steht, insbesondere bei diesen Kaltstarts, nur eine begrenzte Energiemenge, max. 120 Watt, zur Verfügung. Bei LKW Tanks wird die Heizung durch Anschluss an den Kühlwasserkreislauf realisiert.

Weiterhin ist hohe Gestalt- und Designfreiheit erwünscht, damit im Fahrzeugpackage jeder noch freie Raum optimal für die Unterbringung von ca. 5-20 Liter AdBlue® genutzt werden kann.

Das hat dazu geführt, dass die überwiegende Anzahl der 1. und 2. Generation von SCR-Tanks im Blasformverfahren hergestellt werden. Aufgrund des Blasformprozesses ist eine optimale Raumausnutzung im Package wegen relativ großer Radien und Wanddicken, die dem Blasformprozeß eigen sind, nicht möglich. Auch die Geräuschproblematik, wie bereits beim Kraftstofftank diskutiert, ist bei SCR-Tanks für PKW's der Mittel- und Oberklasse präsent. Daher müssen auch SCR-Tanks mit Schwallwänden ausgestattet werden, was wiederum an die Grenzen der Blasformtechnik stößt. **Bild 6** zeigt die Evolutionsstufen für die Entwicklung von SCR-Tanks.

Gelöst werden die oben beschriebenen Aufgabenstellungen in der 3. Generation durch die Spritzgießtechnologie. Bei SCR-Tanks kann die Spritzgießtechnologie eingesetzt werden, da die mechanischen und emissionstechnischen Anforderungen an diese Tanks anders als beim Kraftstofftank sind. Der SCR-Tank kann im Crash-Fall undicht werden, die austretende Flüssigkeit ist nicht gefährlich, während beim Kraftstofftank absolute Dichtigkeit gefordert wird. Aus Emissionsgründen muss auch keine Koextrusion eingesetzt werden, was beim Spritzgießen doch erhebliche Herausforderungen darstellen würde. Weiterhin sind die für

den Blasform- und Halbschalenprozeß verwendeten hochmolekularen HDPE-Typen für das Spritzgießen nur bedingt geeignet, mangelnde Fließfähigkeit und starke Verzugsneigung seien hier als Gründe genannt. So werden für den SCR-Spritzgußtank spezielle hochmolekulare HDPE Spritzgießtypen verwendet, die eine ausreichende Fließfähigkeit aufweisen und dennoch die mechanisch-physikalischen Eigenschaften eines solchen Tanks hinreichend erfüllen.

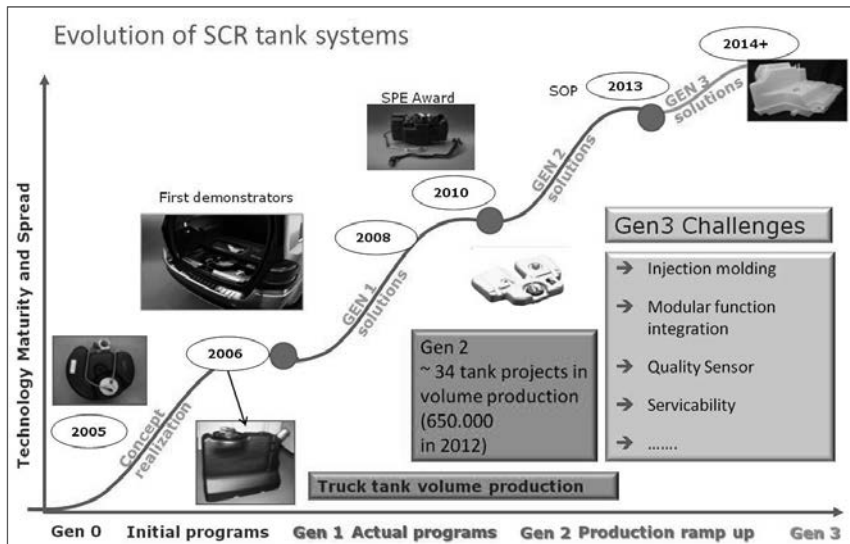
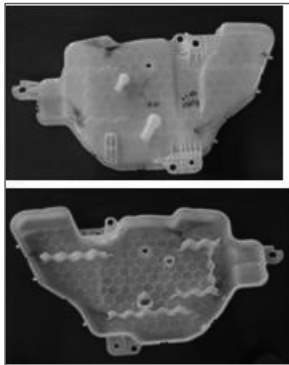


Bild 6: Evolutionsstufen der Entwicklung von SCR-Tanksystemen

Weitere Vorteile des Spritzgießverfahrens sind gleichmäßige Wanddicken (Gewichtsreduzierung), kleine Radien (Volumenoptimierung), Funktionsintegration (Stutzen, Nippel, Klipse, Schwallwände, Halteelemente, ...). Nachteilig ist, dass aufgrund der aufwändigeren Werkzeugkonstruktion ein relativ früher „Designfreeze“ stattfinden muss und Änderungen nur schwierig nachträglich möglich sind. Es wird jeweils ein Werkzeug für die Tankober- und Unterschale benötigt. (Bild 7) Zum Spritzgießen von diesen SCR-Tankhalbschalen sind



Spritzgießmaschinen mit Schließkräften im Bereich 2000 bis 2500 to erforderlich. Der Technologiewandel für SCR-Tanksysteme hat sich vom Blasformen zum Spritzgießen vollzogen. Nahezu alle zukünftig auf den Markt kommenden PKW mit Dieselmotor werden einen spritzgegossenen SCR-Tank haben. Ausnahme bilden die LKW, diese Tanks werden wegen ihrer Größe (bis 100L) wohl weiter im Blasform- oder Rotationssinterverfahren hergestellt.

Bild 7: Spritzguß-Halbschalen für einen SCR-Tank

3. Lösungen für Hybridfahrzeuge

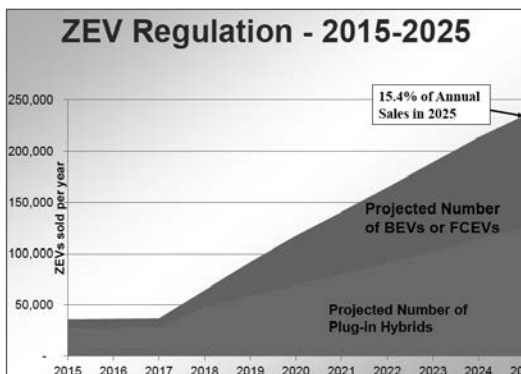


Bild 8: Anteil von Hybrid/Elektrofahrzeugen ab 2017 in Kalifornien (Quelle: CARB)

Die weltweit ständig strenger werdenden Fahrzeug-Emissionsgrenzwerte für Kohlenwasserstoffe (HC = HydroCarbon), Kohlendioxid (CO₂) und Stickoxide (NO_x) sind die Treiber für neue Technologien und die Entwicklung und Einführung von Hybridfahrzeugen.. Vorreiter ist die kalifornische Umweltbehörde CARB (= California Air Resources Board), die mit ihren

strengen Umweltgesetzen (ZEV Programm, ZEV = Zero Emission Vehicle, ORVR = On Road Vapor Recovery) die Automobilproduzenten (= OEM) zwingt, Fahrzeuge, die mit der Gesetzgebung konform sind, zu verkaufen. Betroffen sind die Emissionen aus Kraftstoffsystemen und Auspuff sowie die geforderte Verbrauchseffizienz (CAFE = Corporate Average Fuel Economy). Ab 2017 tritt eine neue Stufe der ZEV Regelung in Kraft, die einen erheblich wachsenden Anteil von Hybridfahrzeugen am Gesamtanteil von verkauften Fahrzeugen erzeugt. (**Bild 8**). Durch Hybridfahrzeuge sind die OEM in der Lage, die strengen HC und CO₂ Auflagen ihrer Flotten zu erreichen. Hybridfahrzeuge (HEV = Hybrid Electric Vehicle) haben ein zusätzliches elektrisches Antriebssystem. Im einfachen Fall wird es zur Unterstützung der konventionellen Antriebstechnik benutzt, bei sogenannten „Plug-in“ Hybridfahrzeugen (PHEV = Plug-in Hybrid Electric Vehicle) ermöglicht es auch, rein elektrisch zu fahren und die Batterie nach der Fahrt an der Steckdose aufzuladen. Der konventionelle Antrieb mit Verbrennungsmotor kommt dabei dann eventuell gar nicht mehr zum Einsatz. Einen Sonderfall stellt z.Zt. noch das Elektroauto mit Range-Extender (Rex-EV = Range Extend Electric Vehicle) dar. Alle oben genannten Hybridfahrzeugvarianten haben noch einen Verbrennungsmotor, der mit Kraftstoff versorgt werden muss und somit ein Tanksystem benötigt. An diese Tanksysteme werden zusätzliche Anforderungen hinsichtlich erhöhter Druckstabilität gestellt, die über die bisher im Markt befindlichen, oben beschriebenen Tanksysteme hinausgehen. Die erforderlichen Technologien, um dieser Druckstabilität gerecht zu werden, sollen im Folgenden näher beschrieben werden.

Warum haben Hybridfahrzeuge besondere Anforderungen hinsichtlich der Druckstabilität? Diese Anforderung gilt nur für Tanks in Hybridfahrzeugen mit Benzinmotor, Tanks für Hybridfahrzeuge mit Dieselmotor haben diese Herausforderung wegen der Unterschiedlichkeit der Kraftstoffdampfdrücke von Benzin und Diesel nicht.

Wenn das Fahrzeug elektrisch fährt, wird der Tank verschlossen. Je nach Umgebungsbedingungen (Temperatur) kann der im Tank befindliche Kraftstoff dann bei erhöhter Ausgasung seinen maximalen Dampfdruck entfalten, was zu einem erhöhten Innendruck führt, der in herkömmlichen Tanksystemen aufgrund der „offenen“ Systeme nicht entsteht, da die Kraftstoffdämpfe direkt in den dafür vorgesehenen Aktivkohlebehälter (= AKB) geleitet werden.

Beim Hybridfahrzeug im elektrischen Betrieb kann der AKB nicht gespült werden, da der Verbrennungsmotor aus ist. Daraus entstehen dann Tankinnendrucke im Bereich von ca. -15 bis +35kPa, die durch ein sogenanntes Tankdruck-Begrenzungsventil FTIV (= Fuel Tank Isolation Valve) kontrolliert werden.

Das FTIV hat die Aufgabe, den Druck im Tank zu regulieren. Grundsätzlich wird das FTIV über die Motorelektronik gesteuert und ist im stromlosen Zustand geschlossen. Vor der Betankung wird das Ventil geöffnet, damit möglicher Überdruck abgebaut werden kann. Es wird eine Zeit von ca. 20 Sekunden eingehalten, bis der Fahrer die Tankklappe öffnen kann.

Zusätzlich gibt es die mechanische Funktion im FTIV, die bei einem Überdruck im Tank von ca. 30kPa bzw. bei ca.-10kPa im Unterdruckbereich das FTIV öffnet. Damit wird verhindert, dass sich der Tank bei Maximaldrücken unzulässig verformen kann.

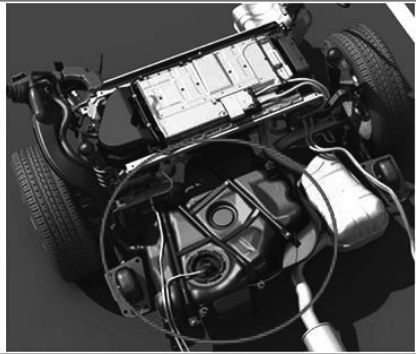
Bei geöffnetem FTIV werden die Kraftstoffdämpfe in den AKB geleitet. Während typischer Fahrbedingungen bzw. bei den legalen Emissionstests werden diese Maximaldrücke in der Regel nicht erreicht. Es hat sich herausgestellt, dass in der Praxis bei elektrischer Fahrweise meistens Unterdruck im Tank herrscht. Dieser Unterdruck entsteht, dadurch, dass der Motor bei Betrieb den Kraftstoff aus dem Tank entnimmt.

Kunststofftanks aus HDPE im Standarddesign haben bei den o.g. Druckanforderungen insbesondere bei höherer Temperatur (40°C +) durchaus die Neigung, sich stärker zu verformen. Dabei kann es lokal zur Anlage an die Fahrzeugkarosserie und anderen Nebenerscheinungen kommen, die alle nicht erwünscht sind und vom OEM auch nicht toleriert werden. Um den Tank herum wird normalerweise ein Freiraum von ca. 10mm eingehalten, der im Falle einer Verformung teilweise ausgenutzt werden kann. Eine weitere wesentliche Forderung für Hybridtanks ist die Geräuschreduzierung. Durch Einführung der Start-Stopp Funktion bei den meisten Fahrzeugen und auch im elektrischen Betrieb sollen im Fahrgastraum keine Schwappgeräusche aus dem Tank hörbar sein. Daher werden nahezu alle Hybridtanks mit entsprechenden „Schwallwänden“ ausgestattet.

Erste Tanks für Hybridfahrzeuge wurden aus Stahl mit Wandstärken von ~ 2,5mm gefertigt und hatten beispielsweise ein Gewicht von 31kg für einen 55l Tank (Toyota RX400h). Inzwischen haben einige OEM geeignete „Hybrid-Drucktanks“ im Einsatz, überwiegend aus Stahl mit entsprechendem Gewichtsnaheile. Der Wunsch nach einem leichteren Kunststoff-Hybrid-Drucktank ist aber deutlich vorhanden.

Kautex Textron hat als erster Lieferant einen Kunststoff-Hybrid-Drucktank auf den Markt gebracht, der seit Sommer 2012 im amerikanischen Modell des VW Jetta Hybrid eingebaut ist (**Bild 9**).

Bild 9: US Modell VW Jetta Hybrid und
Einbaulage des Hybrid Kunststofftanks
(Quelle: VW)



Dieser Tank hat allerdings noch einen äußeren Stahlrahmen zur Aufnahme der Druckkräfte, ist also ein „Kunststoff-Stahl-Hybridtank“. Die Unterdruckerforderungen werden durch innere Stützelemente, sogenannte „Stand-off's“, abgefangen. Diese Lösung stellt eine Interims-lösung auf dem Weg zur Vollkunststoff-Lösung für einen Hybridtank dar, wie sie heute bereits auf dem Markt sind bzw. bei den nächsten Hybridfahrzeugen kommen werden.

Wie werden die Druckerforderungen nun ohne Stahlkorsett umgesetzt?

Oberstes Ziel der Drucktankentwicklung ist es, die zulässigen Tankwandverformungen zu verhindern bzw. auf ein Minimum zu reduzieren. Die 10mm Freigang zwischen Tank und Karosserie sollen dabei möglichst nicht überschritten werden.

Um den Kunststofftank entsprechend drucksteif auszulegen, gibt es verschiedene Ansatz-möglichkeiten. **Bild 10** gibt eine Übersicht, welche Designmöglichkeiten im Folgenden be-sprochen werden. Es hat sich im Laufe der Hybridtankentwicklung herausgestellt, dass eine Verbindung von Tankoberseite zu Tankunterseite zwingend erforderlich ist. "Kissing-Points" stellen eine solche Verbindung dar, haben aber die oben beschriebenen Nachteile. Deshalb geht man auf Intank-Verbindungselemente, die entsprechend entwickelt wurden.



Bild 10: Situation Tankbegrenzung und Stabilisierungsmöglichkeiten

Diese Elemente werden bei Kautex Textron NGTS (= Next Generation Tank Stiffener) genannt. Die Kraftübertragung zwischen Tankoberseite und Tankunterseite erfordert eine genaue Berechnung der Dimensionierung und Positionierung, z.B. der Querschnitte und Schweißflächen, um entsprechende Kräfte aus der maximalen Druckbelastung übertragen zu können. Die Befestigung der Versteifungselemente an der Tankwand kann entweder durch formschlüssige Verbindung oder durch Verschweißen bei gleichartigen Materialien geschehen. Zusätzlich können an diese Versteifungselemente im Tank Komponenten befestigt werden, zum Beispiel Leitungen, Ventile, Schwallwände, Saugstrahlpumpen.

In-Tank Verbindungselemente sind also die Versteifungselemente der Wahl. Je nach Tankdesign können mehrere dieser Elemente zum Einsatz kommen. Durch iterative CAD/CAE Simulationen werden die optimalen Platzierungen für die Versteifungselemente im Tank ermittelt. In einer abschließenden Druckbelastungssimulation (Beispiel im **Bild 11**) wird überprüft, ob die maximalen Deformationen des Tanks im Rahmen der erlaubten Bauraumgrenzen liegen.

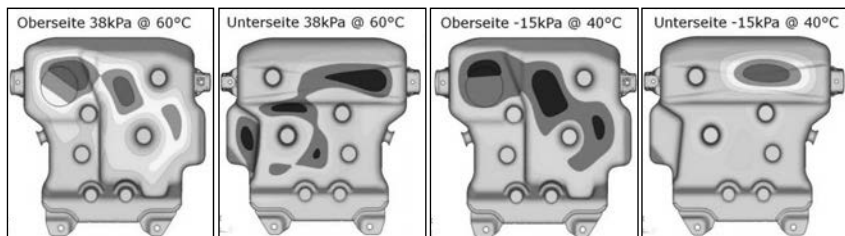
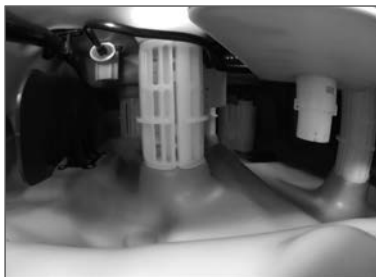


Bild 11: Beispiel Deformationsanalyse durch CAE-Simulation für max. Drücke bei max. Temperaturen für Tankober- und unterseiten

Das Design der Stützelemente funktioniert nur in Abstimmung mit dem Gesamtdesign und der Anbindung durch Radien, analog einer Bogenabstützung, wie sie z.B. in Kathedralen zu finden ist. **Bild 12** zeigt einen typischen Einblick in das Innere eines Hybrid-Drucktanks mit Stützelementen und Schwallwänden.



Aktuell hat Kautex Textron in 2015 als erster zwei Vollkunststoff-Drucktank-systeme für den Volvo XC 90 PHEV und den VW Passat GTE PHEV in den Markt gebracht. (**Bild 13**).

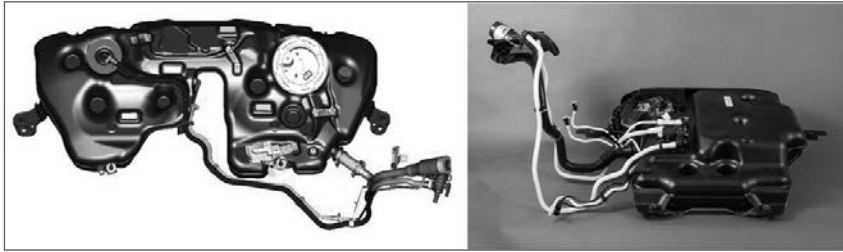


Bild 13: Vollkunststofftank für die Hybridfahrzeuge Volvo XC 90 PHEV (links) und VW Passat GTE PHEV (rechts)

4. Verdrängung durch E-Mobility?

Der Begriff E-Mobility umfasst in diesem Beitrag reine Elektrofahrzeuge, sei es mit Batteriebetrieb oder Brennstoffzellenantrieb mittels Wasserstoff. Angesichts der prognostizierten globalen Produktionszahlen von bis zu jährlich 120 Millionen Fahrzeugen bis 2030 (**Bild 14**) werden sich auch die Zahlen der Hybrid- und Elektrofahrzeuge erheblich nach oben verschieben, aber den konventionellen Antrieb mit Verbrennungsmotor und somit auch den Kunststofftank nicht verdrängen. Die Vorschau zeigt, dass sich ab ca. 2020 der Anteil der konventionellen Antriebe zugunsten von Hybridfahrzeugen deutlich verschieben wird. Damit wird sich die Anzahl der druckbeaufschlagten Kunststofftanks deutlich erhöhen. Da die Herstelltechnologie für diese Tanks bereits seit 2015 auf dem Markt ist, und zahlreiche Tankentwicklungen für Hybridfahrzeuge derzeit in der Entwicklung sind, wird der Anteil der Kunststofftanks global auch weiter ansteigen und somit Energieträger der Zukunft im Fahrzeug bleiben. In **Bild 14** sind neben den konventionellen und Drucktanks auch Hochdrucktanks dargestellt. Diese Tanks dienen der zukünftigen Energiespeicherung von Erdgas (CNG) bis zu einem Arbeitsdruck von 250 bar und bei Wasserstoff (H₂) von 700 bar. Für diese Tanks wird es aus Gewichtsgründen zukünftig Kunststofflösungen geben. Man nennt diese Tanks dann innerhalb der Hochdrucknomenklatur Typ IV Tanks. Diese Tanks wiegen im Vergleich zu gleichvolumigen Tanks aus Stahl, Typ I, nur ca. 25% des Stahltankgewichts. Die Tanks haben einen inneren Kunststoffliner aus Thermoplast (HDPE, PA, auch mehrschichtig), der dann mit Kohlefasern umwickelt wird, um die Drücke aufzunehmen, sie sind somit gewissermaßen auch aus Kunststoffen.

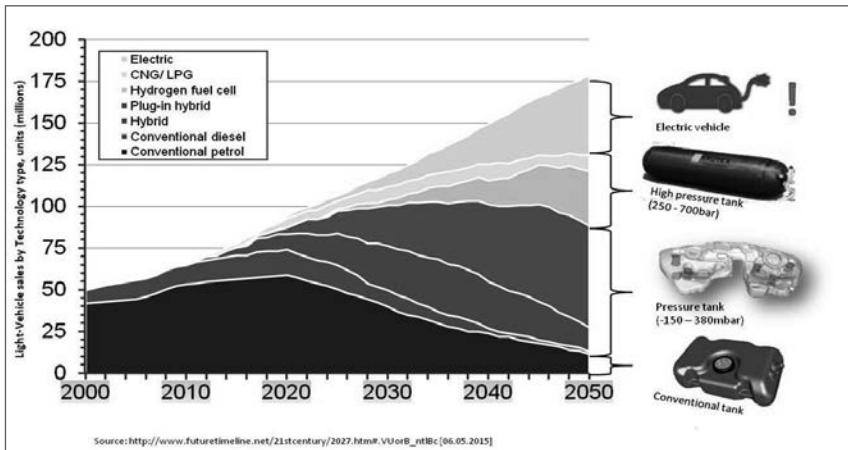


Bild 14: Prognose der Energieträgersysteme für verschiedene Antriebstechnologien

Die Kohlefasern werden überwiegend mit flüssigen Harzsystemen getränkt und gewickelt, anschließend wird das Matrixharz im Ofen noch ausgehärtet. Alternativ befinden sich auch sogenannte Kohlefaser-Thermoplast-Tapes in der Entwicklung, die während der Wicklung durch geeignete Wärmeeinbringverfahren direkt mit dem Liner bzw. der vorigen Tape-Lage verschweißen. Ein so gewickelter Behälter ist nach der Wicklung dann fertig. Welche Wickeltechnologien sich großtechnisch tatsächlich im Markt durchsetzen werden, wird sich in den nächsten Jahren entscheiden. Toyota ist mit seinem Mirai hier in eine Vorreiterrolle gegangen, ähnlich wie seinerzeit 2000 mit dem Prius-Hybridfahrzeug. Es hat fast 10 -15 Jahre gedauert, bis sich diese Technologie global durchgesetzt hat. Ähnliches wird bei den CNG- und H2- Antrieben erwartet.

Tabelle 2 *Literaturangaben **Werksangaben	Heizwert kWh/kg	kg/liter	Masse in 50 Liter Tank [kg]	kWh	Reichweite [km]
Benzin*	11,6	0,74	37	430	620 (6 l/100km)
Diesel*	11,8	0,83	41,5	490	692 (6 l/100km)
Erdgas CNG* (200bar)	13,9	0,17	8,5	118	
Audi A 4 gtron ** (200bar)			19 (verteilt auf 4 Tanks)	236	500 (3,8kg/100km)
Wasserstoff H2* (700bar)	33,3	0,04	2	66	
Toyota Mirai** (700bar)			5 (verteilt auf 2 Tanks)	166,5	500
BMW i3 Batterie**			230 (Batterie)	21,6	160
Tesla S Batterie** (85kWh)			750 (Batterie)	85	500

Treiber für die schnelle Durchsetzung neuer Antriebstechnologien sind viele Faktoren. Beispielsweise erreichen Elektrofahrzeuge keinesfalls die prognostizierten und von den Regierungen postulierten Zahlen. Hohe Kosten, fehlende Akzeptanz, Reichweitenangst sind nur einige Ursachen, die einer zügigen Ausbreitung der E-Fahrzeuge entgegenstehen. Auch das hohe Gewicht der Traktionsbatterien ist ein Faktor. In Tabelle 2 sind zum Vergleich der aktuellen Gewichte und Reichweiten einige Zahlen dargestellt, für Benzin und Diesel am Beispiel eines 50 Liter Tanks, für Erdgas (CNG) und Wasserstoff aktuelle Modelle. Leider war das exakte Gewicht der Hochdrucktanks zur Drucklegung nicht verfügbar.

Aktuell während der Verfassung dieses Beitrags hat sich gerade die VW Dieselabgasaffäre ereignet, die einen signifikanten Einfluß auf die Absatzzahlen von Dieselfahrzeugen in den USA hat und noch haben wird. Weiterhin sind durch die sinkenden Ölpreise aktuell Dieselpreise von unter 1€/L zu verzeichnen. Der niedrige Ölpreis und damit die niedrigen Kraftstoffpreise haben schon immer als Hemmnis für die Ausbreitung und Durchsetzung neuer Technologien auf dem Antriebsmarkt gewirkt.

Eine richtige Prognose für neue Antriebstechnologien wie E-Fahrzeuge bleibt daher für die Zukunft unsicher und schwierig. Der Kunststofftank als Energieträger wird also noch bleiben.

Literatur:

- [1]. Karsch, U.A.: The fuel Tank: A complex system made of plastic, in *Plastics in Automotive Engineering*, Tagung Mannheim, 13./14. April 2002, VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag Düsseldorf 2002, ISBN 3-18-234245-2
- [2]. Karsch, U.A.: Aufbau von aktuellen Tanksystemen für Fahrzeuge des europäischen und amerikanischen Marktes, in Tagung: Emissionen aus Kraftstoffsystemen von PKW's, 17./18. April 2002, Haus der Technik, Essen, erschienen im Expert Verlag, Fachbuch Haus der Technik Band 15, ISBN 3-8169-2102-7
- [3]. Karsch, U.A.: Der blasgeformte SCR-Behälter, Ein weiteres Tanksystem im Fahrzeug, in: *Blasformen 2009*, Fachtagung VDI-K, Baden-Baden, 12./13. Mai 2009, ISBN 978-3-18-234299-1
- [4]. Karsch, U.A., Gebert, Klaus: Tanks für Hybridfahrzeuge, Eine Herausforderung für Kunststoffe ?, in: *Blasformen 2013*, Fachtagung VDI Wissensforum, Baden-Baden, 5./6. Mai 2013, ISBN 978-3-18-234329-5

Study of lightweight applications in truck development

Metal replacement of a headlamp frame by a thermoplastic

A. van den Einden, P. van der Velden,
DAF Trucks N.V., Eindhoven, Netherlands

Abstract

New material, process and equipment developments in the field of thermoplastics create opportunities to implement lightweight applications in the truck by replacing metal parts. For this reason a study was started at DAF Trucks with the object of establishing the feasibility of replacing a (complex) structural metal part by a part made of a reinforced plastic. This study was carried out in cooperation with partners SABIC, EDAG and VDL Parree. After a first quick scan of material technologies and applications the aluminum headlamp frame was chosen for this study due to its complexity and high requirements. In this paper a brief overview is given of the analyses and activities required for a successful plastic design to emerge.

Introduction to lightweight applications in trucks

Even in the truck sector, metal replacement in order to reduce weight, integrate functions, create more design freedom and reduce costs is nothing new. For many years now plastics have been used for all kinds of truck applications. Exterior parts made of metal were replaced by thermosets and thermoplastics even more than 30 years ago and more recently plastic applications in the engine such as the valve cover and oil sump have been introduced. DAF trucks have a wide range of plastic exterior parts using thermosets and thermoplastics and in the engine compartment parts which mostly use thermoplastics.



Fig. 1: Exterior parts made of thermoplastics and oil sump



Fig. 2: Thermoplastic valve cover

Due to material, process, tool and machine developments in the field of thermoplastics new opportunities for lightweight constructions in trucks arise. In particular, the development of materials with a high stiffness and a better cold impact resistance create more possibilities for metal replacement. Combinations of materials in hybrid structures such as continuous fiber-reinforced thermoplastic sheets with plastic are also of interest.

For this reason a study was started in cooperation with partners SABIC, EDAG and VDL Parree with the object of establishing the feasibility of replacing a (complex) structural metal part by a thermoplastic part. After a first quick scan of material technologies such as hybrid structures with continuous-fiber-reinforced thermoplastic sheets and long-glass-fiber-filled thermoplastics the choice was made to carry out the study with metal being replaced by long-glass-fibre-filled thermoplastic. The aluminum headlamp frame was chosen as subject for this study due to the high requirements and the fact that it represents a lot of brackets and frames in the current truck design. In addition, the fact that tool life in the aluminum casting process is limited was a driver for an injection-molded plastic part.

Preliminary study on the thermoplastic headlamp frame

For this preliminary study carried out by SABIC the following requirements were taken into account:

- Maximum displacements
- Limited acceleration levels
- Minimum eigenfrequency 35 Hz
- Fatigue (DAF warranty 1,600,000 km)

- Dimensional stability
- Retrocompatible with aluminum part
- Integration into existing package
- Easy integration into current plant process

Injection molding of a thermoplastic part allows the use of more complex geometry, more extensive ribbing patterns and thinner cross-sections.

For a successful conversion from a metal to thermoplastic part it is therefore beneficial to start with identifying the design space available instead of limiting oneself to trying to translate the metal design directly into thermoplastic.

On the basis of requirements such as tensile modulus, strain at stress, chemical resistance to automotive fluids and dimensional stability but also on density and price, the SABIC STAMAX[®] resin with glass fiber was selected at the start of the preliminary study. This is a polypropylene matrix using long glass fibers as a filler. The use of long glass fibers improves the mechanical performance of the application even at raised temperatures. The presence of long glass fibers in the matrix also results in anisotropic behavior. The glass-fiber orientation is influenced by the injection-molding process. At a later stage in the design process further optimization of the design is possible by linking the fiber orientation from the mold-filling simulations with the mechanical optimization of the part. But since no details of mold filling were available at the time of the preliminary study a quasi-isotropic value is used.

Table 1: Material choice

	PP LGF	PA GF	PA LGF
Tensile modulus @ 80°C	O	O	++
Strain @ stress	O	+	O
Density	+	-	-
Chemical resistance	+	+	+
Dimension stability	+	-	O
Price	+	-	--

Using a topology optimization routine is a good starting point for understanding which structural features are required in the design.

The crucial next step is to convert these solid cross-sections, which are more suitable for cast metal-based solutions, into thin-wall ribbed sections which also meet the requirements but can be successfully injection-molded in long-glass-fiber thermoplastics.

By following these steps, a thermoplastic design concept using SABIC STAMAX® resin was designed for a headlamp bracket. This bracket can meet the requirements while giving an estimated weight reduction of 30 – 40% as well as the possibility of reducing the number of parts.

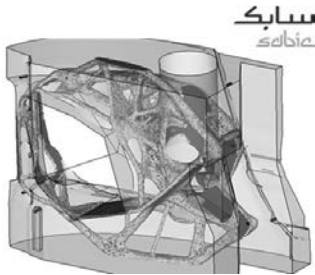


Fig. 3: Topology optimization

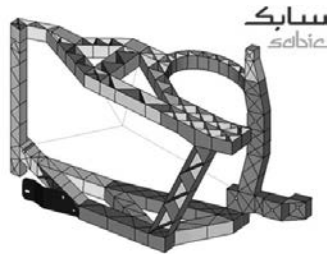


Fig. 4: Result of preliminary study

The result of the preliminary study was the reason for DAF Trucks deciding to continue with the engineering of the lightweight headlamp frame.

Engineering a thermoplastic headlamp frame

For the CAD design the existing, limited package space had to be respected as well as the existing order of assembly and disassembly. Due to the lower material properties of a thermoplastic in comparison with aluminum, stiffness had to be added in the design.

In the FEM and CAE phase of the study the differences from aluminum were taken into account and calculations were carried out. A lot of design iterations were necessary to realize a model which had enough stiffness to meet the requirements concerning eigenfrequency, displacements and acceleration.

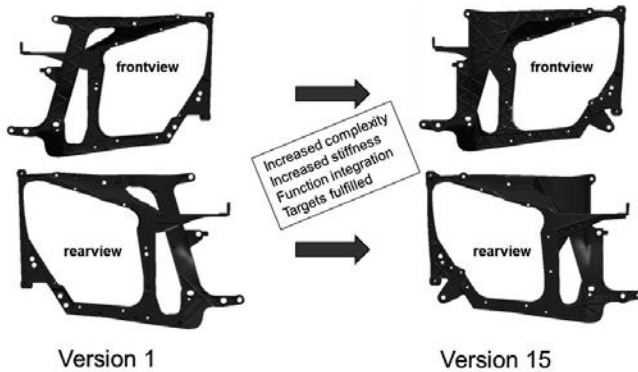


Fig. 5: Design iterations

Moldflow analysis of optimized CAD design

Once the design of the headlamp frame was available, work could start on designing the mold and the gating layout. The number of gates to fill the part, the locations of the gates and the sequence of opening the gates are the main design variables for successfully producing the part. Apart from the necessity of being able to fill the whole mold within the operation window of both material and machine, the gate design also has a significant effect on weld lines and warpage.

Weld lines and warpage also occur in non-filled injection-molded parts but the presence of fibers dominates the effect. At weld lines the fibers mainly lie perpendicular to the weld line with hardly any fibers crossing the weld line. The strength of the part over the weld lines can almost depend only on the strength of the matrix. The aim is therefore to avoid weld lines in highly loaded areas.

The warpage is mainly caused by anisotropic shrinkage of the material during solidification and cooling down. The high stiffness of the fiber means low shrinkage in the fiber direction and higher shrinkage perpendicular to the fiber.

Using the right filling strategy resulted in the right fiber orientation, a minimum of warpage and avoided weld lines at critical locations.

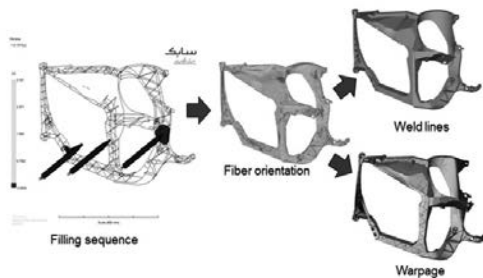


Fig. 6: Mold-filling analysis

After this extensive engineering phase it was decided to build a prototype tool to permit validation of the lightweight headlamp design.

Validation of the lightweight design

For validating the design a prototype tool was prepared and trials carried out at VDL Parree. During the trials the mold filling was carried out in accordance with the former analysis so as to have the weld lines in non-critical areas. After molding and aging the parts were measured to check dimensional stability. Measurements showed that the warpage is in practice less than previously given by analysis but that the trend is the same. After the measurements a shaker test (road simulation), cobblestone drive and summer drive were carried out. The parts successfully passed all these tests and the calculated displacements due to eigenfrequency were comparable with the measured displacements in the shaker test.

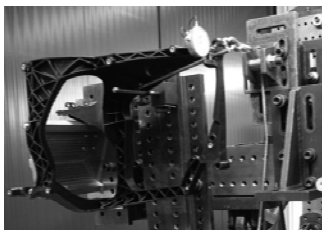


Fig. 7: Shaker test (road simulation)

Results of the study

- The calculated displacements due to eigenfrequency are comparable with the measured displacements in the shaker test and meet the requirements
- The warpage is less than analysed by Moldflow but the trend is the same
- The number of parts is reduced from 3 (+ 4 bolts) to just 1
- The parts are easy to assemble in the existing package
- The weight reduction is approximately 30%
- The cost reduction is approximately 50%

Conclusion

This study proved that it is feasible to replace a complex structural metal part such as the headlamp frame by a lightweight thermoplastic part.

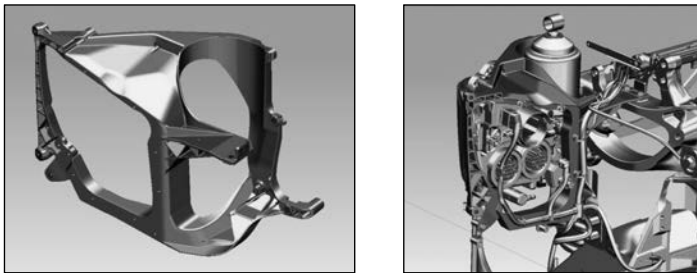


Fig. 8: New lightweight design made of a long-glass-fiber-filled PP

Treibhausgasfußabdruck von Lastkraftwagen

Henryk Gräser, MAN Truck & Bus AG, München

Kurzfassung

Der Klimawandel gehört zu den größten Herausforderungen für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Im Transportsektor entsteht ein wesentlicher Anteil des weltweiten CO₂-Ausstoßes. Deshalb wird in diesem Bereich ein signifikanter Beitrag zur CO₂-Reduktion erwartet.

Um die wesentlichen Stellhebel zu identifizieren, sind die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebensweg eines Nutzfahrzeuges zu ermitteln. Die Ergebnisse zeigen, dass der größte Anteil der Treibhausgasemissionen durch die Bereitstellung und Nutzung von Kraftstoffen entsteht. Damit nimmt die Senkung des Kraftstoffverbrauchs in ihrer Bedeutung als entscheidender Wettbewerbsfaktor zu.

Auch die Herstellung und das Lebensende von Nutzfahrzeugen erzeugen Treibhausgasemissionen. Die Herstellung beinhaltet unter anderem Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung, Werkstoffherstellung, Fertigungsverfahren und Energieeinsätze für die eingesetzten Bauteile und Komponenten. Dementsprechend können Leichtbau und die Wahl der Werkstoffe (darunter Kunststoffe) den Treibhausgasfußabdruck eines Fahrzeuges beeinflussen. Bei ökobilanziellen Vergleichen verschiedener Bauteilvarianten sind bestimmte Anforderungen zu beachten.

Nutzfahrzeuge aus CFK – vom Prototyp zur Serie

Dr.-Ing. R. Kaiser, TTT The Team Composite AG, Stade

1. Einleitung

Seit 2003 entwickelt TTT innovative Nutzfahrzeuge in Ultraleichtbauweise und hat verschiedene Prototypen bereits erfolgreich auf der Straße, einen Kippsattelaufleger (2004), einen Mega-Curtainsider (2006), drei Kühlsattelaufleger (2010/2011) und ein 3,5t Kühlfahrzeug (2014), welches im Rahmen eines gemeinsamen Projektes mit der Carbon Truck & Trailer GmbH, Volkswagen Nutzfahrzeuge und COOP CH konzipiert und gebaut wurde.

2. Ziel: Serienprodukt

Als priorisiertes Projekt wird zunächst das 3,5 t Verteilerfahrzeug weiterentwickelt, vorrangig das Chassis. Zum einen ist es sowohl im Nutzfahrzeugsegment als auch im Bereich der Wohnmobile anwendbar. Dafür hat TTT ein neues Chassis-Konzept entwickelt, das Duocoque, d.h. zwei Gleichteile (schlanke Monocoques) bilden das Chassis. Der Vorteil liegt neben dem extremen Leichtbau und der Reduzierung des Materialverbrauchs, vor allem aber in der Reduzierung des Fertigungsaufwandes durch einfache Strukturen (Preforming) und kleinere Geometrien, sowie geringerem Materialverbrauch und -verschnitt.

Sobald dieses Projekt abgeschlossen ist, wird das Design auf die „schweren“ Nutzfahrzeuge (Sattelaufleger) adaptiert.



Bild:

Chassis-Entwicklung: vom Monocoque (13,6m Sattelaufleger) zum Duocoque (3,5t Fahrzeug)

Nutzfahrzeuge aus CFK – vom Prototyp zur Serie



Copyright TTT – The Team Composite AG

Vorstellung: TTT The Team Composite AG

- Ingenieurdienstleister im Bereich Nutzfahrzeug seit 1997
- CFK Nutzfahrzeugtechnologie basierend auf 13 Jahren Erfahrung
- Kompetenz in Konstruktion, Auslegung und Berechnung von Carbon Bauteilen bis zum Prototyp
- zahlreiche Patente (Monocoque, Vakuumisolierung, Achssysteme etc.)
- seit 2004 CFK-Prototypen auf der Straße:
Kippsattel, Mega-Curtainsider, Kühl-Sattelaufleger und Verteilerfahrzeug 3,5t auf Basis T5
- Partnerunternehmen **Carbon Truck & Trailer GmbH** als Produktionsunternehmen zur Herstellung von CFK Bauteilen

The Team
The Art of Trailer Technology



Carbon TT



2014 Start Förderprojekt der Carbon Truck & Trailer GmbH: Prozessentwicklung für CFK-Großbauteile

Förderprojekt der Carbon Truck & Trailer GmbH mit Unterstützung der TTT AG und Partner: 2014 bis 2016



Entwicklung eines Serienprozesses für CFK Großbauteile am Beispiel
eines 3,5t Fahrzeugs und Adaption auf den Sattel (Polycoque-
Bauweise)

Monocoque Größenvergleich:
Kühlsattelaufleger und 3,5t-Verteilerfahrzeug



Copyright: TTT – The Team Composite AG

Warum CFK und welche Vorteile hat der Kunde!

Vorteile CFK:

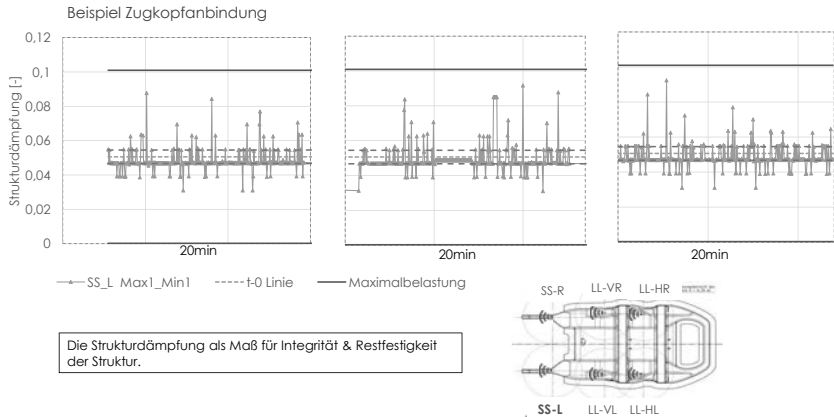
- bis zu 60% leichter als Stahl und 40% leichter als Aluminium
- thermische Stabilität,
- sehr leicht bei hoher Stabilität, korrosionsfrei, langlebig
- hohe Energieaufnahme beim Crash
- recyclebar
- im Brandfall vergleichbar mit Kunststoffen, die in konventionellen Fahrzeugen verbaut sind

Kundenvorteile:

- bis zu 40% mehr Zuladung
- bis zu 30% weniger Fahrten
- Senkung des Verbrauchs und damit der CO₂ Emission
- Vakuum-Wärmedämmung reduziert die Leistung der Kühlmachine um bis zu 60%
- integrierte Strukturüberwachung (SHM) der CFK-Bauteile

Copyright: TTT – The Team Composite AG

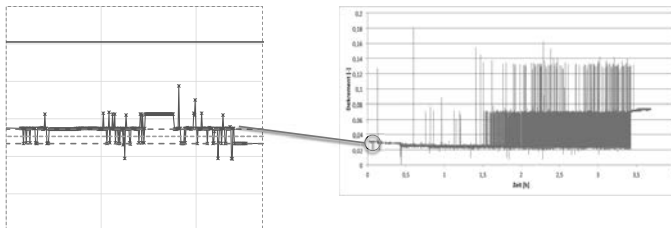
Prüfung der Machbarkeit: Proto 0 - Auswertung der Strukturüberwachung



Copyright: TTT – The Team Composite AG

Prüfung der Machbarkeit: Proto 0 - Zusammenfassung der Strukturüberwachung

- höchstbeanspruchte Stelle ist die Schnittstelle zum Zugkopf
- kein Anzeichen auf Degradation oder Schädigung
 - kein Versatz der T0-Linie
 - Ist-Beanspruchungen unter Maximalbeanspruchung
 - keine Aufweitung des Bandes



Signal Proto 0 – keine Schädigung

Beispiel - Strukturschädigung

Copyright: TTT – The Team Composite AG

Entwicklung eines Serien-Designs

2003 die **Revolution**:
Umdenken in der Entwicklung
vom metallischen Leiterraum zum CFK-Monocoque als
faserverbundgerechte Bauweise

heute die **Evolution**:
vom Monocoque zum Duocoque-Hybriden

konventionelle
Bauweise



CFK-Monocoque



CFK-Duocoque-
Hybrid



Copyright: TTT – The Team Composite AG

Vergleich Monocoque – Duocoque: Design

Monocoque

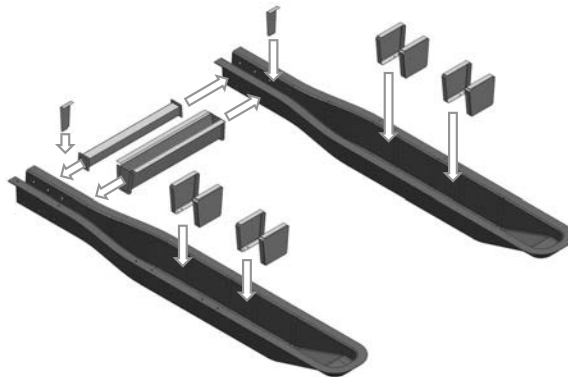


Duocoque



Copyright: TTT – The Team Composite AG

Vergleich Monocoque – Duocoque: Hybridbauweise



Duocoque – Hybrid

Copyright: TTT – The Team Composite AG

Vergleich Monocoque – Duocoque: Design

Monocoque

- monolithische CFK-Struktur
- Zusätzlich auflamierte Querträger mit Schaumkern im Achsbereich
- Kürzen der Längsträger Zugkopfes (ca. 300 mm)
- Anbindung an Zugkopf-Längsträger durch Einschieben und Querverschraubung
- offene Wanne wird durch Bodenplatte des Aufbaus geschlossen
- **einteiliges Design**

Duocoque

- zwei identische monolithische CFK-Strukturen
- Querträger aus Aluminium
- Verstärkungsstrukturen (Schottbleche) aus Aluminium/CFK/o.ä.
- erhebliches Kürzen der Längsträger (ca. 600 mm) und Substitution der Querträger des Zugkopfes
- Anbindung an Zugkopf-Längsträger durch Anlegen und Querverschraubung
- offene Wannen werden durch Bodenplatte des Aufbaus geschlossen
- Querversteifung im Achsbereich durch Achsrohre der Drehstabfederachsen
- **mehrteiliges Design**
- Variabilität:
einfache Adaption auf Zugkopfvarianten
Integration modularer Zusatzkomponenten/Anbauteile im Bereich zwischen den Duocoques (z.B. Batteriepaket)
Toleranzausgleich der Rahmenspur

Copyright: TTT – The Team Composite AG

Vergleich Monocoque-Duocoque Übersicht



	Monocoque	Duocoque	Differenz
Gesamt-Bauteil-Masse [kg]	49	38	- 23 %
davon verlorener Schaum [kg]	2	0	- 2 kg
davon Aluminium [kg]	0	4	+ 4 kg
Reduktion Zupackf-Masse [kg]	6	22	- 380 %
Masse der Bodenplatte [kg]	79	60	- 24 %
Torsionseigenfrequenz [Hz]	65	50	- 23%
Biegesteifigkeit [N/mm]	14.751	29.430	+ 100 %

Gesamt-Massen-Vorteil Duocoque vs. Monocoque: - 46 kg

Copyright: TTT – The Team Composite AG

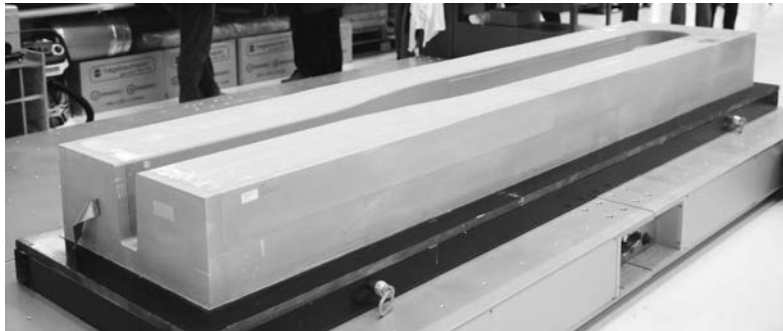
Vergleich Monocoque – Duocoque: Fertigung Prototypen Monocoque IAA 2014



Monocoque – 3160 x 1540 x 315 mm

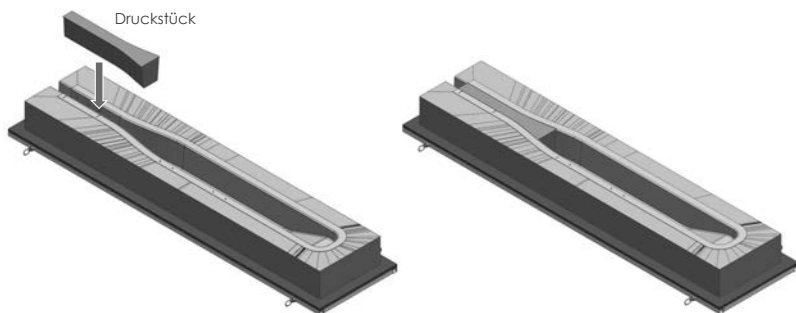
Copyright: TTT – The Team Composite AG

Vergleich Monocoque – Duocoque: Fertigung Duocoque Prototyp



Copyright: TTT – The Team Composite AG

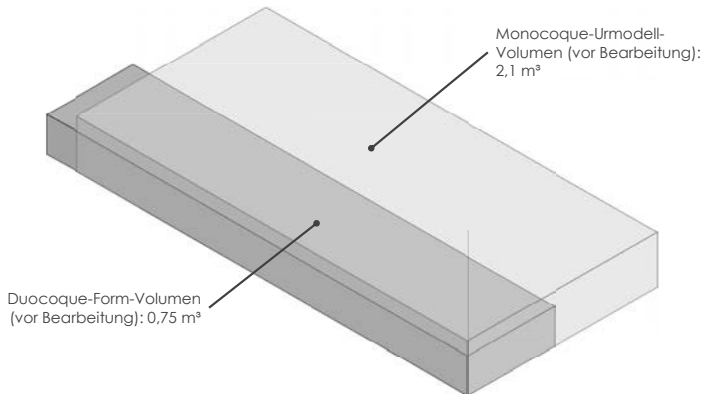
Vergleich Monocoque – Duocoque: Fertigung und Formen für Duocoque



Duocoque - Form mit Druckstück (Minimierung von Fertigungstoleranzen)

Copyright: TTT – The Team Composite AG

Vergleich Monocoque – Duocoque: Fertigung und Formen



Copyright: TTT – The Team Composite AG

Vergleich Monocoque – Duocoque: Fertigung und Formen

Monocoque

- Formabmessungen (Block):
3300 x 1600 x 400 mm
- Volumen (vor Bearbeitung): $2,1 \text{ m}^3$
- Fräsen Urmodelle
- Abformen von dreiteiligem GFK-Werkzeug (bessere Oberflächenqualität des Bauteils)
- Herstellung des Bauteils im GFK-Werkzeug

Duocoque

- Formabmessungen (Block):
3550 x 730 x 290 mm
- Volumen (vor Bearbeitung): $0,75 \text{ m}^3$
- Fräsen Form und Druckstück
- Herstellung des Bauteils direkt in der Form (Interimswerkzeug, finales Werkzeug ist metallisch)
- - 64 % Werkzeugvolumen
- - 78 % Werkzeugkosten

Copyright: TTT – The Team Composite AG

Vergleich Monocoque – Duocoque: Fertigung im RTM-Prozess, noch in Arbeit

Monocoque

- komplexe Bauteilgestaltung aufgrund vorgegebenem Achsaggregat (geschlossene Querschnitte, Querträger mit Kern, Masse der verlorenen Kerne bei Vakuuminfusion jeweils 1 kg, Dichte PU-Schaum: 35 kg/m³)
- Bauteilgeometrie führt bei gegebener Zykluszeit zu sehr hohen Injektionsdrücken (**ca. 15 bar** WKZ-Innendruck)
- Sehr hohe Pressenkräfte erforderlich (ca. **900 t**)
- Derzeit sind keine ausreichend druckbeständigen Kernwerkstoffe verfügbar
- **sehr hohe Investitionskosten**

Duocoque

- RTM-gerechte Bauteilgestaltung
- Kleineres Bauteil erfordert geringere Injektionsdrücke (**max. 10 bar** WKZ-Innendruck)
- Keine Presse erforderlich (Werkzeughälften werden vor Injektion verschraubt, ca. **220 t** Press-/Zuhaltkraft)
- Einfacheres Handling
- Weniger Ausschuss (max. eine Hälfte je Zyklus, geringere Bauteilkomplexität)
- **vergleichsweise sehr geringe Investitionskosten**

Copyright TTT – The Tern Composite AG

Leichtbau durch Multi-Material-Systeme

Strukturelle Kabinenbauteile aus endlosfaserverstärktem thermo-plastischen Kunststoff (Organoblech) mit PUR-Außenhaut in "Class A"-Qualität

A. Spiegel, M.Eng., EDAG Engineering GmbH, Fulda;
Dipl.-Ing. (BA) **S. Schmidhuber**, KrausMaffei Technologies GmbH,
München;
Dr. U. Fehrenbacher, Rühl Puomer GmbH, Friedrichsdorf

Kurzfassung

Ziel des vom BMBF geförderten Forschungsprojektes „MultiKab“ war die Entwicklung von neuen gewichts- und kostenoptimierten Multi-Material-Systemen für Nutzfahrzeugkabinen (Lkw und Landmaschinen). Im Focus der Untersuchungen stand dabei eine strukturell belastbare, endlosfaserverstärkte thermoplastische Tragstruktur (Organoblech), welche stoffschlüssig mit einer faserverstärkten duroplastischen PUR-Außenhaut in "Class-A"-Qualität versehen wird.

In dem Projektkonsortium wurde erfolgreich an den Materialien, Fertigungs- und Fügetechnologien, als auch angepassten Simulationsmethoden geforscht.

Um die Faserabzeichnung auf der Sichtseite des Bauteils zu minimieren, wurden PUR Systeme entwickelt, die eine für Außenhautbauteile geeignete Oberflächenqualität erzielen. Hierfür wurden angepasste Verarbeitungstechnologien für PUR-LFI (Long Fiber Injection), IMP (In Mold Painting) und CCM (Clear Coat Molding) erarbeitet.

Ferner wurden angepasste Materialkarten und CAE-Modellierungstechniken entwickelt und die Fügeverbindungen hinsichtlich Oberflächenstruktur und Grenzflächenenergien umfassend charakterisiert.

Die Arbeiten wurden abschließend mit Hilfe eines Funktionsdemonstrators umfassend validiert.

Kontakt

EDAG Engineering GmbH
Alexander Spiegel, M.Eng.
CC Leichtbau, Werkstoffe & Technologien
Reesbergstr. 1, 36039 Fulda
Tel: +49 661 6000-10235
Email: alexander.spiegel@edag.de

CFK Luftfederträger für Reisebusse

Machbarkeitsstudie

CFRP air spring base for buses

Feasibility study

Dipl.-Ing. (FH) **S. Rübsamen**, Dipl.-Ing. (FH) **H. Häberle**,
MAN Truck & Bus AG, München;
Dipl.-Ing. (FH), Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) **N. Elbs**, MAN Truck & Bus AG

Kurzfassung

Das Produktportfolio der MAN Truck & Bus AG umfasst unter anderem Fahrzeuge für den Lkw-Fernverkehr, den Baustellensektor, den Verteilerverkehr sowie Stadt-, Überland- und Reisebusse. Nutzfahrzeuge werden in der Regel für den Transport von Waren und Gütern eingesetzt. In diesem Kontext ist die maximale Nutzlast eines Fahrzeugs eine der zentralen Größen für die Kaufentscheidung des Kunden. Die Realisierung dieser spezifischen Kundenanforderung unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben hinsichtlich des zulässigen Fahrzeuggesamtgewichts zeigt den Bedarf einer Reduzierung des Fahrzeugeigengewichts. Möglichkeiten zur Gewichtsreduzierung lassen sich beispielsweise durch den werkstofflichen Leichtbau umsetzen. Der Ausgangspunkt dieser Arbeit ist die Herstellung eines Luftfederträgers auf Basis eines Kohlenstofffaserverbundkunststoff (CFK).

Der Luftfederträger verbindet die Hinterachse eines Reisebusses mit dem Busaufbau (Fahr-gastzelle). Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie zeigen zum einen, dass der Luftfederträger in Faserkunststoffverbundbauweise unter industriellen Bedingungen und Aspekten herstellbar ist. Zum anderen kann abgeleitet werden wie sich das CFK-Bauteil im Vergleich zur heute eingesetzten Serienausführung in Stahl positioniert. Als Fertigungstechnologie für das CFK-Bauteil wurde das Flechten mit einem angeschlossenen Resin Transfer Moulding Prozess (RTM-Prozess) betrachtet. Als wesentliche Prozessanforderungen an das hochsteife und sicherheitsrelevante Bauteil wurden eine automatisierte Fertigung für dickwandige Bauteile sowie eine gute Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit vorgegeben.

Abstract

The product portfolio of MAN Truck & Bus AG covers inter alia trucks for long-distance transport, construction and distribution as well as city and intercity buses and touring coaches. Trucks are as a rule used for the transport of goods. In this context the maximum payload of a vehicle is one of the principal factors in the customer's purchasing decision. Realisation of this specific customer requirement – taking into account the statutory permissible gross vehicle weight – indicates the need to reduce the vehicle's dead weight. Weight reduction can, for example, be achieved by using lightweight materials. This paper deals with the production of an air spring base from a carbon fibre composite (CFC).

The air spring base links the rear axle of a touring coach to the body (passenger cell). The feasibility study shows, firstly, that the air spring base can be made from fibre composite material under industrial conditions and requirements. Secondly, it gives insight into how the CFC part compares with the steel part used in series production today. The production technology envisaged for the CFC part was braiding followed by a resin transfer moulding (RTM) process. The main process requirements set for this highly rigid and safety-relevant part were automated production for thick-walled components, good reproducibility and high process security.

1. Einleitung

Nutzfahrzeuge zählen zu den Investitionsgütern und dienen im Wesentlichen dem Transport. Die Kaufentscheidung des Kunden wird unter anderem von der zur Verfügung stehenden Nutzlast und dem Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs beeinflusst. In diesem Zusammenhang wird typischerweise vom Begriff „Pay-Load“ gesprochen, welcher die bezahlte Nutzlast beschreibt. Als Nutzlast wird beim Lkw die Zuladung von Gütern bezeichnet, während sich beim Bus die Nutzlast auf die maximale Passagierzahl sowie die Mitnahme von Gepäckstücken bezieht.

Gesetzliche Vorschriften begrenzen das zulässige Fahrzeuggesamtgewicht (zGG) bei Bussen auf derzeit 18 Tonnen bei 2-achsigen bzw. 25 Tonnen bei 3-achsigen Fahrzeugen. Die zulässige Achslast beträgt für eine nichtangetriebene Vorderachse 10 Tonnen sowie 11,5 Tonnen für eine angetriebene Hinterachse. Hieraus folgt der Bedarf, für eine effiziente Nutzung des Fahrzeugs den Nutzlastanteil am zulässigen Gesamtfahrzeuggewicht zu maximieren. Die naheliegendste Möglichkeit, die Nutzlast beim Bus zu steigern, verbunden mit

der Prämisse eines gleichbleibenden oder gar gesteigerten Komforts, ist die Reduzierung des Fahrzeugeigengewichts.

Im Rahmen einer Voruntersuchung wurde als Bauteil mit hohem Leichtbaupotential der Luftfederträger identifiziert, der seinen Einsatz in 2-achsigen und 3-achsigen Reisebussen der MAN findet. Inhalt dieser Studie ist es, den Werkstoffleichtbau zur Gewichtsreduzierung und Optimierung von Bauteilen einzusetzen. Eine Abschätzung prognostizierte ein Gewichtesparpotential von mindestens 50 Prozent. Durch die Reduzierung der ungefederten Masse sind zudem eine Verbesserung der fahrdynamischen Eigenschaften und eine Verschleißreduzierung im Bereich der Baugruppe zu erwarten. Hiervon ausgehend soll mittels dieses Bauteils der Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffbauteilen im Strukturbereich bei MAN validiert werden. Durch die Vergleichbarkeit von Bus- und Lkw-Fahrwerken dürften die zu erwartenden Ergebnisse allgemein für Nutzfahrzeuge der MAN anwendbar sein.

2. Der Luftfederträger für die Hinterachse von Reise- und Überlandbussen

Das Produktportfolio von MAN & NEOPLAN beinhaltet 2- und 3-achsige Reise- und Überlandbusse für unterschiedlichen Einsatz. Die im Fernverkehr eingesetzten Reisebusse sind in der Regel für ca. 50 Fahrgäste konfiguriert. Die Laufleistung beträgt zwischen 80.000 km und 100.000 km pro Jahr und erfordert eine entsprechend langlebige und robuste Auslegung. Ein Beispiel ist der in Bild 1 gezeigte MAN Lion's Coach.

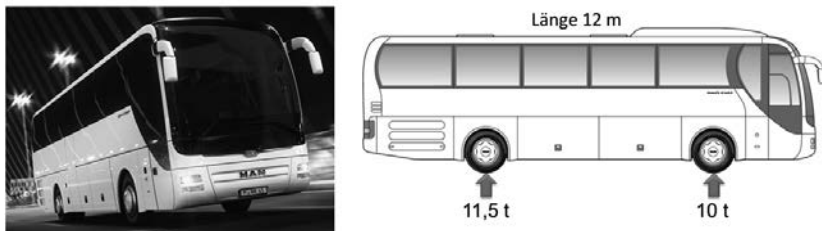


Bild 1: Reisebus MAN Lion's Coach im Fahrbetrieb und die Achslastverteilung eines 2-achsigen Busses

Beim Reisebus wird vergleichsweise viel Eigengewicht durch die oftmals komfortable Ausstattung ins Fahrzeug eingebracht. Aufgrund des großen Überhangs – Motor und Getriebe im Heckbereich – konzentriert sich bereits in der Standardkonfiguration das Gewicht maßgeblich auf den Bereich der Hinterachse. Die Verbindung des Fahrwerks mit dem Chassis

übernimmt der Luftfederträger (Bild 2). Pro Hinterachse sind zwei Luftfederträger für die Lagerung des Busgerippes verbaut.

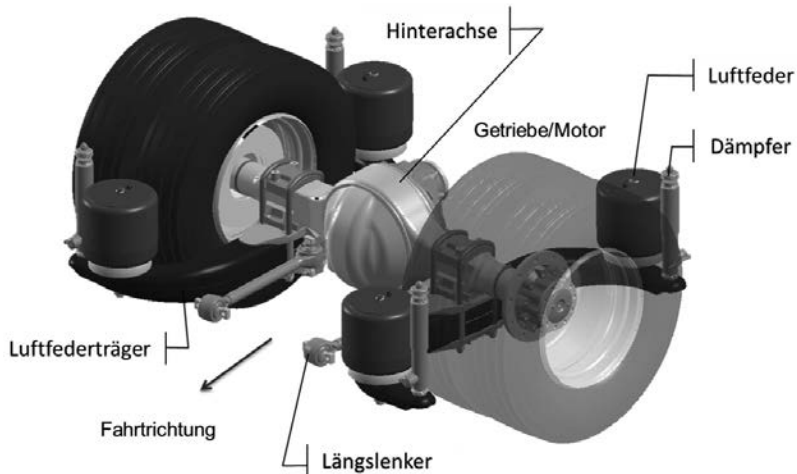


Bild 2: Hinterachseinbau Reisebus, Stahl-Luftfederträger mit Anbindungsplatten

Der derzeitige Serienluftfederträger, bestehend aus der Tragstruktur mit einem Gewicht von ca. 53 kg sowie den Stahl-Anbindungsplatten zur Achse, ist ca. 1.600 mm lang und die zwei Arme kragen etwa 600 mm aus. An dieser Tragstruktur sind die Luftfedern und die Dämpfer für die Chassislagerung befestigt. Die gebogene Form umgreift die Räder und ermöglicht eine breite Lagerung des Busgerippes. Dies verbessert die Wankstabilität und führt somit zu einem höheren Fahrkomfort.

Die derzeitige Stahl-Schweiß-Konstruktion der Tragstruktur soll als CFK-Hohl-Profil ausgeführt werden und eine deutliche Gewichtseinsparung ermöglichen. Die auftretenden Lasten werden vorwiegend vertikal an den Anbindungspunkten der Luftfedern und Dämpfer in die Tragstruktur eingeleitet. Diese bewirken im Bauteil Torsions- und Biegebelastungen. Zum einen kann mit der Querschnittsgeometrie Einfluss auf das Spannungsverhalten genommen werden, zum anderen sind Belastungen über das Material aufzunehmen.

3. CFK-Fertigungstechnologie

An das CFK-Fertigungsverfahren werden im Wesentlichen zwei Anforderungen gestellt: Einerseits muss es für die Realisierung der spezifischen Bauteilgeometrie geeignet sein, da die Tragstruktur als gebogenes, dickwandiges, Hohlbauteil ausgeführt wird. Für die auftretenden Torsions- und Biegebelastungen werden Faserorientierungen in 0° und $\pm 45^\circ$ benötigt. Andererseits muss eine Fertigung für die erforderliche Bauteilstückzahl von ca. 5.000 Stück/Jahr zu vertretbaren Kosten möglich sein. Für eine ausreichende Produktivität wird ein hoher Materialaustrag benötigt bei gleichzeitig geringem Verschnitt der teuren Kohlenstofffaser. Zudem erscheint ein hoher Automatisierungsgrad zielführend, um fertigungstechnisch eine gewisse Reproduzierbarkeit, Prozesssicherheit, und Qualität zu gewährleisten. Auf Basis des aufgeführten Anforderungsprofils fiel die Wahl der CFK-Fertigungstechnologie auf eine Flecht-RTM-Bauweise.

3.1. Das Flechtverfahren

Als geeignetes und seriennahes Fertigungsverfahren für Faserverbundstrukturen wurde für das Hohlprofil ein Flecht-/RTM-Prozess ausgewählt. Die Munich Composites GmbH, München, ist Entwicklungspartner in diesem Projekt. Sie hat die Möglichkeit, die CFK-Hohlstruktur mittels eines automatisierten Herstellungsprozesses, bestehend aus Flechten und Harzinjektion im RTM-Prozess, zu fertigen. Das Flechtrad ist am Umfang mit Faserspulen, sogenannten Klöppeln, bestückt (Bild 3). Die radial angeordnet Klöppel laufen am Umfang entlang und auf geschlängelten Bahnen so aneinander vorbei, dass sich die geführten Rovings miteinander verflechten. Dazu bewegt sich ein Teil der Klöppel im Uhrzeigersinn, ein Teil gegen den Uhrzeigersinn. Ein dritter Teil verbleibt an festen Positionen außerhalb der bewegten Klöppel. Während die bewegten Klöppel die Flechtoperation ausführen, leiten die feststehenden die sogenannten Stehfäden zu, welche im Bauteil als Null-Grad-Fasern zum Liegen kommen. Durch die direkte Verarbeitung der Rovings entfällt die Erstellung eines Halbzeugs und es kann im Vergleich zu anderen faserverarbeitenden Verfahren ein Prozessschritt eingespart werden. Die trockenen Fasern werden nach innen zum Flechtauge geführt, in welches der zu befechtende Kern eingeführt und über einen Roboter verfahren wird.

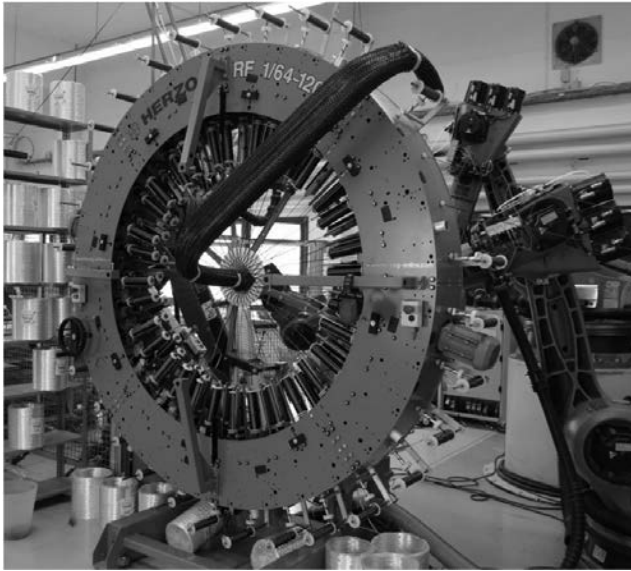


Bild 3: Flechtrad von Munich Composites, eingespannt ist die Preform der Tragstruktur
[Quelle: Munich Composites GmbH]

Eine Besonderheit des gewählten Flechtverfahrens besteht darin, dass hier ein von Munich Composites entwickelter wiederverwendbarer Flechkern eingesetzt wird, der nach Fertigstellung der Preform entfernt wird. Dieser Kern bildet für eine bauteilorientierte Faserablage die innere Bauteilgeometrie. Zwei Roboter halten den Flechkern an dessen Enden und führen das Bauteil kontinuierlich durch das Flechtauge bis alle Faserlagen aufgebaut sind. Die Fasern werden über den Vorschub des Flechkerns direkt abgelegt. Über die bewegten und feststehenden Klöppel entsteht eine geflochtene trockene Preform mit triaxialem Geflecht, also einer Faserorientierung von 0° und $\pm 45^\circ$.

3.2. RTM-Prozess

Das Resin Transfer Moulding (RTM) ist ein Verfahren zur Infiltrierung von Faserhalbzeugen (Preform). Die verwendete RTM-Anlage besteht aus einer Injektionsanlage und einem zweiseitigen Werkzeug. Die Preform wird in die Formhälfte eingelegt. Danach wird das Werkzeug geschlossen und Vakuum angelegt. Anschließend wird im Allgemeinen mittels Druck der Matrixwerkstoff, in diesem Fall Epoxidharz, in das Bauteil injiziert. Dabei ist eine gleichmäßi-

ge Harzverteilung von Bedeutung, um Lufteinschlüsse zu minimieren und eine vollständige Formfüllung sowie Benetzung der Fasern sicherzustellen. Insbesondere bei dickwandigen Bauteilen stellt die Injizierung des Matrixwerkstoffes den längsten Prozessschritt dar. Nach der Aushärtung kann das Faserkunststoffverbundbauteil entnommen werden.

3.3. Dimensionierung und Fertigung der Tragstruktur

Der Luftfederträger wird mit dem Gewicht des gesamten hinteren Busbereichs belastet. Für die Dimensionierung wird eine Ersatzkraft an den Lagerungsstellen der Luftfedern eingeleitet. Zudem sollte die CFK-Tragstruktur den Bauraum des Stahlbauteils nicht überschreiten und die bestehende Achsanbindung über die Stahlplatten nutzen. Bild 4 zeigt das Designkonzept des CFK-/Stahl-Hybrid Luftfederträgers mit CFK-Tragstruktur.

Der Verbundwerkstoff besteht aus einer HT-Faser und einem Epoxidharz. Das triaxiale Geflecht nimmt entsprechend der Faserorientierung die Torsions- und Biegebelastungen auf. Gemäß der Lastverteilung wird die Tragstruktur des CFK-Luftfederträgers in drei Wandstärken unterteilt. Ausgehend von der Lasteinleitung beträgt die Wandstärke ca. 12 mm, an den Bauteilenden ca. 9 mm. Die Faserlagen werden schichtweise aufgebaut. Angedacht sind spezielle Wendepunkte im Bauteil, womit die Flechtlagen und Wandstärken kontinuierlich erzeugt werden können.

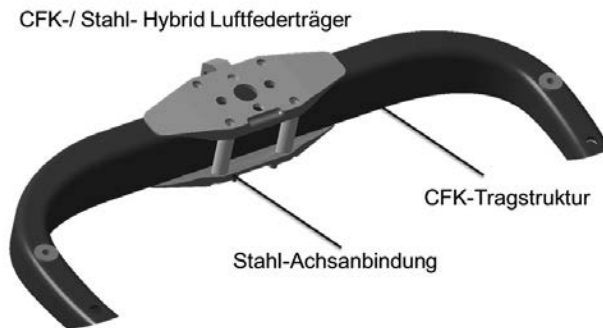


Bild 4: Designkonzept des CFK-/Stahl-Hybrid Luftfederträgers mit CFK-Tragstruktur

Die trockene Preform wird aus dem Flechtrad genommen und der Flechtkern entfernt. Im späteren Serienprozess wird eine dünne aufblasbare Schlauchfolie für die Harzinjektion in die Preform eingesetzt. Die Preform wird in das RTM-Werkzeug eingelegt und die Schlauchfolie für die Ausbildung der Hohlgeometrie mit Druck beaufschlagt. In die ausgeformte Faserstruktur wird das Harz injiziert. Das Bauteil bleibt zur Aushärtung im Werkzeug und kann nach Entnahme, bis auf eine manuelle Entfernung des evtl. auftretenden Austriebs, direkt weiterverwendet werden. Dagegen erfolgte bei der Machbarkeitsstudie die Harzinjektion für das Musterbauteil mittels Vakuuminjektionsverfahren. Im Nachgang werden die Anbindungselemente aus Stahl mit der CFK-Tragstruktur verklebt.

4. Ergebnis der Machbarkeitsstudie – eine wettbewerbsfähige Lösung?

Die Prozessschritte wurden anhand eines Musteraufbaus des CFK-Luftfederträgers durchlaufen. Das CFK-Hohlprofil ist rund 66 Prozent leichter als die derzeitig eingesetzte Serienausführung aus Stahl und führt somit zu einer Gewichtsreduzierung von ca. 70 kg pro Bus. Damit verbunden ist eine Nutzlasterhöhung um einen Fahrgast.



Bild 5: CFK-/Stahl-Hybrid Luftfederträger

Die Fertigung des Musterbauteils (Bild 5) zeigt, dass der Flechtprozess eine Möglichkeit zur Herstellung dieser Hohlstruktur darstellt. Vor allem dem hohen Rohmaterialpreis der Kohlenstofffaser geschuldet, ist der CFK-Träger erwartungsgemäß deutlich teurer als die Stahlvariante. Mit dem direkten Verarbeiten des Rovings und dem vergleichsweise geringen Ver-

schnitt von ca. 5 Prozent trägt das Verfahren zur Ressourcenschonung und Kostensenkung bei.

Die in Abschnitt 1 beschriebenen fertigungstechnischen Anforderungen können mit der gewählten Flecht-RTM-Bauweise realisiert werden. Bedingt durch den eingesetzten Automatisierungsgrad kann eine gleichbleibend hohe Qualität sowie Prozesssicherheit gewährleistet werden. Obwohl die Gesamtprozesszeiten vergleichsweise lang sind, sind sie für die geforderten Jahresstückzahlen im Reisebussegment ausreichend. Auch wenn der gewählte Fertigungsprozess zunächst effizient erscheint, wirkt er sich trotzdem maßgeblich auf die Mehrkosten aus.

Die höheren Herstellkosten könnten durch die Nutzlasterhöhung gerechtfertigt werden. Wird die durchschnittlichen Jahreslaufleistung von 100.000 km eines Fernbusbetreibers herangezogen, zeigt eine einfache Modellrechnung, dass bei der Beförderung eines zusätzlichen Fahrgastes sich erhebliche Mehreinnahmen ergeben können. Des Weiteren wirkt sich die Gewichtsreduzierung positiv auf den Kraftstoffverbrauch und die damit verbundene CO₂-Emission aus.

5. Erkenntnisse & Ausblick

Der Machbarkeitsstudie kann eine systematische Bauteilentwicklung mit einer Vertiefung der Bauteilauslegung folgen. Dabei sind vor allem die Lasteinleitung und die Auslegung der Verbindungselemente neu zu konzipieren, um eine lastflussgerechte Einleitung der Kräfte zu erreichen. An Bauteilproben waren Defizite bei der Faserablage zu erkennen, die in erster Linie auf die fehlende Faserspannung zurückgeführt werden. Diese ergab sich durch die rechteckige Querschnittsgeometrie der Tragstruktur und könnte durch eine bombierte Kontur verhindert werden. Des Weiteren ist der Einsatz des Bauteils im Reisebus zu validieren. Festigkeitsversuche und Erprobungen im Fahrzeug müssen zeigen, welche Auswirkungen Umwelteinflüsse haben und wie sich das CFK-Bauteil auf die Fahreigenschaften auswirkt.

6. Danksagung

Wir bedanken uns bei der Firma Munich Composites GmbH, Entwicklungspartner dieser Machbarkeitsstudie, für die Unterstützung und die Freigabe des Bildmaterials.

Potenzial zur Gewichtsreduktion in Nutzfahrzeugen

Luftfedern mit Abrollkolben aus glasfaserverstärktem Kunststoff

Potential for Weight Reduction in Commercial Vehicles

Air Springs with Pistons made of Glass Fiber reinforced Plastic

Dipl.-Ing. **H. Gawinski**, Dipl.-Ing. **E. Neitzel**,
Dipl.-Betriebswirt, **D. Bauch**,
ContiTech Luftfedersysteme GmbH, Hannover

Kurzfassung

An moderne Nutzfahrzeuge und Busse werden hohe Anforderungen in Hinblick auf die Transporteffizienz gestellt. Ein Ansatz ist dabei die Steigerung der Nutzlast unter Beibehaltung der gesetzlich limitierten Achslasten. Die Substitution von Metall durch Kunststoff ist dazu der Schlüssel. Für Luftfedern wird dieser Weg seit Jahrzehnten konsequent verfolgt. Mittels der in diesem Aufsatz beschriebenen Methode der integrativen Berechnung lassen sich auch Luftfedern für Zugmaschinen, Lastkraftwagen und Busse in Leichtbauweise konstruieren, bei denen das Innenvolumen des Abrollkolbens zur Steigerung des Fahrkomforts genutzt wird. Durch Übertragung der Ergebnisse aus der Moldflowanalyse in den theoretischen Festigkeitsnachweis mittels FEM-Berechnung wird eine realistischere Aussage über die Materialbeanspruchung im Bauteil möglich. Dies führt zu einem wesentlich verringerten Materialeinsatz. Materialkosten und Zykluszeiten in der Herstellung werden minimiert. Als Ergebnis stehen Luftfedersysteme zur Verfügung, die vergleichbar zum Stand der Technik bis zu 15 kg Gewichtseinsparung an einer 4-Luftfeder-Antriebsachse einbringen. Die daraus resultierende Reduktion der CO₂-Emissionen kann bis zu 200 kg bei 400.000 km Laufleistung betragen. Der werkstoffimmanente Korrosionsschutz liefert ebenfalls ein Betrag für den Umweltschutz.

1. Motivation

An moderne Nutzfahrzeuge und Busse werden hohe Anforderungen in Hinblick auf die Transporteffizienz gestellt (Bild 1). Konsequente Reduktion des Fahrzeuggewichtes ist dabei einer der Schlüsselfaktoren zur Erreichung dieses Zieles. Luftfedern sind durch ihr gutes Verhältnis von Nutzlasttragvermögen zu eingesetzter Masse an sich schon das optimale Federelement für Fahrwerke in Lastkraftwagen, Zugmaschinen, Bussen und Anhängern. Dennoch gilt es auch hier, das Gewicht der Komponenten für neue Fahrzeuggenerationen ohne Einbußen an die Leistungsfähigkeit zu reduzieren.



Bild 1: Motivationsfaktoren für den Einsatz von Kunststoff im Nutzfahrzeug

2. Anforderungen an Luftfedern für Nutzfahrzeuge

Ein Ansatzpunkt ist dabei die Substitution von Metall durch Kunststoff, bei der die vielfältigen Anforderungen an die Luftfedermodule in Punkto Funktion und Haltbarkeit selbstverständlich in gleichen Umfang erfüllt werden müssen (Bild 2).



Bild 2: Anforderungen – Produkthaltbarkeit beeinflussende Parameter

Für die hochbelasteten Anschlussteile zur rahmen- und achsseitigen Befestigung bilden kurzglasfaserverstärkte Thermoplastwerkstoffe, wie Polyamide mit 30 % bis 50 % Glasfaseranteil; die geeignete Materialbasis.

3. Ableitung von Lastfällen

Luftfedersysteme mit Kunststoffanschlussteilen sind im Bereich der Fahrerhaus- und Fahrersitzanwendungen seit Jahrzehnten im Einsatz. Seit ca. 15 Jahren sind auch Abrollkolben aus glasfaserverstärkten Kunststoffen in Anhängerfahrwerken Stand der Technik (Bild 3). In diesen Anwendungen ist zur Erfüllung der Steifigkeitsforderungen die Nutzung des vom Abrollkolben umschlossenen Volumens nicht erforderlich.



Bild 3: Kunststoff – Stand der Technik in vielfältigen Nutzfahrzeug-Anwendungen

In Zugmaschinen, Lastkraftwagen und Bussen dagegen lassen sich Forderungen an die niedrigen Federsteifigkeiten nur durch Nutzung des Abrollkolbeninnenvolumens erfüllen. Die Innenseite des Abrollkolbens ist dabei zu jedem Zeitpunkt mit dem gleichen Innendruck der Luftfeder beaufschlagt. Die aus den unterschiedlichen Betriebssituationen resultierenden Belastungen des Bauteils sind bei der konstruktiven Auslegung zu berücksichtigen. So führt die auf und ab Bewegung der Rollfalte beim statischen Heben und Senken, bei Be- und Endladevorgängen sowie beim dynamischen Federn im weiten Beladungsbereich zu sehr unterschiedlichen radialen und axialen Belastungen der Kolbenmantelfläche (Bild 4).

Die Einhaltung der äußeren geometrischen Bauraumgrenzen und die Forderung zur Maximierung des Kolbeninnenvolumens zwingen ebenso zur Minimierung der Wandstärken für den Abrollkolben, wie die Forderung zur Minimierung des Materialeinsatzes, um die Kosten-senkungspotentiale für Material- und Prozesskosten durch kurzen Zykluszeiten heben zu können.

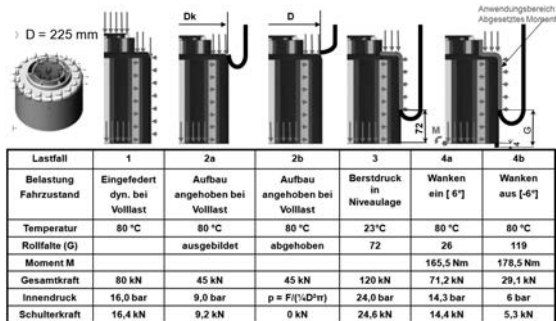


Bild 4: Beispiele zu Lastfällen für einen Luftfeder-Abrollkolben ohne Pufferkraftabstützung

4. Simulation und Festigkeitsberechnung

Die Abrollkolben ohne Nutzung des Kolbenvolumens werden in der Regel einteilig im Spritzgussverfahren aus einem Werkzeug gefertigt. Dabei besteht ein größerer Gestaltungsspielraum für die Auslegung der Verstärkungsrippen und der notwendigen Ausformschrägen. Für die Erbringung der theoretischen Festigkeitsnachweise reicht hier häufig ein isotroper FEM-Berechnungsansatz aus. Dieser muss aber in jedem Fall die Temperaturabhängigkeit der Materialfestigkeit berücksichtigen. Die Produktauslegung gilt als optimiert, wenn die mit isotropen Materialansatz berechneten Spannungen unterhalb der zulässigen Materialspannungen für die max. Einsatztemperatur des Werkstoffs liegen (Bild 5).

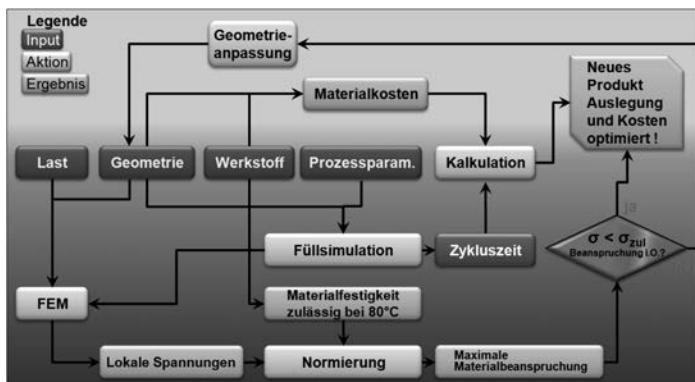


Bild 5: Auslegungsschema Isotrope Berechnung

Bei der Nutzung des Kolbenvolumens erfolgt zunächst die Herstellung des topfförmigen Bauskörpers, der neben der aufwändigen innenseitigen Verrippung meist auch die achsseitigen Befestigungselemente trägt. In eine zweiten Werkzeug erfolgt die Herstellung des geringer verrippten Deckelkörpers, der die luftfederseitigen Anschlusselemente einschließt. Beide Bauteile werden in einem nachgelagerten Fügeprozess, wie z.B. mittels Rotationsreißschweißverfahren, miteinander verbunden. Die dünneren Wanddicken, die komplexere Verrippung, die zusätzliche Fügezone machen den Einsatz von komplexeren Berechnungsverfahren notwendig. Hierbei hat sich die Methode der integrativen Berechnung bewährt [1;2]. Mit diesem Vorgehen wird zunächst über eine Moldflowanalyse, unter Einbeziehung der im Serienprozess zur Anwendung kommenden Werkzeuggeometrie und Spritzgussparameter, der Formfüllprozess simuliert. Die Simulation liefert zum Einen wichtige Erkenntnisse zu Formfüllung und Ausbildung der Fließfronten, mit denen sich über Anpassung der Produkt- und Werkzeuggeometrie Schwachstellen wie Fließnähte vermeiden lassen. Wichtiger noch ist aber die Information zur lokalen Faserorientierung, die anschließend in das Geometriemodell des Bauteils übertragen wird. In einem zweiten Simulationsschritt erfolgt dann die FEM-Berechnung unter Berücksichtigung der lokalen Faserorientierungen. Zur Bewertung, ob das Bauteil eine ausreichende Festigkeit ausweist, werden die jeweils lokal vorliegenden gerichteten Spannungen mit den Leistungsdaten des Materials für den jeweiligen Faserorientierungsgrad verglichen. Durch Normierung auf den orientierten zulässigen Spannungswert erhält man eine Kennziffer, die Auskunft über eine eventuelle lokale Schädigung des Bauteils gibt (Bild 6).

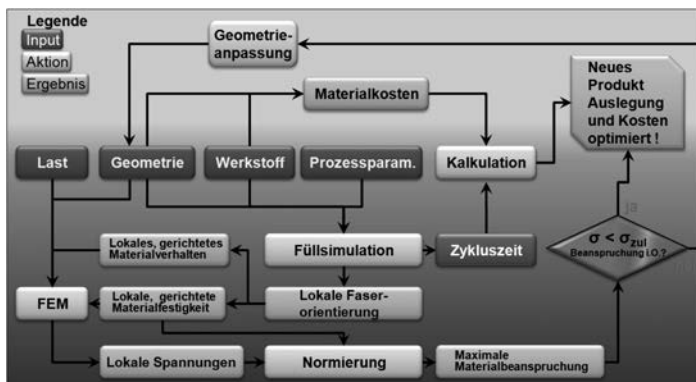


Bild 6: Auslegungsschema integrative Berechnung

Durch Anpassung der Geometrie, Verfahrensparameter, etc. erfolgt die Optimierung bis die Kennziffer eine gleichmäßige Verteilung über das Bauteil mit ausreichendem Abstand zum Schädigungsgrenze zeigt. Durch Anwendung der Methode wird neben ausreichender Festigkeit auch minimaler Materialeinsatz sichergestellt. Serienerfahrungen beweisen, dass sich mit den Ansatz der integrativen Berechnungsmethode bei der Substitution von Stahl durch Kunststoff bis zu fast 2/3 des Bauteilgewichtes einsparen lassen. Am Beispiel einer Antriebsachse für eine Zugmaschine mit 4-Luftfedern bedeutet dies eine Reduzierung der ungefederten Massen um bis zu 15 kg.

5. Gewichtersparnis, Erprobung, Verifikation

Zur Absicherung der theoretischen Festigkeitsnachweise werden im Rahmen der Produktentwicklung die Lastfälle im Laborversuch nachgestellt (Bild 7).



Bild 7: Versuche zur Verifizierung der Auslegungsergebnisse

Wichtig dabei ist, dass die für die Versuche verwendeten Musterteile seriennah, d.h. unter Verwendung der gleichen Werkzeug und Prozessdaten gefertigt wurden, wie sie als Basis für die Berechnung zu Grunde gelegt wurden. Hier zeigt sich die Zuverlässigkeit der integrativen Auslegungsmethode dadurch, dass sich lokale Schädigungen bei Überlastversuchen exakt an den vorausberechneten Orten im Bauteil einstellen, während es bei der Anwendung der isotropen Berechnungsmethode durch aus zu Abweichungen im Bruchbelastung und Schadensort kommen kann. Dies gilt in der Regel auch für Haltbarkeitserprobungen.

6. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Substitution von Metall durch Kunststoff bei hochbelasteten Strukturbauteilen wie Abrollkolben von Luftfedern, unter Einbeziehung der integrativen Berechnungsmethode, auch im Fahrwerksbereich Gewichts- und Kostenersparungen erzielen lassen [3]. Voraussetzung dafür ist selbstverständlich die genau Kenntnisse der Lastfälle aus der Vielfalt der unterschiedlichen Einsatzbedingungen im Feldeinsatz. Mit 12 kg bis zu 15 kg Gewichtseinsparung für eine 4-Luftfeder Antriebsachse können so über einen Einsatzbereich von 400.000 km bis zu 200 kg CO₂-Emissionen eingespart werden (Bild 8).



Bild 8: Vorteile durch Luftfedern mit Abrollkolben aus Kunststoff

Dabei können diese Potentiale ohne Einbußen im Komfort gehoben werden. Gleichzeitig wird durch den Einsatz von Kunststoff mit seinem werkstoffimmanenten Korrosionsschutz ohne zusätzlichen Oberflächenschutz und den damit verbunden Umweltbelastungen auch unter widrigen Witterungsverhältnissen die Langlebigkeit des Produktes bei gleichbleibenden guten optischen Erscheinungsbild sichergestellt.

- [1] Glaser, S.; Wüst, A.; Aumer, B.: Metall ist die virtuelle Messlatte. Kunststoffe 7 (2008), 5 S. 88-92
- [2] Hopmann, C.; Arping, T.; Baranowski, T.: Bauteileigenschaften präzise vorhersagen. Kunststoffe 7 (2011), 5 S. 44-49
- [3] Bauch, D.; Ripamonti, J.; Wolandewich: Damit Trucker und Umwelt sich wohlfühlen. Automotive Special OEM Supplier, 2012, 3 S. 64-65

Luftfedern mit Abrollkolben aus glasfaserverstärktem Kunststoff

1	Motivation
2	Anforderungen an Luftfedern für NFZ
3	Ableitung von Lastfällen
4	Simulation & Festigkeitsberechnung
5	Gewichtersparnis / Erprobung / Verifikation
6	Zusammenfassung

Luftfedern mit Abrollkolben aus glasfaserverstärktem Kunststoff

1	Motivation
2	Anforderungen an Luftfedern für NFZ
3	Ableitung von Lastfällen
4	Simulation & Festigkeitsberechnung
5	Gewichtersparnis / Erprobung / Verifikation
6	Zusammenfassung

Abrollkolben aus Kunststoff

Motivation / NFZ – Industrie

- › Reduzierung der Einkaufskosten (Wirtschaftlichkeit)
- › Starke Forderung zur Gewichtsreduktion in der NFZ-Industrie
 - › Aufwand und Gewichte für Abgasnachbereitung (Kompensation)
 - › Vorteile für die Transportunternehmen (Effektive Beladung)
 - › Verringerung der ungefederten Massen (Straßenschonung)
 - › Verringerung des Kraftstoffverbrauches (Energie- & Umwelt-Vorteile)
- › Stärkere Umweltforderungen in der NFZ-Industrie
 - › Verbot von Cr.VI haltigem Oberflächenschutz (Schadstoffvermeidung)
 - › Längere Produkthaltbarkeit (Ressourcenschonung)
- › Vereinfachung der Produkthandhabung
 - › Im Herstellungsprozess der Luftfeder (Ergonomie)
 - › In der Montagelinie des Fahrzeugs (Ergonomie)



Abrollkolben aus Kunststoff

Kunststoffbauteile in Luftfedersystemen - Historie

- › Neben Millionen gelieferten Luftfedermodulen mit Kunststoffkolben für
 - › Fahrersitze
 - › Fahrerhauslagerungen
 - › Industrieanwendungen
 - › Pkw
 - › SUVs



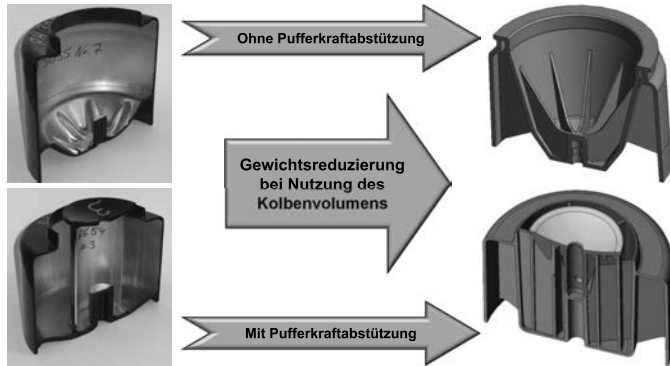
Luftfedern mit Abrollkolben aus glasfaserverstärktem Kunststoff

1	Motivation
2	Anforderungen an Luftfedern für NFZ
3	Ableitung von Lastfällen
4	Simulation & Festigkeitsberechnung
5	Gewichtersparnis / Erprobung / Verifikation
6	Zusammenfassung

Anforderungen Produkthaltbarkeit – Beeinflussende Parameter



Anforderungen Substitution von Metall durch Kunststoff



Anforderungen Auslegungsvorgaben für Abrollkolben mit Innenvolumen

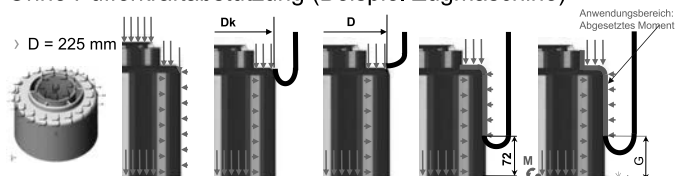
- › Technische Kundenforderung
 - › Maximierung des nutzbaren Kolbeninnenvolumens für niedrige Federraten
 - › Sichere Anbindung ans Fahrzeug
 - › Funktionsbereitschaft in den geforderten Temperaturbereichen von +80°C bis -40°C.
 - › Druckstabilität bis Berstdruck der Luftfeder (typisch: 24 bar)
 - › Ausreichende Festigkeit gegen Steinschlag
 - › Abstützen von Pufferkräften (wenn Kundenforderung).
- › Zusatzforderung
 - › Bei Substitution des Stahlkolbens muss der Kunststoffkolben neben der Gewichtsvorteilen ein deutliches Kosteneinsparungspotential aufweisen.
 - › Dazu: Minimierung des Materialeinsatzes (Materialkosten, Zykluszeiten)

Luftfedern mit Abrollkolben aus glasfaserverstärktem Kunststoff

1	Motivation
2	Anforderungen an Luftfedern für NFZ
3	Ableitung von Lastfällen
4	Simulation & Festigkeitsberechnung
5	Gewichtersparnis / Erprobung / Verifikation
6	Zusammenfassung

Lastfälle

Ohne Pufferkraftabstützung (Beispiel Zugmaschine)

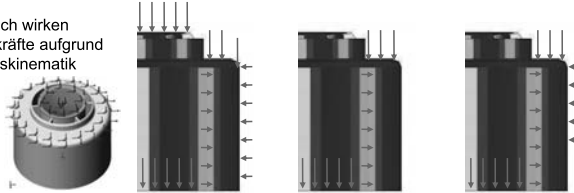


Lastfall	1	2a	2b	3	4a	4b
Belastung Fahrzustand	Eingefedert dyn. bei Vollast	Aufbau angehoben bei Vollast	Aufbau angehoben bei Vollast	Berstdruck in Niveaulage	Wanken ein [6°]	Wanken aus [-6°]
Temperatur	80 °C	80 °C	80 °C	23°C	80 °C	80 °C
Rollfalte (G)		ausgebildet	abgehoben	72	26	119
Moment M					165,5 Nm	178,5 Nm
Gesamtkraft	80 kN	45 kN	45 kN	120 kN	71,2 kN	29,1 kN
Innendruck	16,0 bar	9,0 bar	$p = F/(1/4 \cdot D^2 \cdot \pi)$	24,0 bar	14,3 bar	6 bar
Schulterkraft	16,4 kN	9,2 kN	0 kN	24,6 kN	14,4 kN	5,3 kN

Lastfälle

Mit Pufferkraftabstützung (Beispiel Zugmaschine)

› Zusätzlich wirken
Lateralkräfte aufgrund
der Achskinematik



Lastfall	1	2	3
Belastung Fahrzustand	Durchfedern bis Pufferkontakt	Aufbau angehoben bei Volllast	Berstdruck in Niveaulage
Gesamtkraft	143 kN	50 kN	121 kN
Innendruck	14,5 bar	12,5 bar	30,0 bar
Pufferkraft	91 kN	0 kN	0 kN
Schulterkraft	7 kN	11 kN	27 kN

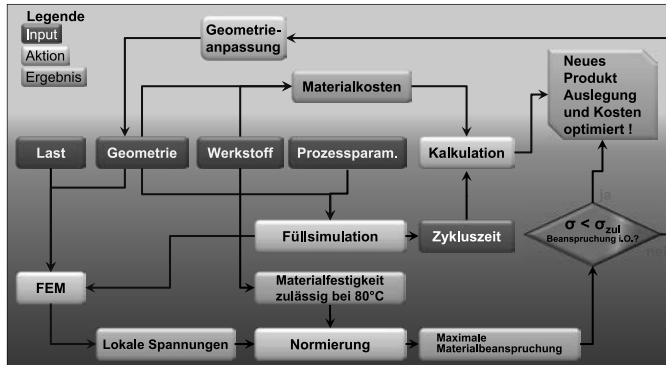
Luftfedern

mit Abrollkolben aus glasfaserverstärktem Kunststoff

1	Motivation
2	Anforderungen an Luftfedern für NFZ
3	Ableitung von Lastfällen
4	Simulation & Festigkeitsberechnung
5	Gewichtersparnis / Erprobung / Verifikation
6	Zusammenfassung

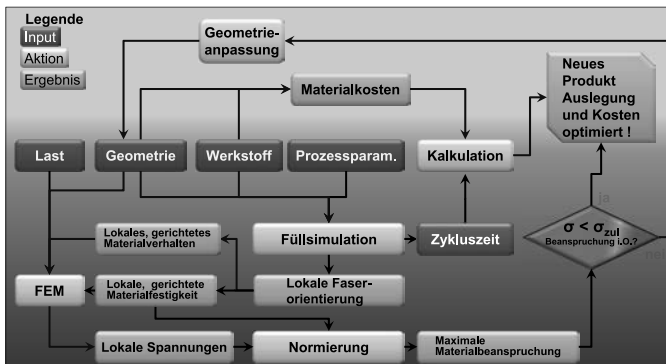
Simulation & Berechnung

Isotrope Berechnung – Stand der Technik



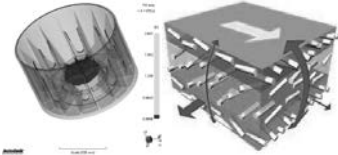
Simulation & Berechnung

Integrative Berechnung – Stand der Technik



Der Schlüssel zur Gewichtsreduktion & Robustheit

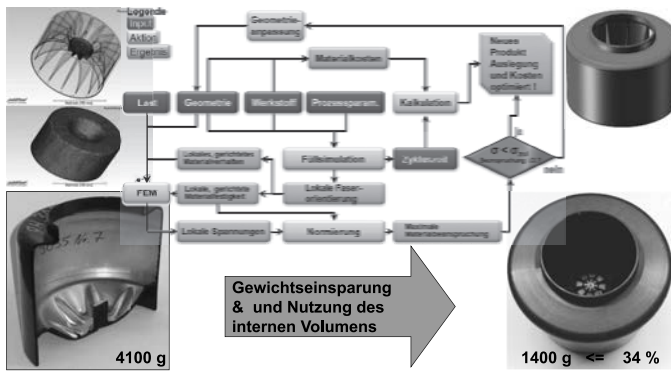
- › Integrative Simulation ermöglicht die vollständige Berücksichtigung von Faserorientierung, Prozessparametern und Materialeigenschaften
- › Die anisotrope Faser/Polymer-Festigkeiten und -Steifigkeiten werden unter Berücksichtigung der lokalen Faserorientierung zur Berechnung der realen Dehnungen überlagert
- › Robuste Konstruktion für reale Lkw Einsatzbedingungen
- › Präzision auch bei der Berechnung singularer Ereignisse (Steinschlag)



Wichtig !
Prozessparameter
Simulation = Fertigung

Integrative Berechnung

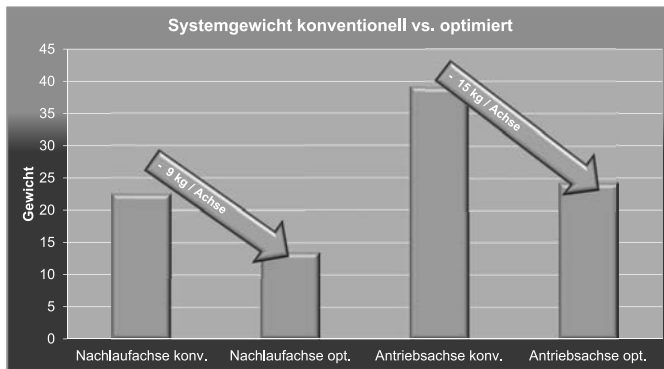
Zusammenfassung



Luftfedern mit Abrollkolben aus glasfaserverstärktem Kunststoff

1	Motivation
2	Anforderungen an Luftfedern für NFZ
3	Ableitung von Lastfällen
4	Simulation & Festigkeitsberechnung
5	Gewichtersparnis / Erprobung / Verifikation
6	Zusammenfassung

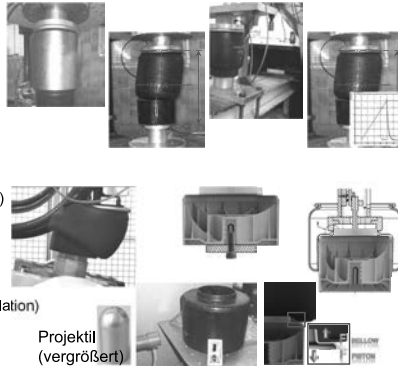
Gewichtersparnis Am Beispiel einer Nachlauf bzw. Antriebsachse



Verifikation

Versuche zur Erreichung maximaler Zuverlässigkeit

- › Haupt-Belastungsversuch
 - › Berstversuch (Niveau)
 - › Berstversuch (ausgefедert)
 - › Dyn. Stresstest (erhöhte Last)
 - › Dyn. Stresstest (ausgefедert)
 - › Haltbarkeit (bei Nennlast)
- › Zusätzliche Belastungsversuche
 - › Momenten Belastung (Kinematik)
 - › Ausdrehfestigkeit (Gewinde)
 - › Luftfeder Abzugsversuch
 - › Axiale Montage Belastung
 - › Stoßfestigkeit (Steinschlag-Simulation)
 - › Wank Simulation

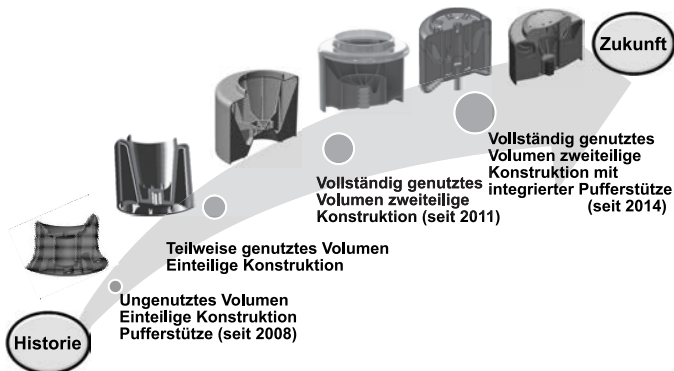


Luftfedern mit Abrollkolben aus glasfaserverstärktem Kunststoff

- | | |
|---|---|
| 1 | Motivation |
| 2 | Anforderungen an Luftfedern für NFZ |
| 3 | Ableitung von Lastfällen |
| 4 | Simulation & Festigkeitsberechnung |
| 5 | Gewichtersparnis / Erprobung / Verifikation |
| 6 | Zusammenfassung |

Abrollkolben aus Kunststoff

Kunststoffbauteile in Luftfedersystemen - Trends



Lightweight Design Competence

Polyamid Luftfederkolben mit vollständig nutzbarem Volumen

- › Bis zu 15 kg Gewichtersparnis
Je Achse in 4-Balg-Fahrwerken
- › 200 kg CO₂ Reduktion durch
Kraftstoffersparnis auf 400,000 km
- › Neue Kostensenkungspotentiale im
Vergleich zu konventionellen
Stahlkonstruktionen
- › Maximaler Komfort mit vollständig
genutztem Innenvolumen
- › Werkstoffimmanenter Korrosionsschutz



Auslegung und Fertigung von Blattfedern aus Faserverbundwerkstoffen für den Einsatz in schweren Nutzfahrzeugen

Besonderheiten und Herausforderungen

Dipl.-Ing. **H. Kempe**, IFC Composite GmbH, Haldensleben

Kurzfassung

Im Vortrag werden die Besonderheiten und Herausforderungen bei der Auslegung und Fertigung von hochbelasteten Faserverbundstrukturen für schwere Nutzfahrzeuge beschrieben.

Abstract

In the lecture the specifics and challenges in dimensioning and production of highly stressed structures made of fiber reinforced plastics for heavy duty vehicles are described.

1. Auslegung und Berechnung der Faserverbundblattfedern

Der erste Teil wird die Grundlagen der Auslegung der Faserverbundblattfedern unter Berücksichtigung der kinematischen, mechanischen und fertigungstechnischen Anforderungen beschreiben. Dabei wird die Besonderheit der geometriedefinierenden FEM umrissen, welche anschließend in die konstruktive Umsetzung überleitet. Zum Abschluss wird kurz auf die Werkzeugkonstruktion und deren Besonderheiten im Hinblick auf den anschließenden Fertigungsprozess eingegangen.

2. Fertigung der Strukturbauteile

Am Beispiel einer Vorderachslängsblattfeder wird die Fertigung dickwandiger Strukturbauteile im Prepreg-Heißpressverfahren erläutert. Dabei wird auf die Besonderheiten der Prepregherstellung, sowie die Vorgehensweise bei der Schichtung der Prepregemente hingewiesen.

Das Ende bildet eine Beschreibung des Gesamtprozesses, sowie eine Übersicht über Einflussgrößen auf die Bauteilherstellung.

Neue Möglichkeiten zur schnellen und individuellen Strukturierung von Werkzeugoberflächen

Laserlack im Werkzeug

Dipl.-Ing. **M. Gehlen**, Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft NRW GmbH, Lüdenscheid

Kurzfassung

Zur Individualisierung von Werkzeugoberflächen gibt es heute bereits einige Möglichkeiten wie z. B. Erodieren, Ätzen oder auch das direkte Lasern der Gesenke. Hinzu kommt nun ein neues Verfahren, bei dem eine Oberflächenschicht auf die Werkzeugoberfläche appliziert und im Anschluss mittels Laser lokal ausgehärtet wird. Die bearbeiteten Bereiche verbleiben im Werkzeug, während die übrigen Lackanteile mit Wasser ausgespült werden. Wesentliche Vorteile dieses Verfahrens liegen in der Bearbeitungszeit und auch darin, dass die Geometrie im Wesentlichen beibehalten wird.

Untersuchungsschwerpunkte

Erste Untersuchungen am Kunststoff-Institut Lüdenscheid haben gezeigt, dass die Struktur dauerfest ist und auch nach einigen Schichten Spritzgießbetrieb keine Abnutzungserscheinungen aufweist. Darüber hinaus sind weitere Randbedingungen und Fragestellungen von Interesse und wurden untersucht. Welche Linienbreiten sind minimal realisierbar, welche Schichtdicken sind möglich bzw. sinnvoll oder wie ist die Oberflächenbeschaffenheit in der Fläche? Aber auch Fragen nach dem Aufwand hinsichtlich der Wiederherstellung des Urzustands bzw. der Entfernung des ausgehärteten Lacks werden betrachtet.

Anwendung

Der lokal gelaserte Lack bietet eine gute Alternative zu anderen gängigen Strukturierungsmöglichkeiten. Das Verfahren ist wirtschaftlich, schnell in der Umsetzung und reproduzierbar. Bei entsprechender Datenaufbereitung sind auch 3D-Bauteile realisierbar.

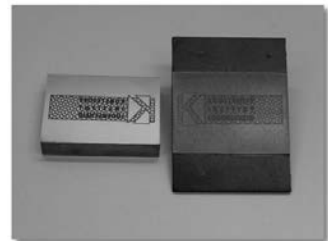


Bild 1: Strukturierter Werkzeugeinsatz

Vortragsinhalte

- ▶ Vorstellung des Instituts
- ▶ Verfahren zur Strukturierung von Werkzeugoberflächen
- ▶ Strukturierung mittels Laserlack
- ▶ Eigenschaften Laserlack
- ▶ Allgemeines zum Laserlack
- ▶ Ausblick

Kunststoff-Institut

- ▶ Gründung des Instituts im Jahr 1988
- ▶ An beiden Standorten 95 Spezialisten der Material-, Verfahrens-, Werkzeug-, Oberflächen-, Prozess- und Prüftechnik
- ▶ 12 Spritzgießmaschinen (8 mit Einlege- und Entnahmeautomatisation)
- ▶ Kompetenzzentrum für Duroplastverarbeitung
- ▶ Umfassende Messtechnik für Spritzgießprozessoptimierungen
- ▶ Seit 2000 akkreditiertes Prüflabor
- ▶ 108 Anlagen für Material-, Bauteil- und Oberflächenprüfungen

- ▶ Europas größter Anbieter von Ringversuchen in der Kunststofftechnik
- ▶ In Europa einzigartiges Applikationszentrum für Oberflächen- und Dekorverfahren
- ▶ In Europa einziges „Gold gelabeltes“ Kunststoff-Institut im Rahmen der Clusterexcellence

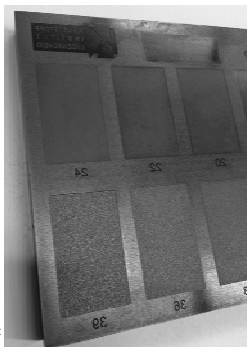
- ▶ In Zukunft **das** Ausbildungszentrum für Kunststofftechnik in Europa

Schnelle, kompetente Lösungen für die Kunststoffindustrie

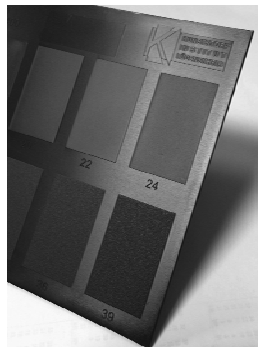


Verfahren zur Strukturierung von Werkzeugoberflächen

- Erodieren
 - Erodierstrukturen nach VDI 3400



Werkzeugeinsatz
Stahl



Musterplatte
PP

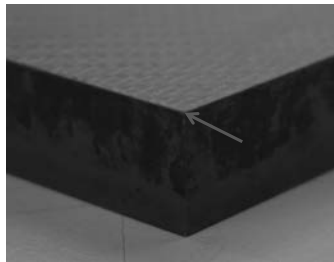
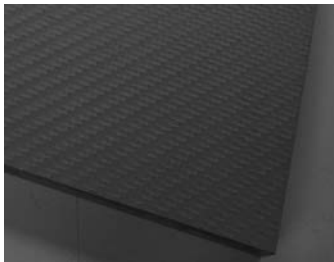
Verfahren zur Strukturierung von Werkzeugoberflächen

- ▶ Direktes Lasern der Gesenkeroberfläche
 - Große Strukturtiefen möglich
- ▶ Ätzen
 - Material wird durch chemische Reaktionen mit Säuren abgetragen
- ▶ Beide Verfahren werden auch in Kombination eingesetzt!



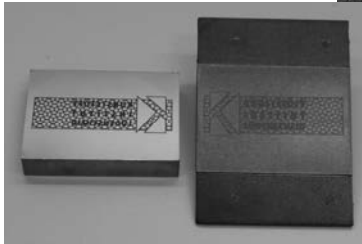
Verfahren zur Strukturierung von Werkzeugoberflächen

- ▶ CeraShibo (Eschmann Textures)
 - Einbringung einer beliebig zu strukturierenden keramischen Folie ins Werkzeug
 - Foliendicke ($>>0,1\text{mm}$) muss in der Konstruktion berücksichtigt werden



Strukturierung mittels Laserlack

► Laserlack



Fakuma 2015

Strukturierung mittels Laserlack Verfahrensablauf

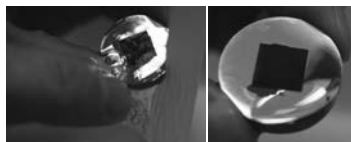
- Lackieren der Werkzeug-
oberfläche
 - Z. B. Sprühlackierung



- Lasern der Bereiche, die im
Werkzeug verbleiben sollen

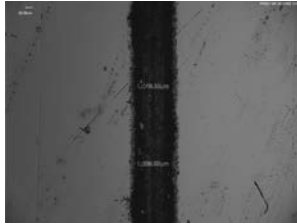


- Auswaschen der nicht gelack-
ten Bereiche mit Wasser

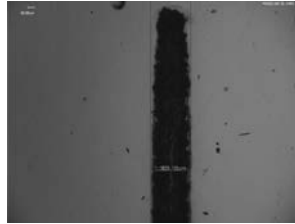


Eigenschaften Laserlack Linienbreiten

► Linienbreiten CO₂-Laser



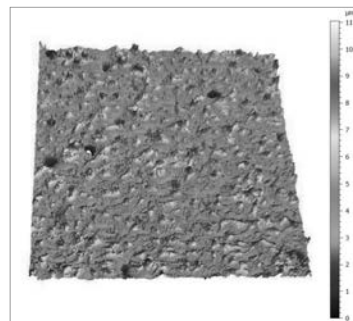
Laserauflösung 1000dpi
 Lasergeschwindigkeit 34%
 Linienbreite 339µm



Laserauflösung 1000dpi
 Lasergeschwindigkeit 68%
 Linienbreite 302µm

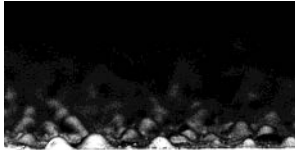
Eigenschaften Laserlack Rauhigkeiten

- CO₂-Laser
- 1000dpi
- Sa=0,855µm
S_z=11,6µm
- Keine ausgeprägte Linien-
struktur des Lasers erkennbar!

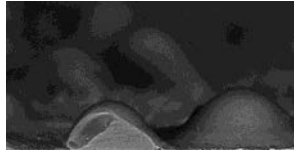


Eigenschaften Laserlack Rauigkeiten

- REM-Aufnahmen der Lackschicht



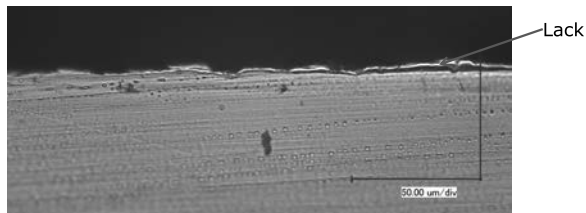
Auflösung 100µm



Auflösung 30µm

Eigenschaften Laserlack Eindringtiefe Laserstrahl in Metallsubstrat

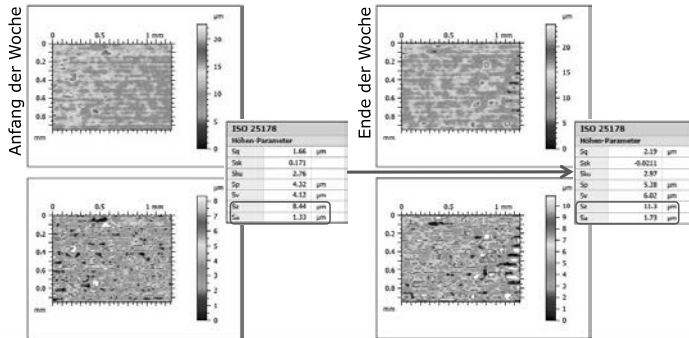
- Prüfronde (nicht gehärtet) geteilt, geschliffen und geätzt
- Analyse der Eindringtiefe des Laserstrahls in den Stahl
 - Nicht erkennbar
 - Weiterer Test erforderlich



Prüfronde ungehärtet, REM-Aufnahme Kunststoff-Institut

Eigenschaften Laserlack Standfestigkeit

- ▶ Keine feststellbaren Abnutzungserscheinungen nach 1 Woche im Technikumsbetrieb!
- ▶ Rauigkeitswerte werden tendenziell größer, was mit dem Herauslösen kleiner Partikel begründet werden kann.



Eigenschaften Laserlack Standfestigkeit

- ▶ Dass die Struktur sehr „fest“ mit der Werkzeugoberfläche verbunden ist, hat sich auch in weiteren Versuchen gezeigt:
 - Trockeneisstrahlen
 - hat zu keiner sichtbaren Veränderung geführt
 - Strahlen mit einem nicht abrasiven Mikro-Kunststoff-Granulat
 - hatte keinen Effekt
 - Mit einem abrasiven Medium konnte die Lackschicht entfernt werden
 - auch die hochglänzende Grundfläche ermattet

Allgemeines zur Strukturierung m. Laserlack Datenaufbereitung

- ▶ 2D-Laserdaten:
 - Vektorbasierte Daten (z. B. dxf)
 - Pixelgrafiken (z. B. bmp)
- ▶ 3D-Laserdaten:
 - Müssen in die 3D-Fläche projiziert werden
 - Datenvolumen im Vergleich zu Daten für das Direktlasern deutlich geringer

Allgemeines zur Strukturierung m. Laserlack Vorteile und Anwendungsmöglichkeiten

Vorteile

- ▶ Kombination mit Hochglanzbereichen sehr gut möglich (guter Kontrast)
- ▶ Sowohl 2D- als auch 3D-Konturen laserbar
 - Für beide Geometrien sollte der Laser möglichst senkrecht zur Oberfläche stehen
 - bei extremen 3D-Geometrien Schwenken des Laserkopfes oder der Werkstückaufnahme erforderlich!
 - leichte Krümmungen auch ohne Schwenken realisierbar (abhängig vom Fokusbereich des Lasers)
- ▶ Lack ist relativ leicht wieder zu entfernen (Schleifen und polieren)
- ▶ Laserlack wird additiv aufgetragen
- ▶ Geometrie bleibt nahezu erhalten

Ausblick

- ▶ Mehrlagigkeit im Hinblick auf überlappende Strukturen:
 - Aussage über Standfestigkeit
 - Sonstige Effekte
- ▶ Verschiedene Lasertypen
- ▶ 3D-Oberflächen
- ▶ Reversibilität

Emissionsoptimierte Kompositmaterialien für die Laufflächen runderneuerter Nutzfahrzeugreifen mit recyceltem Feingranulatanteil – EKORUND

Prof. Dr. **M. Beiner**, Fraunhofer IMWS, Halle (Saale)

Die Verbesserung von Energie- und Ressourceneffizienz von Nutzfahrzeugreifen ist von großer Bedeutung für eine ökonomische und ökologische Abwicklung des Gütertransports auf der Straße. Für LKW-Reifen wurde deshalb ab 1.11.2012 das neue EU-Reifenlabel eingeführt. Dadurch sollen Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Sicherheit des Straßenverkehrs durch kraftstoffsparende, sichere und leise Reifen gefördert werden. Rollwiderstand, Nassrutschverhalten und das externe Rollgeräusch sind dabei die zu optimierenden Parameter. Das EU-Reifenlabel gilt nur für LKW-Neureifen, runderneuerte LKW-Reifen sind ausdrücklich ausgenommen.

In dieser Präsentation werden die Ergebnisse des Gemeinschaftsprojekts EKORUND vorgestellt, dass im Rahmen des BMBF-Programms „KMU-innovativ“ realisiert wurde. Ziel des Projekts war die Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz von runderneuten Nutzfahrzeugreifen. Diese tragen generell bereits dem Gedanken der Ressourceneffizienz Rechnung. Bei der Runderneuerung werden Altreifen überarbeitet und mit neuen Laufflächen versehen. Die so erzielte Ressourceneffizienz kann darüber hinaus weiter deutlich erhöht werden, wenn Gummimehl aus Reifenrecyclingmaterial in die Kautschukmischungen neuer Laufflächen eingearbeitet wird.

Konkrete Zielsetzung des Vorhabens EKORUND war es, Energie- und Ressourceneffizienz zu kombinieren, d.h. emissionsoptimierte Kautschukmischungen für Reifenlaufflächen mit einem recyceltem Feingranulatanteil von mindestens 20 m% zu erforschen und zu entwickeln. Dabei wurden aus gut definierten Recyclingmaterialien hergestellte Gummimehle eingemischt und gezielt zur Optimierung des Rollwiderstands benutzt, ohne dass sich Nassgriff und Lebensdauer der runderneuten Reifen signifikant verschlechtern. Der erreichte Stand wird basierend auf Indikatoren aus Laboruntersuchungen, Ergebnissen von Prüfstandtests an runderneuten Nutzfahrzeugreifen und Daten aus umfangreichen Fahrttests auf der Straße und im Gelände diskutiert. Im Rahmen des Projekts wurden recyclathaltige Composite für die Laufflächen von verschiedenen Arten von runderneuten LKW-Reifen (Antrieb, Trailer) und Earth Mover (EM)-Reifen optimiert. Es wird gezeigt, dass durch deren Einsatz Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz in diesem wichtigen Segment des Straßenverkehrs deutlich verbessert werden können.

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF (KMU-innovativ 033RK008 A-G).

ISBN 978-3-18-23**4342**-4