

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 2017

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

Printed in Germany

ISBN 978-3-18-234347-9

## Vorwort

Technische Kunststoffe, faserverstärkte Verbundwerkstoffe sowie multifunktionale Kunststoff-Verbunde unterstützen heute nachhaltig den modernen Automobilbau.

Multifunktionswerkzeuge und automatisierte Verarbeitungsprozesse ermöglichen in vielen Fällen besonders wirtschaftliche Systemlösungen. Die additive Fertigung in Verbindung mit Kunststoffen hat bereits heute ein großes Potenzial, vor allem bei Kleinserien individuelle, maßgeschneiderte Bauteilkonzepte realisieren zu können.

Bei Fahrzeug-Neuentwicklungen stehen heute der Leichtbau, die designtechnische Anmutung des Interieurs, sowie die aktive und passive Sicherheit besonders im Vordergrund.

Innovationen in der Kunststofftechnik beeinflussen direkt die fahrzeugtechnischen Konzepte von morgen. Mischbau mit Kunststoff-Verbunden, Naturfaser-Anwendungen, über-gossene und folienhinterspritzte Formteile, LED- und OLED-basierte Lichttechniken, sowie optisch und haptisch optimierte Anzeige- und Bedienkonzepte 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 29. und 30. März 2017 nach Mannheim ein zum internationalen kunststofftechnischen Jahreskongress „Kunststoffe im Automobilbau 2017“. Übersichtsvorträge zu Ressourceneffizienz sowie aus Markt und Forschung, technische Berichte über Kunststoffinnovationen aus dem Pkw- und Nutzfahrzeugbereich, 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

### **Zukunft 2050 – Technologietrends in der Ära der Nachhaltigkeit und der smarten Maschinen**

*Dr. U. Eberl, SciPress Redaktionsbüro für Wirtschaft, Wissenschaft, Technik, Höhenkirchen bei München*

1

## Interieur

### **Instrumententafel Nähkleid-Kaschierung – Vom diskontinuierlichen zum kontinuierlichen Prozess**

*R. Kurz, S. Hobelsberger, H. Auer, BMW AG, Landshut*

13

### **Methodische Weiterentwicklung der Gewichtsreduzierung von Verkleidungsteilen im Fahrzeuginnenraum – Gegenwärtige und zukünftige Möglichkeiten aus Sicht eines Fahrzeugherstellers**

*M. Steinbach, J. Maier, Adam Opel AG, Rüsselsheim*

21

### **New vinyl ink and robotized digital printing process for the fine decoration of an instrument panel made by PVC slush molding**

*Dr. N. Amouroux, M. El Fouzari, IVY Group, Reims, France*

35

### **Neue Oberflächen und Anforderungen an die Anwendung von bestehenden Testmethoden**

*Dipl.-Ing. J. Guenther, Dipl.-Ing. D. Malecha, J. Reinicke, B.Eng., Kunststoff-Institut Lüdenscheid, Lüdenscheid*

45

## Exterieur

### **Der Unterboden – Ein unterschätzter Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung**

*O. Mende, Volkswagen AG, Wolfsburg*

59

### **Stoßfänger in Dünwandtechnologie – ein Update zu Werkstoffen, Verfahren und Technologie-Innovationen**

*Dipl.-Ing. J. Götzelmann, Magna Exteriors, Sailauf;*

*Dipl.-Ing. P. Diehl, Magna Exteriors, Esslingen*

77

### **Entwicklung eines Tankdeckel-Scharnierarms mit Recycling-Material**

*M. Thurmeier, M.Eng., C. Horbas, Dipl.-Ing. (FH) F. Wagner, AUDI AG, Ingolstadt*

93

**Leichte Masse mit Klasse – Heckschürze aus Polyurethan mit äußerst geringer Dichte**

*Dipl.-Ing. (FH) C. Bauernfeind, Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG, Weissach;  
Dipl.-Ing. E. Blees, Polytec Group (Polytec Car Styling), Hörsching, Österreich*

95

**Active aerodynamic advancements in vehicle underbodies**

*A. Povinelli, M. Matthews, Magna Exteriors, Troy, Michigan, USA;  
Dr. J. J. Laux, Magna Management, Cham, Switzerland;  
J. Goetzelmann, Magna Exteriors, Sailauf*

105

**Improved crash simulation of endless-fiber-reinforced thermoplastics – organic sheets**

*Dipl.-Ing. M. Franzen, Ford Werke GmbH, Research & Innovation Center Aachen, Aachen; Dipl.-Ing. G. Oberhofer, MATFEM Partnerschaft Dr. Gese & Oberhofer, München; Dipl.-Ing. R. Schwarzer, Kirchhoff Automotive Deutschland GmbH, Attendorn*

113

**Verfahren**

**Innovativer Verarbeitungsprozess thermoplastischer Composites für Porsche Panamera Bremspedal – Endlosfasertechnologie für Sicherheitsbauteile im Fahrzeug**

*Dipl.-Ing. D. Häffelin, BOGE Rubber & Plastics, Damme*

125

**Energieeffiziente Herstellung von Thermoplast-CFK Bauteilen im einstufigen Direktverfahren**

*Dr.-Ing. J. Reddemann, Dr.-Ing. H. Seifert, AUDI AG, Ingolstadt*

139

**3-D Direktablage von Verstärkungsfasern im Faserblasverfahren – Stand der Technik bei der Naturfaserverarbeitung**

*R. Korn, M.Sc., BMW AG (via AlphaKraft GmbH), München;  
Dr.-Ing. T. Reußmann, TITK e.V., Rudolstadt*

149

**Grüner wird's nicht! Nachhaltig, ökonomisch, sicher: Technische Rezyklate für die Automobilindustrie**

*Dipl.-Ing. Ansgar Hoffmann, Technische Kunststoffe, Hoffmann + Voss GmbH, Viersen*

159

**Tinuvin® 880 – novel light stabilizer for automotive interiorapplications**

*Dipl.-Ing. G. Huber, BASF, Basel, Switzerland*

163

**Characterization of microcellular plastics for weight reduction in automotive interior parts**

*Dr. J. Gómez-Monterde, SEAT SA, Martorell, Spain;  
Dipl.-Ing. J. Hain, Volkswagen AG, Wolfsburg;  
Prof. Dr. M. Ll. MasPOCH, Centre Català del Plàstic / Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, Terrassa, Barcelona, Spain*

167

## **Simulation**

### **A demonstrator for the experimental assessment of the through-process modeling of injection-molded parts made of short-fiber-reinforced polymers**

*E. Spini, RadiciGroup Performance Plastics, Chignolo d'Isola (Bergamo), Italy;  
A. Bernasconi, Politecnico di Milano, Milan, Italy*

181

### **Surface quality: improving the quality perception of molded parts**

*PhD candidate P. Gamonal-Repiso, Dr. J.M. del-Mazo, SEAT S.A, Martorell, Spain;  
Prof. Dr. M. Sánchez-Soto, Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech,  
Terrassa/Barcelona, Spain*

193

## **Technologie**

### **Leichtbau bei Volkswagen – Über die duroplastische Pultrusion zur großserienfähigen Herstellung faserverstärkter Kunststoffe für einen Lastpfad in der Türstruktur**

*Dr.-Ing. P. Hörmann, Dipl.-Ing. (FH) K. Bornemann, Dr.-Ing. F. Flueggen,  
Dipl.-Ing. H. Herten, Dr.-Ing. V. Hohm, Dr.-Ing. T. Ströhlein,  
Volkswagen AG, Wolfsburg*

205

### **Hohlprofile, Organobleche und LFT-Knoten – Hybridbauteile aus Faserkunststoffverbunden für die automobilen Serienproduktion**

*Dipl.-Ing. A. Liebsch, Dr.-Ing. R. Kupfer, Prof. Dr.-Ing. habil. M. Gude,  
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Technische Universität Dresden;  
P. Müller, M.Sc., Dr.-Ing. N. Andricevic, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach*

215

### **Use Case FVK im Materials Data Space, Digitalisierung der Materialkompetenz als Komplementär zur Industrie 4.0**

*Dr.-Ing. R. Schlimper, Dr.-Ing. M. Zscheyge, Prof. Dr.-Ing. P. Michel,  
Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS,  
Halle (Saale)*

227

### **Two-component air-guide panel manufactured by co-molding and foaming using core-back technology**

*Dr.-Ing. A. Roch, A. Menrath, Fraunhofer Institute for Chemical Technology ICT,  
Pfinztal; B. Schmid, BBP Kunststoffwerk Marbach Baier GmbH,  
Marbach am Neckar*

229

## **Werkstoffe & Verfahren**

- High-Performance Polypropylene – hat PA 6 noch eine Zukunft?**  
*H. Häberle, MAN Truck & Bus AG, München* 231

- Elektrochemische Korrosion und Ihre Vermeidung mit Polyamiden**  
*Dipl.-Ing. G. Prautzsch, Dipl.-Ing. T. Stier,*  
*Dipl.-Ing. T. Coeln, AKRO PLASTIC GmbH Niederzissen* 241

## **Plenum**

- Einsatz von Organoblechen im Fahrzeugunterflur – Kosten- und gewichts-optimiertes Gelände-robustheitspaket**  
*Dipl.-Ing. (FH) R. Apfelbeck, S. Müller, B.Eng. (BA), AUDI AG, Neckarsulm* 259

- Innenraumkonzepte – Zukunftsrelevante Designentwicklungen von Fahrzeug-Interiors**  
*J. Friedrich, Car Men GmbH, Idstein* 271

## **3. VDI-Fachkonferenz**

### **Kunststoffe in Nutzfahrzeugen**

#### **Leichtbau**

- Lightweight design for increased payload: new ways using polymer composites and physical foaming**  
*L. Jerpdal, M.Sc. M.E., Dipl.-Ing J. Hain, Dr.-Ing. Dipl.-phys. O. Täger,*  
*Volkswagen Konzernforschung, Wolfsburg* 273

- Carbon-Leichtbau: Leichter und günstiger als Stahl – Gesamtheitliche Betrachtung von Leichtbaupotential & Prozesskosten von CFK**  
*Dipl. Wiss.-Ing. G. Kalkoffen, CarbonTT, Stade* 275

- Entwicklung eines CFK-TP E-Getriebegehäuses**  
*Dipl.-Ing. (FH) M. Kreutzmann, Dr. T. Schneider,*  
*Dipl.-Ing. R. Rademacher, P+Z Engineering GmbH, München* 277

## **Kostensenkung**

### **The use of an alternative material for engine encapsulation for Trucks**

*T. van den Einden, DAF Trucks, Eindhoven, The Netherlands;*

*Dipl.-Ing. K. Menke, Johann Borgers GmbH & Co., Bocholt*

287

### **A new analytical calculation method for the injectionmolding process of a composite luggage rack holder**

*M. Bakkal, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey;*

*O. Otuz, M.Sc., S. Doğru, M.Sc., Istanbul, Turkey*

295

### **True confidence in thermoplastic composite simulations for any automotive component**

*W. Schijve, G. Francato, R. Yaldiz, SABIC, Geleen, The Netherlands*

315

### **Kosteneffizienz durch Einsatz von UV-stabilen Kunststoffen in dynamisch und statisch höchstbelasteten Bauteilen**

*Dipl.-Ing. (FH) C. Bauer, Dipl.-Ing. (FH) H. Häberle, MAN Truck & Bus AG, München*

329

### **Leichtbauträgersystem für den Luftfilter des Mercedes-Benz Actros**

*Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) H. Hauke, BBP Kunststoffwerk Marbach Baier GmbH,*

*Marbach am Neckar; Dipl.-Ing., Dipl.-Wirt.-Ing. J. Horstmann,*

*LanxessDeutschland GmbH*

345

## **Zukünftige Kunststoffanwendungen**

### **Innovative Kunststoffanwendungen für ein kleines Stadtbuskonzept**

*G. Kopp, O. Deißer, DLR Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart;*

*A. Müller, S. Beyer, Hochschule Esslingen*

365

### **Innovativer Leichtbau für leichte Nutzfahrzeuge am Beispiel der GFK-Blattzugfeder**

*Dr.-Ing. J. Stimpfl, Dr.-Ing. J. Asbeck, Mubea Fahrwerksfedern GmbH, Attendorf*

375

## **Verfahrenstechnik**

### **Industriegetriebene Initiative zur Standardisierung endlosfaserverstärkter Thermoplaste für den Einsatz in der Automobilindustrie**

*Dr.-Ing. S. Schmeer, Dr.-Ing. D. Scheliga, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern*

383

**Goldsponsor:**



**Bronzesponsor:**



# **Zukunft 2050 – Technologietrends in der Ära der Nachhaltigkeit und der smarten Maschinen**

**Dr. U. Eberl**, SciPress Redaktionsbüro für Wirtschaft, Wissenschaft, Technik, Höhenkirchen bei München

## **Kurzfassung**

Wir stehen vor einer Zeitenwende. Das Klima unseres Planeten ist bedroht, Rohstoffe werden knapp. Das Jahrhundert des Öls geht zu Ende, die Energieversorgung der Welt muss auf eine neue, nachhaltige Grundlage gestellt werden. 2050 werden fast so viele Menschen in Städten leben wie heute auf der ganzen Erde – und es wird erstmals mehr Senioren geben als Kinder und Jugendliche. Zugleich beginnt die Ära der smarten Maschinen mit immer leistungsfähigeren Technologien der künstlichen Intelligenz. Das Smartphone war nur der Anfang: Smart Car, Smart Grid, Smart Factory, Smart Health und Smart Home prägen alle Lebensbereiche der Zukunft. Es geht um umweltfreundliche Energiesysteme, nachhaltige Mobilität, eine energiesparende Industrie mit flexibler Fertigung und intelligente Hilfen für eine immer älter werdende Bevölkerung.

## **1. Die Megatrends der kommenden Jahrzehnte**

Wer sich seriös mit der Zukunft bis zum Jahr 2050 beschäftigt, darf sich nicht von kurzfristigen Hypes oder Moden beirren lassen. Viel wichtiger sind die weltweit gültigen, langfristigen Megatrends: Dazu gehören die demografische Entwicklung, die Verstädterung, die Globalisierung, der Ressourcen- und Energieverbrauch und die Durchdringung aller Lebensbereiche mit Informations- und Kommunikationstechnik [1].

So wird bis 2050 die Menschheit um ein Drittel auf etwa 9,5 Milliarden Menschen anwachsen, und es wird weltweit mehr Senioren geben als Kinder und Jugendliche. Die Zahl der Menschen im Alter über 65 wird sich von heute 500 Millionen auf dann 1,5 Milliarden verdreifachen. In Deutschland wird bereits jeder Dritte über 65 sein, jeder Achte über 80, und die Zahl der Über-100-Jährigen wird sich gegenüber heute verzehnfachen. Die Welt ist dabei, zu einer Seniorengesellschaft zu werden – eine Jahrhundertaufgabe für viele Volkswirtschaften! So kommen auf die Rentenkassen enorme Belastungen zu und auf die Gesundheitssysteme

ebenso: Wir brauchen mehr Vorsorge und Früherkennung von Krankheiten, effizientere Abläufe im Gesundheitswesen, Computer als Assistenzärzte, die Unterstützung von Robotern bei minimal-invasiven Operationen, aber ebenso auch im Smart Home, dem intelligenten Zuhause, und nicht zuletzt auf den Straßen: Auch 90- oder 100-Jährige wären gerne noch mobil, aber sie werden kaum mehr selbst fahren – das autonome, vernetzte Fahrzeug, das Smart Car, wird hier die Lösung der Wahl sein.

Zugleich werden 2050 fast so viele Menschen in Städten leben wie heute auf der ganzen Erde: In den Entwicklungs- und Schwellenländern werden drei Milliarden Stadtbewohner hinzukommen, viele Megacities von heute werden ihre Einwohnerzahlen noch einmal verdoppeln, mit enormen Folgen für alle Lebensbereiche – von der Mobilität über die Gebäudetechnik bis zur Energie- und Gesundheitsversorgung. Vor allem in Asien entstehen gigantische Ballungsräume, in denen Städte mit dann 40 bis 60 Millionen Bewohnern zusammenwachsen. China wird die USA als größte Volkswirtschaft überrunden, und auch in anderen Boom-Nationen wie Brasilien, Indien, Mexiko, Südafrika oder auch Vietnam wird der Wohlstand weiter zunehmen. Die Zahl der Menschen, die dem Mittelstand zugerechnet werden, wird allein in solchen Ländern in den nächsten zehn bis 20 Jahren um über eine Milliarde Menschen wachsen – und damit die Nachfrage nach Industrieprodukten aller Art ebenso wie nach Rohstoffen und Energie.

Der Transportbedarf – nicht zuletzt auch durch Internet-Versandhändler –, die Globalisierung und die hohe Bedeutung der persönlichen Mobilität lassen sowohl den Güterverkehr wie die Nachfrage nach individuellen Mobilitätslösungen weiter enorm zunehmen. Nur ein Vergleich: In China besitzt heute jeder Zehnte ein Auto, in Deutschland jeder Zweite. Doch schon heute werden Chinas Städte von Staus und Emissionen geplagt – aufgrund der extremen Feinstaubwerte hat die chinesische Akademie für Sozialwissenschaften Peking sogar als „ungeeignet für menschliches Leben“ erklärt. Wo würde dies hinführen, wenn die Chinesen ebenso mobil sein wollten wie die Deutschen? Und in Indien, Brasilien, Russland, Mexiko, Indonesien sieht es nicht besser aus.

Die Lösungen müssen in einer Kombination vieler Innovationen liegen: Elektro-Fahrzeuge mit Strom aus erneuerbaren Energien, klug verteilte Logistikzentren in den Städten und an deren Rändern, mehr Güterverkehr auf der Schiene und – in manchen Fällen wie etwa beim Medikamententransport – auch über Drohnen durch die Luft. Für die individuelle Mobilität ist „Mobility on demand“ das Stichwort: Hier geht es künftig mehr darum, Mobilitätspakete zu

nutzen statt die Fahrzeuge zu besitzen. Das Ziel ist die Vernetzung aller Verkehrsträger: ob Busse und Bahnen oder Mietfahrräder und Miet-Elektroautos. Über Smartphone und Internet erhält der Nutzer stets die aktuellsten Informationen über die Verkehrssituation und weiß, mit welchen Verkehrsmitteln er am besten, schnellsten und kostengünstigsten von A nach B kommt.

Hinzu kommen städtebauliche Lösungen – etwa die „Stadtviertel der kurzen Wege“ – und dank Breitbandverbindungen mehr Telearbeit: Viele Dienstleistungen, vom Produktdesign bis zur ärztlichen Diagnose anhand von Labordaten oder Computerbildern, lassen sich künftig von zu Hause aus genauso gut erledigen wie im Büro. Selbst wenn schnelle Reparaturen notwendig sind, muss man nicht immer Bauteile auf den Weg schicken: In Zukunft wird man viele Bauteile über 3D-Drucker auch vor Ort fertigen können – dies funktioniert inzwischen nicht nur mit Kunststoffen, sondern sogar mit Gasturbinenstahl.

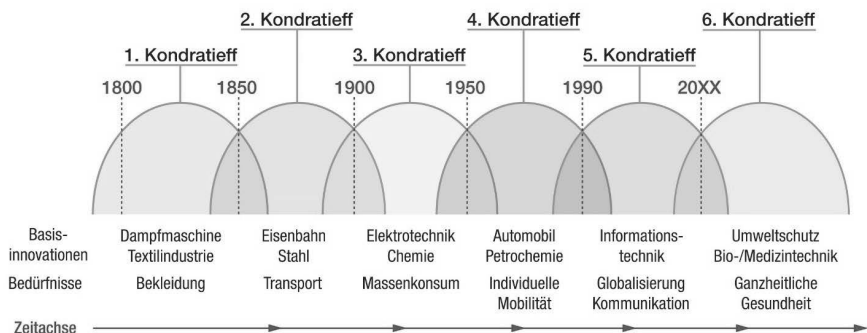


Bild 1: Innovationswellen prägen die Welt. Aus dem fünften Kondratieff-Zyklus, dem heutigen Informationszeitalter, startet der sechste Zyklus, der von Umwelt- und Gesundheitsthemen bestimmt sein wird (Quelle: [1]).

## 2. Gesundheit der Umwelt und Gesundheit des Menschen

Vor allem drei technologische Themen sind es, die unsere Zukunft in den nächsten Jahrzehnten in besonderer Weise prägen werden. Zwei von ihnen lassen sich unter dem Schlagwort „ganzheitliche Gesundheit“ zusammenfassen: die Gesundheit unserer Umwelt

und die Gesundheit des Menschen vor dem Hintergrund des demografischen Wandels. Dieses Konzept der ganzheitlichen Gesundheit wird auch als der sechste Kondratieff-Zyklus bezeichnet, der sich nach den Prognosen von Zukunftsforschern aus dem fünften Zyklus, dem heutigen Informations- und Kommunikationszeitalter, entwickeln wird. Diese Zyklen sind nach dem russischen Wissenschaftler Nikolai Kondratieff benannt, der das anschauliche – wenn auch stark vereinfachte – Konstrukt in den 1920er-Jahren formuliert hatte. Danach laufen wirtschaftliche Entwicklungen in langen Wellen von 40 bis 60 Jahren Dauer ab, beginnend bei Basisinnovationen über den daraus entstehenden Wohlstandszuwachs, bis sie schließlich stagnieren und von der nächsten Welle abgelöst werden.

Welche Treiber stecken hinter dem kommenden Trend der „Gesundheit des Menschen“? Wenn man weiß, dass heute rund 40 Prozent der Kosten des Gesundheitswesens auf Senioren älter als 65 Jahre entfallen und zugleich diese Zahl sich weltweit verdreifachen wird, ergibt sich daraus zwingend, dass die Gesundheitssysteme der Zukunft nur bezahlbar bleiben können, wenn sie zugleich leistungsfähiger und kostengünstiger werden. Dieser Druck wird eine Vielzahl von Innovationen hervorrufen – von Biomarkern für die Früherkennung von Krebs, Herz-Kreislauferkrankungen und Alzheimer bis zur Telemedizin oder Sensoren für die Überwachung der Gesundheit, ob zu Hause oder unterwegs. Und nicht zuletzt werden auch vielfältige Roboter- und Computer-Hilfen für Senioren im Smart Home und dem Smart Car entwickelt werden.

Der Boom der Umwelttechnologien – die „Gesundheit der Umwelt“ – hat gleich mehrere Treiber: zum einen die Bemühungen, den Klimawandel in erträglichem Rahmen zu halten, und zum anderen die immer knapper werdenden Ressourcen. Wenn die Erdbevölkerung und in vielen Ländern auch der Wohlstand wächst, steigt die Nachfrage nach technischen Produkten und damit auch nach Rohstoffen. Dies fördert energie- und rohstoffeffiziente Produkte und Fertigungsprozesse, Recycling und Kreislaufwirtschaft. „Cradle to Cradle“ und „Design to Recycle“ sind hier wichtige Schlagworte – das heißt, Produkte schon beim ersten Entwurf so zu konstruieren, dass sie umweltfreundlich und modular aufgebaut sind, so dass sich ihre Einzelteile ohne Qualitätsverlust wiederverwenden lassen, oder dass ihre Abfallstoffe für neue Produkte eingesetzt werden können.

Inzwischen gibt es zahlreiche Beispiele für biologisch abbaubare Kunststoffe, hauptsächlich bei Verpackungen aller Art, aber auch bei Farben, kompostierbaren Sitzbezügen oder Klebstoffen, die sich von Bakterien zersetzen lassen und dadurch die Einzelteile leichter wieder-

verwendbar machen. Auch klimaneutrale Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen werden künftig an Bedeutung gewinnen, vom Biokraftstoff aus Pflanzenabfällen bis zum Biokunststoff. So wurden etwa in Pilotprojekten Alternativen für den Standardkunststoff ABS entwickelt, die nicht auf fossilen Rohstoffen wie Erdgas oder Erdöl basieren, sondern auf PHB (Polyhydroxybutyrat), das sich aus nachwachsenden Rohstoffen wie Palmöl oder Stärke herstellen lässt. Das spröde PHB wird wiederum durch Zugabe von Polypropylencarbonat weicher gemacht, in das zu einem großen Teil Kohlendioxid aus Kraftwerksabgasen integriert werden kann. Insgesamt besteht die neue Mischung zu über 70 Prozent aus nachhaltigen Kunststoffen [2].

Kohlendioxid aus Kraftwerksabgasen lässt sich auch noch anderweitig sinnvoll nutzen. Beispielsweise haben Forscher bereits gezeigt, dass es sich mit Hilfe geeigneter Katalysatoren, Wasser und elektrischem Strom – etwa dem überschüssigen Strom aus erneuerbaren Quellen – zu einem hohen Prozentsatz in Kohlenmonoxid oder Ethen umsetzen lässt. Auch andere Kohlenwasserstoffe oder Alkohole wie Methanol lassen sich so erzeugen. Solche Verbindungen können dann als Treibstoffe für Fahrzeuge ebenso eingesetzt werden wie als Ausgangsmaterialien für die Chemieindustrie. In fernerer Zukunft sind sogar Module denkbar, mit denen man etwa Hausfassaden verkleidet und die dann Kohlendioxid aus der Luft einfangen und in wertvolle chemische Stoffe umwandeln. Heute lohnt sich das noch nicht, aber wenn das Einbringen von Kohlendioxid in die Atmosphäre als Klimaschädigung ein deutliches „Preisschild“ bekommt, mag sich das durchaus ändern.

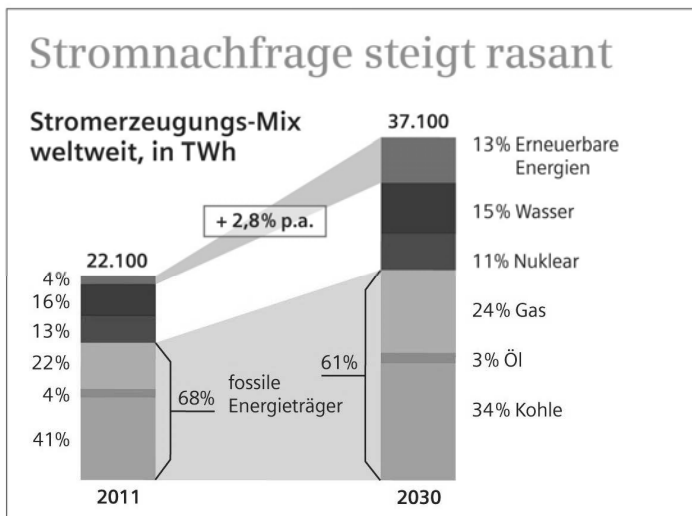
Welche Lösungen auch immer gefunden werden: Letzten Endes muss Nachhaltigkeit in den nächsten Jahrzehnten zum Leitmotiv menschlichen Handelns werden, denn bei „business as usual“ würde sich der Rohstoff- und Energieverbrauch der Welt bis 2050 mindestens verdoppeln. Doch schon heute ist unser ökologischer Fußabdruck zu groß: Wir nutzen die Ressourcen der Erde etwa um 50 Prozent schneller, als sie sich regenerieren können – bei einer Verdoppelung des Ressourcenverbrauchs bräuchten wir bis 2050 daher drei Erden statt der einen, die wir haben.

Die entscheidende Frage lautet daher: Ist Wirtschaftswachstum mit weniger Ressourcenverbrauch möglich und lässt sich der Klimawandel noch bremsen? Die Antwort auf beide Fragen ist ein klares Ja – doch sie erfordert nicht nur ein Umdenken in den Köpfen, sondern einen Paradigmenwechsel in der weltweiten Energieversorgung und in den Wirtschaftssystemen. Das ist wie beim demographischen Wandel eine Jahrhundertaufgabe, aber sie ist

lösbar: Es geht um den Abschied vom Kohlenstoff-Zeitalter, um erneuerbare Energien, um Energieeffizienz, intelligente Stromnetze, Recycling von Rohstoffen, Ökoeffektivität und Kreislaufwirtschaft.

### 3. Ein neues Stromzeitalter

Elektrischer Strom aus erneuerbaren Quellen wie Wind, Sonne, Wasser, Biomasse und Erdwärme kann viele Probleme lösen. Er kann extrem umweltfreundlich erzeugt, hoch effizient auch über weite Strecken übertragen und mit nur geringen Verlusten in nutzbare Energie umgesetzt werden. So sind Elektromotoren drei- bis viermal effizienter als Verbrennungsmotoren und neue LED-Lampen rund fünf- bis achtmal effizienter als die alten Glühlampen. Hier sind also noch enorme Effizienzpotenziale zu heben, ebenso wie in der Gebäudetechnik und der Industrie, wo sich mit optimierten Antriebslösungen der Stromverbrauch um 60 Prozent senken lässt.



Quelle: Siemens-Studie

**Bild 2:** Die Stromnachfrage steigt dreimal schneller als die Weltbevölkerung. So soll sich bis 2030 der Strombedarf aus Informations- und Kommunikationstechnik auf 1.700 TWh pro Jahr fast verdoppeln, und der Anteil der Industrie am Stromverbrauch wird aufgrund Digitalisierung und elektrischer Antriebe von 33 auf 40 Prozent ansteigen.

Der Trend ist eindeutig: Wir sind auf dem Weg in ein neues Stromzeitalter, denn trotz aller Effizienzgewinne steigt heute der weltweite Stromverbrauch dreimal stärker als die Weltbevölkerung, getrieben vor allem durch die Informations- und Kommunikationstechnik und die Digitalisierung in der Industrie. Doch dies ist eine gute Nachricht, weil sich dadurch ein Wirtschaftswachstum mit geringen Umweltbelastungen erreichen lässt – vorausgesetzt, in Zukunft kommt ein stetig wachsender Teil des elektrischen Stroms aus erneuerbaren Energien.

Auch beim Verkehr erleben wir eine Abkehr vom Ölzeitalter. Der Anteil an Hybrid- und Elektrofahrzeugen wird in den nächsten Jahrzehnten massiv wachsen – bis im Jahr 2050 die meisten Stadtfahrzeuge elektrisch fahren werden. Mehr noch: Sie werden dann ein integraler Bestandteil des Stromnetzes sein, da sie nicht nur Strom laden und speichern, sondern ihn auch wieder abgeben können – ans Netz oder für den Eigenverbrauch zu Hause. Sie können ihn beispielsweise nachts tanken, wenn etwa viel Wind weht, aber wenig Strom gebraucht wird, und sie können ihn mittags oder abends wieder abgeben, wenn die Nachfrage und damit die Strompreise steigen. Schnell-Ladesysteme und induktives, also kabelloses Laden, werden ebenfalls zum Alltag gehören. Und viele dieser Fahrzeuge werden die elektrischen Antriebsmotoren direkt in den Rädern haben. Jedes Rad ist dann einzeln ansteuerbar: So ein Fahrzeug kann quer einparken oder auch auf der Stelle drehen. Außerdem braucht man keine Achsen und keine Getriebe mehr – die Designer bekommen ungeahnt neue Gestaltungsmöglichkeiten für die Fahrzeug-Innenräume, was ganz neue Komforterlebnisse ermöglicht, ideal nicht zuletzt für die Senioren von morgen.

#### **4. Smarte Maschinen – tausendfach leistungsfähiger als heute**

Der dritte große Trend der nächsten Jahrzehnte, neben der Gesundheit der Umwelt und der Gesundheit des Menschen, ist bereits seit den 1990er-Jahren als fünfter Kondratieff-Zyklus massiv im Gange: die Digitalisierung, die Durchdringung aller Lebensbereiche mit Informations- und Kommunikationstechnik. So können wir in den nächsten 20 bis 30 Jahren noch einmal mit einer Vertausendfachung der Rechenleistung, der Speicherfähigkeit und der Datenübertragungsraten von Mikrochips rechnen. Mitte der 1990er-Jahre schaffte der leistungsfähigste Supercomputer der Welt etwa 100 Milliarden Rechenoperationen pro Sekunde; das erreicht heute ein gutes Smartphone, und eine solche Leistungssteigerung können wir bis 2040 noch einmal erwarten. Wir tragen dann die Supercomputer von heute in unseren Taschen, zum Preis eines Smartphones. Oder anders ausgedrückt: Was heute ein Notebook für 500 Euro leistet, kann dann ein kleiner Chip für 50 Cent.

In Zukunft werden daher winzige Sensor- und Kommunikationselemente in allen Dingen stecken, Häuser werden ebenso Sinnesorgane bekommen wie Autos, die zu fahrenden Robotern werden, die selbstständig ihren Weg finden und mit anderen Fahrzeugen kommunizieren. Elektrisch, autonom und vernetzt sind die großen Trends der Autoindustrie. Die Smart Cars von morgen tasten mit vielfältigen Sinnesorganen die Umgebung ab, treten mit anderen Fahrzeugen und der Infrastruktur in Kontakt, um Staus und Unfälle zu vermeiden, und sie gehen mit ihrer Energie so sparsam und umweltfreundlich wie möglich um. Sie wissen stets über die aktuelle Verkehrslage Bescheid und kennen den Terminkalender ihres Besitzers und seine Vorlieben – ob in Bezug auf Radiosender, soziale Netzwerke, Sehenswürdigkeiten oder Lieblingsrestaurants.



Bild 3: Elektrisch, autonom und vernetzt – die Smart Cars von morgen sind selbstständige Roboter auf Rädern (Quelle: [2]).

Smarten Maschinen werden wir künftig überall begegnen [3]. Darunter verstehe ich alle Maschinen, von Smartphone bis zum autonomen Fahrzeug, die eine gewisse Intelligenz aufweisen. Das heißt zum Beispiel, dass sie sprechen und zuhören, Gestik und Mimik verstehen, Texte, Bilder und Videos interpretieren und lernfähig sind: durch Beobachten, durch

Nachahmen, durch Belohnungen. In wenigen Jahren werden wir auf den Autobahnen unsere Fahrzeug auf Autopilot schalten können, bis etwa 2030 auch auf Landstraßen und in den Städten. Auch selbsttätig fahrende Lkw – und solche, die durch eine elektronische Deichsel miteinander verbunden sind – werden zum Alltag gehören, ebenso wie autonom fahrende Elektrotaxis. Auf den Bürgersteigen werden automatische Einkaufswagen Bestellungen ausliefern. In der Luft bringen Drohnen eilige Pakete, mit unseren Smartphones werden wir echte Gespräche führen und in den Küchen bereiten Maschinen das Essen zu.

Mit „Deep Learning“-Systemen, die auf Basis von Neuronalen Netzen der Funktionsweise des Gehirns nachempfunden sind, haben Forscher in den letzten Jahren bereits große Erfolge erzielt, insbesondere beim Erkennen von Bildinhalten und dem Verstehen von Sprache. Bei autonomen Fahrzeugen sind sogar schon Szenenanalysen möglich: Das bedeutet, dass das Auto nicht nur Objekte wie Gebäude, Bäume, Pfosten, Verkehrszeichen oder Fahrradfahrer erkennt, sondern auch Situationen einschätzen kann – also beispielsweise anhand von Kopfbewegung und Körperhaltung eines Menschen am Straßenrand eine Wahrscheinlichkeitsaussage treffen kann, ob diese Person die Fahrbahn überqueren will oder nicht. Gelernt hat dies der Computer anhand von Tausenden von Videobildern mit entsprechenden Verkehrssituationen. Andere smarte Maschinen, wie etwa das Computersystem Watson von IBM, können sogar zu bestimmten Wissensgebieten mit Fragen in Alltagssprache gefüttert werden. Watson unterstützt bereits Ärzte bei Krebs-diagnosen, Pharmafirmen bei der Entwicklung von Medikamenten, Bankberater bei Anlagestrategien oder Autofirmen bei der Analyse von Werkstattberichten.

Intelligente Netze, die Smart Grids, werden künftig Angebot und Nachfrage von Millionen von Energieerzeugungsanlagen und Verbrauchern in Balance bringen und die Strom-, Wärme- und Gasnetze kombinieren. Halbautonome Gebäude, mit Solarzellen auf dem Dach und Speicherbatterien im Keller, tun sich zu virtuellen Kraftwerken zusammen und betreiben an virtuellen Börsen gemeinsam Energiehandel. Im größeren Umfeld, den Smart Cities, messen Sensoren aller Art Energie- und Wasserverbrauch sowie Verkehrsdaten und Emissionswerte – ein City Cockpit fasst dann diese Informationen intelligent zusammen, erstellt Prognosen und macht Vorschläge zur Optimierung der Systeme.

In Smart Factories arbeiten die Menschen Hand in Hand mit Robotern. Neue Produkte werden im weltweiten Entwickler-Verbund am Computer designt, mitsamt ihrer Fertigung im virtuellen Raum getestet, die Einkaufs- und Lieferprozesse optimiert und das Produkt wird dann

vielleicht sogar noch auf dem 3D-Drucker ausgedruckt. Wartungsingenieure werden nicht mehr in festen Zeitintervallen tätig, sondern nur noch dann, wenn der Computer meldet, dass die Windturbine, die Ampel, der Lkw oder der Zug gewartet werden sollte, weil die Sensoren Unregelmäßigkeiten festgestellt haben, die in ein paar Tagen oder Wochen zum Ausfall führen würden.



**Bild 4:** Das künftige Internet der Dinge ist voller smarter Maschinen. Das Smartphone war nur der Anfang – Smart Transport, Smart Home, Smart Industry, Smart Health, ja sogar ganze Smart Cities werden folgen.

Aussaat-, Dünge- und Erntemaschinen fahren selbsttätig auf den Äckern. In den Warenlagern gehen nicht mehr die Menschen zu den Regalen, sondern die Regale fahren computer-gesteuert zu einer Station, wo dann – heute noch Menschen, künftig Roboter – die Waren entnehmen und versandfertig machen. Auch in Hotels, Museen und Geschäften werden Roboter bedienen und Auskünfte geben. Nur der beliebig einsetzbare elektronische Butler für zu Hause wird noch mehrere Jahrzehnte auf sich warten lassen; dazu sind die Aufgaben einfach zu komplex und er soll ja auch bezahlbar sein.

Ich bin überzeugt davon, dass uns die wahre Revolution der smarten Maschinen erst noch bevorsteht. Sie wird dann richtig Fahrt aufnehmen, wenn die vier mächtigsten Entwicklungsstränge zusammenkommen: die Deep-Learning-Verfahren der Bild-, Sprach- und Texterkennung, die kognitiven Computer, die auch Wissen verarbeiten können, die Entwicklung von Robotern und autonomen Fahrzeugen und – last but not least – die Automatisierung und Digitalisierung in der Fertigung, also das, was bei uns unter den Schlagworten Industrie 4.0, Big Data und Internet der Dinge bekannt geworden ist.

- [1] Eberl, U., *Zukunft 2050 – wie wir schon heute die Zukunft erfinden*, Beltz & Gelberg, Weinheim (2013, 5. Auflage) sowie [www.zukunft2050.wordpress.com](http://www.zukunft2050.wordpress.com)
- [2] Siemens AG, Zukunftsmagazin *Pictures of the Future* (Druckausgaben 2001-2015) sowie im Internet [www.siemens.de/pof](http://www.siemens.de/pof)
- [3] Eberl, U., *Smarte Maschinen – wie Künstliche Intelligenz unser Leben verändert*, Hanser, München (2016)



# Instrumententafel Nähkleid-Kaschierung

## Vom diskontinuierlichen zum kontinuierlichen Prozess

R. Kurz, S. Hobelsberger, H. Auer, BMW AG, Landshut

### Kurzfassung

Die BMW Group hat in Zusammenarbeit mit dem Anlagen- und Werkzeughersteller 3CON GmbH aus dem österreichischen Ebbs ein Konzept entwickelt, das die kontinuierliche Fertigung von Instrumententafeln im Nähkleid-Kaschierverfahren ermöglicht. Auslöser für diese Entwicklung war und ist der steigende Bedarf an Sonderausstattungsvarianten mit höchster Anmutung im Fahrzeuginnenraum. Ein Prozess, der ursprünglich viel Handarbeit und Taktzeiten von mehr, als 10 Minuten erforderte, wurde in einen großserientauglichen Prozess umgewandelt.

### Abstract

BMW Group has in cooperation with the Austrian tool and machinery equipment manufacturer 3CON GmbH developed a concept for a continuous manufacturing process of dashboards in a cut and sew process. This development was triggered by the enlarging request of the market for optional luxury equipment with best look and feel in the automotive interior. A process that originally took more than 10 minutes of cycletime involving a lot of manual work, was changed into a process ready for high volume production.

### 1. Anforderungen

Während in den 50er und 60er Jahren das Bedürfnis nach Differenzierung hauptsächlich noch durch die Motorisierung abgedeckt wurde, entstand in den Folgejahren vermehrt der Wunsch nach zusätzlichen Optionen zur Produktaufwertung. Das „fahrerorientierte“ Cockpit ist eines der Hauptmerkmale der 70er. Ebenso standen neue Materialien, neue Optik und exklusivere Haptik im Vordergrund der letzten Jahre. Schlagworte wie Druck- und Berührhaptik oder haptische und optische Anmutung hielten in der Branche Einzug. Hier schön zu sehen am Beispiel des in den 50-er Jahren hergestellten BMW 503 und der heute aktuellen 3-er Reihe.



Bild 1: Entwicklung des Cockpits von den 1950ern bis heute -  
Development of cockpit appearance 1950s to today

Früher stand ohne Zweifel die reine Funktionalität im Vordergrund. Hohe Wertigkeiten für Cockpitoberflächen können insbesondere mit Technologien erzielt werden, bei denen die Oberflächen durch aufwendige Verfahren hergestellt werden. Heute werden also Wohlbefinden, Anmutung und Wertigkeit priorisiert, da der Anspruch an das Interieur im Laufe der Jahre immens gestiegen ist. Das Cockpit der Zukunft sollte also eine Umrahmung der verbauten Bedienelemente darstellen. Im Laufe der Jahre ist es zunehmend gelungen, mit der Anmutung von unterschiedlichen Materialien Emotionen zu wecken.



Bild 2: Anforderungen an ein modernes Cockpit -  
Requirements to a modern Cockpit

Ein innovatives und gleichzeitig effizientes Verfahren zur Herstellung von Instrumententafeln mit hochwertigen Oberflächen in grossen Stückzahlen, speziell im Premiumsegment, rückte immer mehr in den Fokus der Entwicklungsaktivität.

## 2. Derzeit bei BMW eingesetztes Verfahren

Am Beispiel der 7er Reihe zeigt sich die Entwicklung der eingesetzten Verfahren beim Nähkleidkaschieren am besten:

Tabelle 1: Entwicklungsschritte der Nähkleidkaschierung

1995	wurde extern vorfixiert und anschließend mittels Membrane kaschiert bei einer Zykluszeit von ca. 12 Minuten
2008	wurde intern vorfixiert und anschließend per Hartwerkzeug kaschiert bei einer Zykluszeit von ca. 5 Minuten
2015	wurde intern vorfixiert und anschließend per Hartwerkzeug kaschiert bei einer Zykluszeit von ca. 140 Sekunden

Die 140 Sekunden Zykluszeit von 2015 stellen gleichzeitig auch den Stand der Technik zu diesem Zeitpunkt dar. Daher soll dieses Verfahren etwas genauer betrachtet werden.

Das dahinter liegende Anlagen- und Werkzeugkonzept baut auf einer Presse mit Drehuntertisch auf. Zwei baugleiche Unterwerkzeuge befinden sich auf dem Drehtisch und ein Oberwerkzeug am Oberteil der Presse.

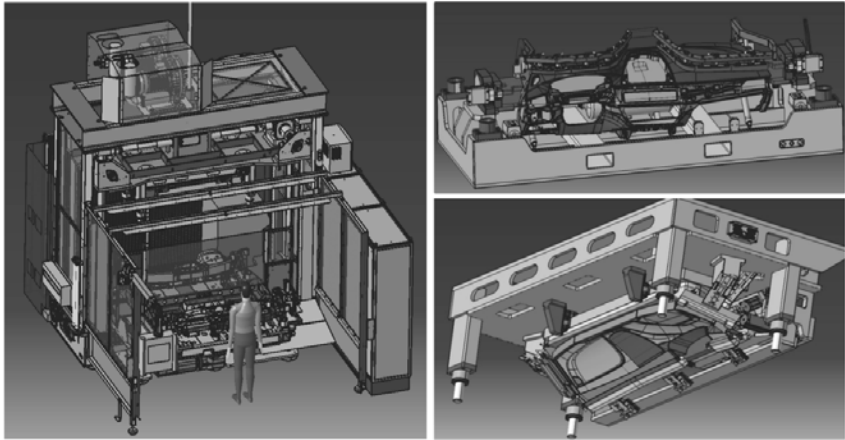


Bild 3: Drehtischanlage zur für integriertes Vorfizieren -  
Turn table machine for integrated pre fixing procedure

Beim integrierten Vorfizieren des Nähkleides mit anschließender Hartwerkzeug-Kaschierung werden die Träger zuerst in einer Sprühkabine mit Kleber benetzt. Daraufhin wird das Nähkleid auf einem der Unterwerkzeuge vorfiziert, während sich das andere in der Produktionsposition befindet. Dadurch ist der Einlegevorgang von dem Kaschiervorgang entkoppelt. Wenn das Unterwerkzeug mit dem vorfizierten Nähkleid danach in die Presse einschwenkt, starten die Kaschierung und der Umbug. Die Klebstoffuge wird über ein hartes Werkzeug durch das Dekor hindurch aufgeheizt. Somit bleiben für beide Prozesse, das Vorfizieren und das Heizen samt Kaschieren annähernd die vollen 140 Sekunden zur Verfügung.

### 3. Lösungsansätze für hohe Stückzahlen

Da nicht mehr nur in der 7er Baureihe, das hochwertige Erscheinungsbild der Nähkleider geschätzt wird, sondern auch in der 5er Reihe, den X-Baureihen und zunehmend auch in der 3er Baureihe, werden in Zukunft erheblich höhere Stückzahlen hergestellt.

Der erste logische Ansatz liegt dabei in einer Vervielfachung der Anlagen und Werkzeuge, um den Stückzahlen nachzukommen. Dieser Ansatz ist ohne große Risiken behaftet, da man auf ein bewährtes Konzept aufsetzen kann. Allerdings führt das unweigerlich zu hohem Platzbedarf, hohen Investitionen bei Anlagen und Werkzeugen, sowie hohem Personalbedarf.

Um hohe Stückzahlen prozesssicher und in allen erdenklichen Varianten abbilden zu können, bedarf es eines Konzepts, das in sich schlüssig ist und in einem kontinuierlichen Ablauf alle nötigen Prozessschritte verbindet. Träger, Kleber und Nähkleid müssen in der richtigen Kombination zusammengebracht werden und dabei sind möglichst wenige Handlungsschritte anzustreben, um für hohe Stückzahlen wirtschaftlich attraktiv zu sein.

Die Firma BMW hat somit in einem Workshop einen Ansatz entworfen, wie die Fertigung von nähkleidkaschierten Instrumententafeln in der Zukunft aussehen kann.

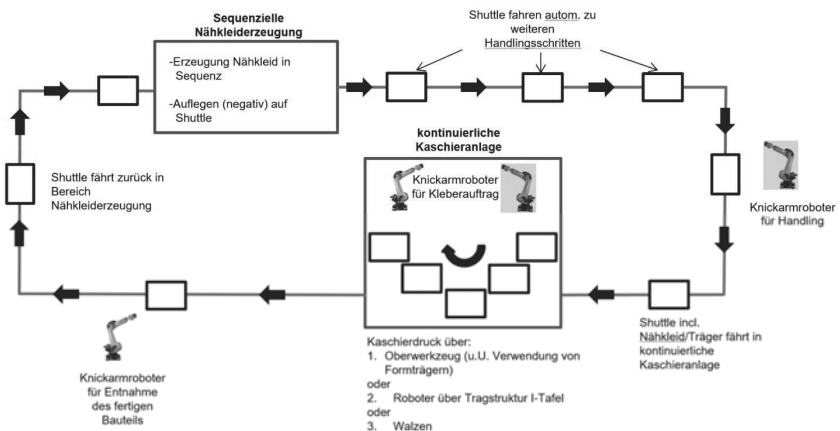


Bild 4: Erste Ideen für eine kontinuierliche Fertigung  
First ideas for a continous fabrication

In Zusammenarbeit mit der Firma 3CON hat man dann als ersten Schritt das kontinuierliche Kaschierverfahren aus diesem Gesamtablauf herausgenommen und mit dem Ziel eines 35 Sekunden Zyklus umgesetzt. Dabei wurde auf dem Prinzip der Drehtischanlage aufgesetzt und die Prozessschritte in einem kontinuierlichen Rundtakt noch weiter voneinander entkoppelt, um die Produktionsengpässe aufzulösen.

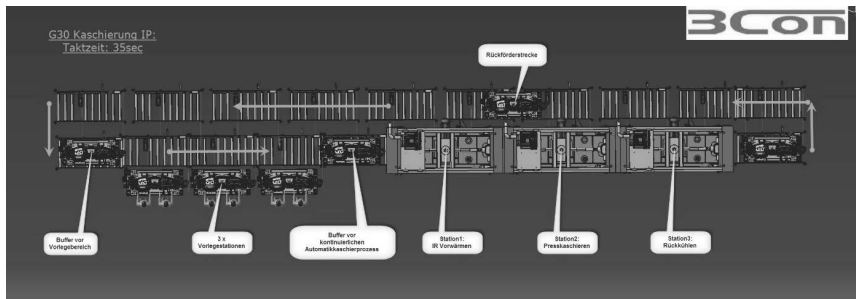


Bild 5: Erstes Konzept für den kontinuierlichen Kaschierprozess  
First concept for continuous laminating

Die Vorteile einer kontinuierlichen Fertigung in Form einer Fertigungsline liegen klar auf der Hand. Durch kürzere Zykluszeiten ist man besser synchronisiert zu anderen Prozessen, was logistische Vorteile im Just-In-Sequence Produktionsmodus mit sich bringt. Die Anordnung in einer Linie mit verketteten Prozessschritten sorgt für geringen Platzbedarf bei gleichzeitig niedrigem Personalaufwand. Durch die modulare Bauweise kann flexibel auf Kapazitätserhöhungen reagiert werden.

Die Verkürzung der Zykluszeit von bisher rund 140 Sekunden auf 35 Sekunden stieß neben zahlreichen Automatisierungsaufgaben auf zwei grundlegende Herausforderungen. Zum Einen muss das Nähkleid nach wie vor per Hand fixiert werden, wofür die nötige Zeit verfügbar sein muss. Zum Anderen muss der Klebstoff durch das Nähkleid hindurch erwärmt werden. Beide Themen können nur durch ein weiteres Untergliedern in Einzelschritte gelöst werden.

#### 4. Kontinuierliche Fertigung

Der Ablauf des kontinuierlichen Kaschierverfahrens erfordert eine Untergliederung in folgenden Schritte:

- Vorfixierstation
- IR-Vorflashstation
- Warmpressstation
- Kaltpressstation
- Automatische Entnahme

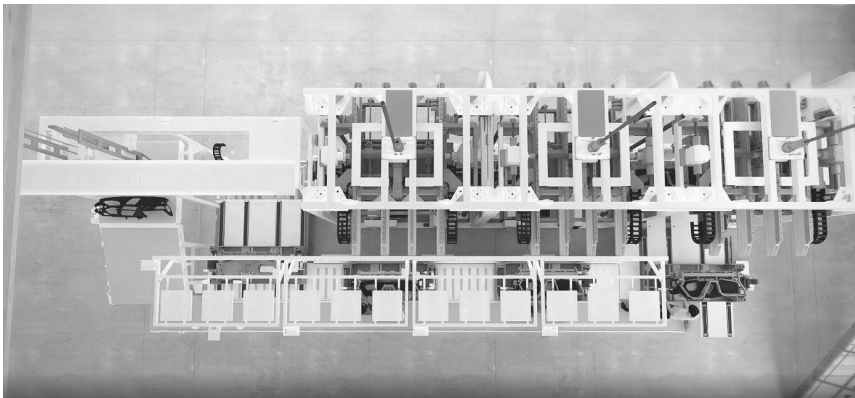


Bild 6: Layout der kontinuierlichen Kaschieranlage  
Layout continuous laminating machine

Im ersten Schritt werden das Trägerteil und das Nähkleid auf dem Unterwerkzeug aufgelegt. Die Ausrichtung der Naht wird durch ein Nahtschwert erleichtert, das auch in allen nachfolgenden Prozessschritten geschlossen bleibt. Ein Werkermitfahrband, das sich synchron mit dem Unterwerkzeug bewegt, gibt den Workern die Zeit, die Sie brauchen, um das Nähkleid optimal zu fixieren. Die Worker gehen dann zurück an den Anfang des Bandes und durchlaufen die Station erneut.

Am Ende des Werkermitfahrbands fährt das Unterwerkzeug in die IR-Vorflashstation ein, wo die Klebstoffuge mit Infrarotstrahlern durch das Dekor hindurch vorgeheizt wird.

Das Unterwerkzeug „shuttelt“ dann weiter in die Warmpressstation, wo mit Hilfe eines warmen Oberwerkzeugs die zur Aktivierung der Klebstoffs nötige Temperatur erreicht wird und auch die nötige Presskraft von allen Seiten aufgebracht wird.

Im Anschluss an die Warmpresstation fährt das Unterwerkzeug in eine Kaltpresstation, wo die Klebstoffuge mit einem kalten Oberwerkzeug rückgekühlt wird, um eine dauerhaft sichere Verklebung zu gewährleisten.

Nach dem Ausfahren aus der Kaltpresstation wird die fertige Instrumententafel von einem automatischen Handlingsystem entnommen und auf ein Förderband abgelegt. Das Unterwerkzeug fährt wieder an den Anfang des Werkermittfahrbandes. Auf diese Weise können bis zu 8 Werkzeuge von einer Anlage aufgenommen werden.

## **5. Ausblick**

Zusätzlich zu der vorhin beschriebenen und bereits für den 5er BMW realisierten Linie gibt es bereits Konzepte, die eine große Flexibilität einer solchen Instrumententafel Linie zulassen. Dadurch ist zum Beispiel die Fertigung von Links-/Rechtslenker oder sogar von verschiedenen Modellen auf einer Linie ohne Werkzeugwechsel möglich. Lösungen hierzu sind Schiebetische oder Rotationsobertische in der Heiz- und den Presstationen, oder auch drehbar ausgeführte Unterwerkzeuge, die Links- und Rechtslenker vereinen.

Darüber hinaus lässt sich die Linie bei Bedarf noch mit einem Werkzeugwechselbahnhof kombinieren, um für maximale Flexibilität zu sorgen.

Weitere Entwicklungen gehen in eine weitere Zykluszeitreduzierung in Richtung 30 Sekunden und eine Ausweitung des kontinuierlichen Prozesses auf die restlichen Prozessschritte zur Herstellung von Instrumententafeln, wie die Verkettung mit der Nähkleiderstellung, dem Spritzgussprozess für das Trägerteil und dem Klebstoffauftrag.

## **Literaturhinweise**

Alle Informationen basieren auf internen Schriftstücken, Protokollen, Ausarbeitungen und Präsentationen der Firmen BMW Group und 3CON GmbH.

# Methodische Weiterentwicklung der Gewichtsreduzierung von Verkleidungsteilen im Fahrzeuginnenraum

## Gegenwärtige und zukünftige Möglichkeiten aus Sicht eines Fahrzeugherstellers

**M. Steinbach, J. Maier**, Adam Opel AG, Rüsselsheim

### Kurzfassung

Die folgende Ausarbeitung betrachtet die Motivation zur Gewichtsreduzierung und erläutert die Anforderungen an die Verkleidungsteile im Fahrzeuginnenraum. Der Beitrag stellt zwei Ansätze zur effizienten Gewichtseinsparung vor:

- kurzfristig anwendbare Möglichkeiten, wie den Einsatz von Naturfaserträgern bei „veredelten“ (kaschierten) Bauteilen, die Werkstoffauswahl und Wanddickenausführung bei „Mold-in-Color“-Bauteilen,
- mittel- und langfristig anwendbare Möglichkeiten, wie die Weiterentwicklung der Dünnwandspritzgusstechnik sowohl durch die Anwendung neuer Konstruktions- und Simulationsmethoden als auch durch den Einsatz von neuen Technologien und Materialien.

Hierdurch lassen sich insgesamt Verbesserungen zwischen 10% und 25% erzielen.

### 1. Bedeutung des Fahrzeuggewichts und spezifische Anforderungen an ausgewählte Innenraumbauteile

#### *Was motiviert uns zur Gewichtsreduzierung?*

Im Automobilbau spielt die Reduzierung des Fahrzeuggewichts eine zentrale Rolle. Ein hohes Fahrzeuggewicht wirkt sich auf mehrere Bereiche negativ aus, die bekanntesten sind Fahrdynamik und Kraftstoffverbrauch.

Spätestens seit der Finanzkrise 2008/2009 mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Kraftstoffpreise wurden die Bestrebungen, die Fahrzeuggewichte weiter zu reduzieren, deutlich verstärkt. Zusätzlich zu dieser Diskussion sind über die Jahre hinweg die Anforderungen an die Fahrzeuge zunehmend gestiegen, nicht zuletzt auch getrieben durch Anforderungen aus Verbraucherorganisationen, was Gewichtserhöhungen zur Folge hatte, die kompensiert werden mussten.

### *Gewichtsreduzierung in Abhängigkeit der Materialfamilien*

Fahrzeubereiche, die schwerpunktmäßig mit metallischen Werkstoffen arbeiten, ersetzen zunehmend Stahlbauteile durch metallische Werkstoffe geringerer Dichte, kunststoffbasierende Lösungen oder Hybrid-Ansätze.

Den Bereich der Fahrzeuginnenraumverkleidungsteile, der weitgehend bereits Kunststoffe einsetzt, stellt die Gewichtsreduzierungsanforderung vor neue Herausforderungen. Hierbei bieten sich verschiedene Alternativen an, beginnend bei der Werkstoffauswahl im Rahmen der bisher für eine Komponente eingesetzten Fertigungsverfahren bis hin zum Wechsel der Fertigungsverfahren. Diese Alternativen stehen jedoch nicht zur freien und uneingeschränkten Auswahl zur Verfügung, da funktionale und kommerzielle Anforderungen gleichberechtigt in der Entwicklung berücksichtigt werden müssen. Somit ist eine sehr sorgfältige Auswahl von Werkstoff und Fertigungsverfahren zu treffen und eine möglichst ausgewogene Balance zwischen Gewicht, Material, Prozess und Kosten herzustellen.

### *Anforderungen an Verkleidungsteile im Fahrzeuginnenraum*

Fahrzeuginnenraumverkleidungen dienen der Aufwertung des Fahrzeuginnenraums. Es werden demnach Oberflächenwerkstoffe gewählt, die dem Fahrzeugbereich entsprechend die Bauteile optisch und qualitativ verbessern. Hierbei finden verschiedene Differenzierungen statt, nicht zuletzt orientiert an Fahrzeugsegment und Position des Bauteils.

Diese Aufwertungen stellen jedoch nur einen kleinen Teil der Anforderungen an Fahrzeuginnenraumverkleidungsteile dar. Weiterhin sind zu berücksichtigen:

- Gewicht,
- Material,
- Oberflächenqualität,
- zur Verfügung stehende Fertigungsverfahren,
- statische Belastungen,
- Insassenschutzanforderungen im Rahmen der gesetzlichen Vorschriften,
- Schwingungs- und Dämpfungseigenschaften,
- ergonomische Anforderungen (HMI),
- Bauteilmontage,
- Logistik.

## **2. Kurzfristig anwendbare Möglichkeiten am Beispiel einer Türverkleidung**

### 2.1 Auswahlmöglichkeiten

Grundsätzlich können Verkleidungsteile zwei Kategorien zugeordnet werden:

- Bauteile mit veredelter Oberfläche und
- „Mold-in-Color“ Bauteile (Spritzgießbauteile mit genarbter Oberfläche).

#### *Bauteile mit veredelter Oberfläche*

Bei veredelten (kaschierten) Bauteilen wird unterschieden, ob die Oberflächenveredelung durch Auftrag eines Lackes oder durch Einsatz von Dekormaterialien, wie Stoff, PVC- oder TPO-Folien, erfolgen soll.

Werden Dekormaterialien anstelle eines Lackes ausgewählt, so besteht die Möglichkeit, Trägermaterialien nahezu unabhängig von der sichtbaren Oberfläche einzusetzen. Bei solchen Teilen lassen sich Gewichtsreduzierungen demnach nicht nur über die Auswahl des Rohstoffes, sondern auch über die Auswahl des Fertigungsverfahrens und damit verbundener Rohstoffe geringerer Dichte realisieren.

Bei solchen Bauteilen ist allerdings zu beachten, dass eine sorgfältige Material- und Fertigungsprozessauswahl zu treffen ist. Ohne Beachtung der gewichtsspezifischen Parameter (z.B. Foliendicke, Einsatzgewicht Naturfasermatte) wird ansonsten schnell der Gewichtsreich einer optimierten, reinen Spritzgießbauteils erreicht. Dies wäre beispielsweise bei einer Naturfaseranwendung der Fall, wenn Oberflächenfolien ausgewählt würden, die aufgrund des Prozesses der Narbabbildung (IMG) eine höhere Dicke und somit ein höheres Gewicht einbringen würden.

Eine Substitution von reinen Spritzgießbauteilen aus Gründen der Gewichtsreduzierung bietet sich somit nicht an. Ist allerdings eine veredelte Oberfläche gewünscht, so lässt sich durch den Einsatz von Naturfaserwerkstoffen als Trägermaterial eine deutliche Gewichtsreduzierung gegenüber Kunststoffträgern erreichen.

#### *„Mold-in-Color“-Bauteile (Spritzgießbauteile mit genarbter Oberfläche)*

Bei „Mold-in-Color“-Bauteilen sind die Möglichkeiten der Gewichtsreduzierung eingeschränkt. Hier stehen unmittelbar die Rohstoffauswahl und die Wanddickenausführung zur Verfügung. Im Rahmen des Spritzgießens würde sich der Schaumspritzguss als Verfahrensvariante anbieten. Zu beachten sind jedoch Einschränkungen hinsichtlich des Einsatzes bei „Mold-in-Color“-Bauteilen. Somit reduzieren sich die Möglichkeiten bei genarbten Spritzgießteilen für den unmittelbaren Serieneinsatz auf die Rohstoffauswahl und die Wanddickenausführung.

Mit der Rohstoffauswahl lässt sich das Bauteilgewicht um bis zu 9% über die Rohstoffdichte reduzieren.

Werden die Wanddicken verringert, ergeben sich ebenfalls Reduzierungsmöglichkeiten bis zu 8%. Dieser Wert bezieht sich auf ein flächiges Bauteil ohne rückseitige Elemente und hängt ebenfalls von der Ausgangswanddicke ab. Entsprechende Steifigkeitseinschränkungen sind in Kauf zu nehmen.

Der Vergleich der Resultate aus der Dichte- und Wanddickenreduzierung zeigt, dass die Dichte des Werkstoffes von  $1,03\text{g/cm}^3$  auf  $0,94\text{g/cm}^3$  reduziert werden müsste, um die gleiche Gewichtsreduzierung wie bei einer Wanddickenreduzierung von 2,5mm auf 2,3mm zu erzielen. Je nach Werkstoffverfügbarkeit ergibt sich mit der Auswahl eines leichteren Werkstoffes eine größere Flexibilität in der Gewichtsreduzierung als durch die Reduzierung der Wanddicken. Hierbei werden allerdings konstruktive Maßnahmen erforderlich, wie im nächsten Kapitel beschrieben.

## 2.2 Auswirkungen der gewählten Gewichtsreduzierungsmethode auf Bauteilkonstruktion, Werkzeuge und Fertigungsanlagen

### *Bauteile mit veredelter Oberfläche*

Die umfangreichste Variante zur Gewichtsreduzierung stellen die veredelten (kaschierten) Bauteile dar. Hierbei sind, je nach Wahl des Trägermaterials und der damit verbundenen Fertigungsverfahren, verschiedene konstruktive Randbedingungen zu beachten. Diese betreffen unter anderem Anforderungen an Mindeststrichen, zusätzliche Entformschrägen und Auszugsgrade. Bei Naturfaserträgern stellen hinterschnittige Bereiche eine besondere Herausforderung dar, die je nach gewünschter Oberflächenform Zusatzbauteile erfordern.

Die Fertigung solcher Bauteile kann in Abhängigkeit der Materialien und Bauteilkonturen sehr komplex ausfallen und mehrere Fertigungsschritte nach sich ziehen.

Vor dem Hintergrund dieser Komplexität bieten sich solche Verfahren weniger an, um im niedrigpreisigen Segment Spritzgießteile zu substituieren. In diesen Segmenten wird man eher versuchen, die Bauteile im Rahmen der Spritzgießmöglichkeiten zu optimieren.

### *Mold-in-Color-Bauteile*

#### *- Verringerung des Gewichts durch Wanddickenreduzierung*

Die Wanddickenreduzierung bei Mold-in-Color-Bauteilen als Gewichtsoptimierung kann nur dann als pauschale Reduzierung angewendet werden, wenn keine besonderen Steifigkeitsanforderungen zu erfüllen sind. Eine Anwendung dieser Methode ist möglich, wenn rücksei-

tige Elemente keine Last- und Stützfunktion übernehmen müssen, und diese Elemente somit in der Dicke reduziert werden können (Vermeidung von Einfallstellen).

Sind rückseitige Strukturen mit einer bestimmten Stabilität erforderlich, sind die sichtbaren Oberflächen dieser Bereiche lokal mit angepassten Wanddicken auszuführen. Diese lokalen Wanddickenanpassungen sind sorgfältig und in enger Abstimmung mit der Werkzeugauslegung zu definieren. Großzügige Übergangsbereiche verringern das Risiko von Glanzgradunterschieden. Folgen in schmalen Bereichen mehrere dieser Wanddickenveränderungen aufeinander, so ist zugunsten eines möglichst harmonischen Schmelzflusses unter Umständen auf eine Wanddickenreduzierung zu verzichten.

Mechanische Lasten erfordern je nach Lastfall eine gewisse Steifigkeit des Bauteils. In Kombination mit einer Wanddickenreduzierung ist zu bewerten, ob der Steifigkeitsverlust über eine entsprechende rückseitige Struktur ausreichend kompensiert werden kann, oder ob auf die Wanddickenreduzierung im kritischen Bereich zu verzichten ist. Der Einsatz von faserverstärkten Werkstoffen bietet sich bei Mold-in-Color-Bauteilen ohne weitere Oberflächenbehandlung oder sonstige Zusatzmaßnahmen nicht an.

Bauteile mit reduzierter Wanddicke erfordern zudem höhere Aufmerksamkeit bei der Auslegung der Spritzgießwerkzeuge. Anzahl, Position und Ausführung der Angüsse erhalten ein höheres Gewicht. Zusätzlich können Maßnahmen zur gezielten und kontrollierten Einbringung der Schmelze bei jedem einzelnen Anguss sinnvoll sein. Hierzu bieten die verschiedenen Heißkanalhersteller entsprechende Systeme an, die auch in der simulatorischen Betrachtung des Spritzgießprozesses bewertet werden können.

#### *- Gewichtsreduzierung durch geringere Rohstoffdichte*

Als Alternative zur Wanddickenreduzierung steht die Auswahl eines Werkstoffes mit geringerer Dichte zur Verfügung.

Dieser Ansatz bietet gegenüber der Wanddickenreduzierung den Vorteil, dass sich die Gewichtsreduzierung vollumfänglich auf die gesamte Bauteiloberfläche erstreckt. Somit ergeben sich im direkten Vergleich bei komplexen Bauteilen Vorteile bei Konstruktion und Werkzeugauslegung sowie ein höheres Gewichtsreduzierungspotential.

Die Bauteilkonstruktion ist weniger stark beeinflusst und kann unter bekannten Kriterien nahezu unverändert ausgeführt werden. Durch das ungünstigere Wärmeausdehnungsverhalten solcher Werkstoffe sind größere Spalte und Abstände zu angrenzenden Bauteilen nicht zu vermeiden. Bei Zusammenbauten mit mehreren verschiedenen Materialien sind deren Wärmeausdehnungskoeffizienten im Allgemeinen und unerwünschte Effekte, wie z.B. der Bimetalleffekt, im Besonderen zu bewerten.

Die Auslegung der Werkzeuge ist bei diesem Ansatz aufgrund der homogenen Wanddicken weniger stark betroffen als bei der Wanddickenreduzierung.

### **3. Dünnwandspritzguss als Weiterentwicklung der Dünnwandtechnik**

#### **3.1 Stand der Technik**

Wie im ersten Teil dargestellt, bietet das Dünnwandspritzgießen mit konventionellen Ansätzen gute Gewichtseinsparpotentiale von bis zu 10%. Durch die Anwendung neuer Konstruktions- und Simulationsmethoden sowie durch den Einsatz neuer Technologien und Materialien wurde versucht, die Einsparpotentiale deutlich zu erhöhen. Dabei konzentriert sich die augenblickliche Entwicklung auf Innenraumverkleidungsteile aus Polypropylen, welche in drei Bereiche aufgegliedert werden (Bild 1):

##### *- Einfache Verkleidungsteile*

Bei dieser Art von Verkleidungsteilen handelt es sich um Bauteile, deren Hauptfunktion das Abdecken von Karosserieblechen ist (z. B. Kofferraum- oder Schwellerverkleidungen).

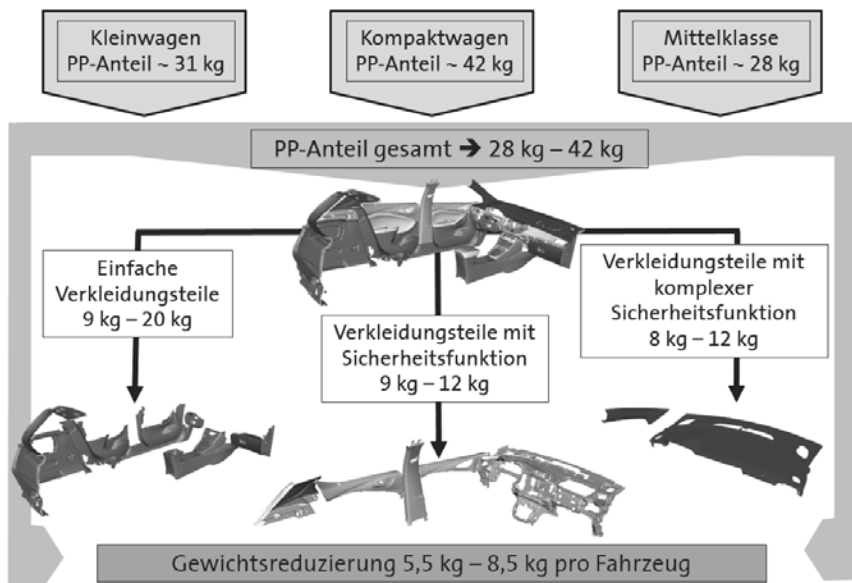
##### *- Verkleidungsteile mit Sicherheitsfunktion*

Diese Kategorie von Verkleidungsteilen deckt vorrangig Karosseriebleche ab, ergänzt um wichtige passive Schutzfunktionen. Es findet oftmals eine Interaktion mit anderen Schutzsystemen, wie z. B. Airbagsystemen, statt.

##### *- Verkleidungsteile mit komplexen Sicherheitsfunktionen*

Bei dieser Gruppe von Bauteilen ist das eigentliche „Abdecken“ eine Nebenfunktion die durch weitere Funktionen wie Strukturbildung, Aufnahme von anderen Bauteilen, aktive Integration von Schutzsystemen, sowie durch hohe optische Ansprüche erweitert wird. Ein typisches Bauteil dieser Kategorie ist die Instrumententafel.

In allen drei Bereichen wird derzeit vorrangig Polypropylen (PP) als Grundwerkstoff eingesetzt, wobei den Bereichen unterschiedliche PP-Materialklassen zugeordnet sind. Darüber hinaus müssen die Bauteile ihre Funktionalität über ein breites Temperaturspektrum von -40°C bis +80 °C beweisen, wodurch die Anforderungen an das Material nochmal deutlich erhöht werden.



**Bild 1:** Klassifizierung der Polypropylenanteile von Fahrzeuginnenraumkomponenten und deren durchschnittliche Gewichtsreduzierungspotentiale [1]

### 3.2 Weiterentwicklung der Dünnwandspritzgusstechnik

Wie beim konventionellen Dünnwandspritzgießen die Gewichtseinsparung vorrangig durch Abdünnung erzielt. Die Reduzierung der Wandstärke wird deutlich aggressiver ausgeführt, teilweise werden Wandstärken-Reduktionen von bis zu 40% angestrebt. Je nach Bauteil werden somit Teilbereiche auf bis zu 1,5 mm Wandstärke abgedünnt. Dabei sind folgende Aspekte neu zu bewerten bzw. auszulegen:

- Konstruktion (Füll-/ und Struktursimulation),
- Material,
- Prozess,
- Werkzeug.

### *Konstruktion*

Die Bauteilauslegung ist einer der wichtigsten Faktoren zur Erreichung eines optimalen Gewichtseinsparpotentials. In diesem Fall empfiehlt sich, schon sehr früh in der Bauteilentwicklung die genauen Belastungen eines Bauteils zu kennen. Selbst in einem einfachen Verkleidungsteil sind oftmals unterschiedliche Lastfälle zu erfüllen (z. B. Clipabzug, Montagekräfte, dynamisch Belastungen). In der Vergangenheit wurden die Rückseiten der Bauteile als einfache Abstandsflächen der A-Seite ausgeführt. Um die entsprechenden Belastungen aufzunehmen, wurden die Wanddicken erhöht. Da der konventionelle Spritzguss keine großen Wandstärkensprünge zulässt, geschah dies meist über relativ große Bauteilflächen. Mit dem Dünnwandstritzguss lassen sich deutliche Verbesserungen erzielen, indem die B-Seite auf ein technisches Minimum reduziert wird. Der folgerichtige Steifigkeitsverlust ist durch eine optimale Auslegung der rückseitigen Rippenstruktur auszugleichen. Moderne Füll-/ und Struktursimulationen unterstützen dabei die belastungsorientierte Konstruktion.

### *Material*

Die Abdünnung der Wandstärke erfordert deutlich verbesserte Fließeigenschaften des Materials, um die Werkzeugkavitäten komplett füllen zu können. Hierzu gibt es zwei unterschiedliche Ansätze:

- Schaumstritzguss

Beim Schaumstritzguss wird zwischen den Verfahrensrichtungen „Physikalisches Schäumen“ und „Chemisches Schäumen“. Der Einsatz von Schaumstritzguss erhöht den Bauteilinnendruck und führt zusätzlich zu einer verbesserten Rheologie der Schmelze.

Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile - beim „Physikalischen Schäumen“ ist der Stritzprozess gut beherrschbar, allerdings die Maschinentechnik aufwendiger.

„Chemischen Schäumen“ lässt sich auf gängigen Stritzgießmaschinen einfach applizieren, allerdings wirkt sich die Treibmittelchemie als Folge der komplexeren Prozesskontrolle negativ aus.

- Polypropylen mit verbesserten Fließeigenschaften

Durch spezielle Materialabstimmungen des PP wird die Fließfähigkeit soweit optimiert, dass die Realisierung von dünnen Wandstärken ermöglicht wird. Dieses Verfahren wirkt sich sehr vorteilhaft auf die Oberflächenqualität aus, da keine negativen Effekte durch Treibmittel bzw. Schaumbildung entstehen. Nachteilig ist, dass die Verstärkung von abgedünnten Bereichen mittels Bauteilrippen nur in den für Kompaktguss geltenden Anbindevhältnissen statt-

finden kann. Dies führt gegenüber Schaumspritzguss zu einer Reduktion des Gewichtseinsparpotential.

### *Prozess*

Beim Spritzgießprozess gibt es eine Vielzahl von Parametern, welche die Füllung und die Oberflächenqualität des Bauteils beeinflussen, ohne diese explizit zu erwähnen. Sehr wichtig ist eine gute Füllsimulation zur optimalen Definition der Anspritzverhältnisse. Darüber hinaus haben die Anspritzarten, wie z. B. Film- oder Punktanguss, einen Einfluss auf das Füllverhalten und vor allem auf die Oberflächenoptik. Auch die Auslegung der Anspritzreihenfolge trägt zur Bauteilqualität bei, wobei sich eine über Kaskaden gesteuerte Einspritzung als vorteilhaft erweist. Neben den Anspritzparametern sind auch die Auswahl und die Positionierung des Heißkanalsystems entscheidend. Generell wirken sich speziell beim „Chemischen Schäumen“ kurze Heißkanallängen eher positiv aus.

### *Werkzeug*

In Bezug auf die Werkzeugauslegung muss speziell beim Schaumspritzguss darauf geachtet werden, dass ein Nadelverschlussystem zum Einsatz kommt, damit der bauteilinterne Schäumprozess stattfinden kann. Wegen der fehlenden Rückstandsfreiheit der Treibmittel und der vorzubeugenden Korrosionsbildung, empfiehlt sich die Verwendung höherwertiger Werkzeugstähle.

Des Weiteren erweist sich die Anwendung von variothermen Heizsystemen sowie die Integration einer Gasgedruckanlage als positiv.

### 3.3 Entwicklungsstand der Dünnwandspritzgusstechnik in der Automobilindustrie

Zahlreiche Projekte in der Automobilindustrie haben die Dünnwandspritzgusstechnik zum Untersuchungsgegenstand. Ausgewählte Bauteile sind Einstiegsleisten (einfache Verkleidungsteile), B-Säulenverkleidungen (Verkleidungsteile mit Sicherheitsfunktion) und Instrumententafeln (Bauteile mit komplexer Sicherheitsfunktion).

Hierbei erstreckt sich der Projektumfang über mehrere Phasen:

Bauteilkonstruktion, Entwicklung von Simulationsmethoden und Materialmodellen, Werkzeugbau, Definition der Rheologie und Validierung.

Durch diesen umfangreichen Ansatz reduziert sich das Entwicklungsrisiko bei der Serienumsetzung auf ein Minimum.

### Ausgangsposition

Im Folgenden werden Entwicklungsergebnisse aus dem Bereich „einfache Verkleidungsteile“ am Beispiel einer Türschwellerverkleidung dargestellt.

Das unten dargestellte Bauteil zeigt die ursprüngliche Auslegung mit konstanter Wandstärke (Bild 2).

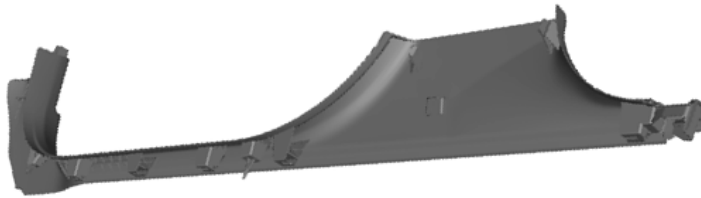


Bild 2: Türschwellerverkleidung [2]

### Belastungsanalyse

Das folgende Bild 3 zeigt ausgewählte Lastfälle am Beispiel einer Türschwellerverkleidung.

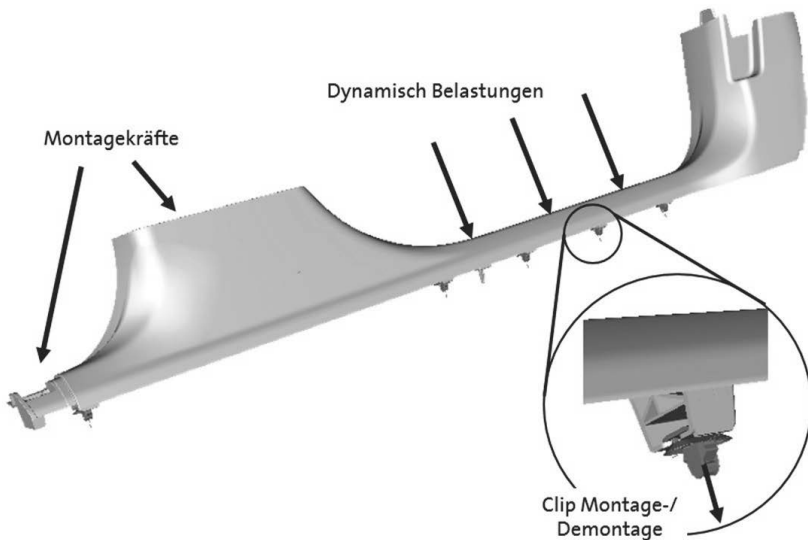


Bild 3: Ausgewählte Lastfälle einer Türschwellerverkleidung [2]

### Bauteilauslegung

Im Anschluss an die Belastungsanalyse beginnt die Bauteilauslegung mit der Definition der abzdünnenden Bereiche und der Identifikation des Steifigkeitsprofils sowie der damit einhergehenden lastorientierten Rippenkonstruktion.

Das folgende Bild 4 zeigt die Dünnwandkonstruktion am Beispiel der Türschwellerverkleidung.

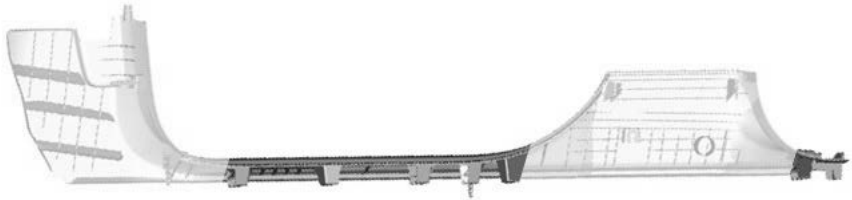


Bild 4: Türschwellerverkleidung in Dünnwandtechnik [2]

### Simulation und „Moldflow“-Analyse:

Nach der Bauteilauslegung folgt die lastorientierte Simulation. Mit Hilfe der „Moldflow“-Analyse werden kritische Bereiche identifiziert, Abhilfemaßnahmen definiert und eine optimale Werkzeugauslegung realisiert.

Das folgende Bild 5 zeigt eine „Moldflow“-Simulation der Türschwellerverkleidung.

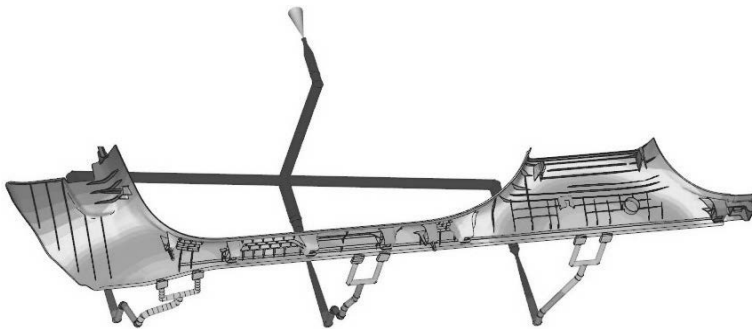


Bild 5: Auszug einer „Moldflow“-Analyse im Türschwellerbereich [3]

### *Werkzeugbau und Spritztechnologie*

Auf Basis der ermittelten Informationen wird die Werkzeugauslegung gestartet. In Abspritzversuchen werden die optimalen rheologischen Werte analog der Füllsimulation umgesetzt. Des Weiteren werden verschiedene Materialkombinationen abgespritzt und beurteilt. Das folgende Bild 6 zeigt ein Dünnwandwerkzeug.

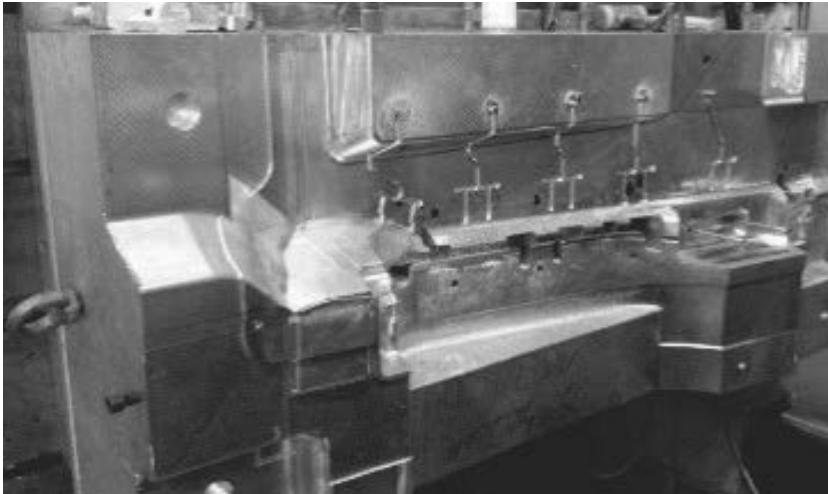


Bild 6: Hälfte eines Dünnwandwerkzeugs [2]

### *Ergebnis:*

Bei der Türschwellerverkleidung ist es gelungen, eine Gewichtsreduktion von bis zu 25% bei gleicher Bauteilfunktionalität zu erzielen.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

In ersten Teil dieses Beitrages wurden die Möglichkeiten zur Gewichtsreduzierung beschrieben, die zum unmittelbaren Serieneinsatz zur Verfügung stehen. Dabei wurde in zwei Bauteilgruppen unterschieden: Veredelte und „Mold-in-Color“-Bauteile. Die Auswirkungen dieser Möglichkeiten auf Bauteil-, Werkzeugkonstruktion und Verfahrenstechnik sind unterschiedlich komplex. Die Entscheidung, welche Methode zur Gewichtsreduzierung zum Einsatz kommt, ist von mehreren Faktoren abhängig und lässt sich nicht pauschal beantworten: zur Entscheidungsfindung sind die „Anforderungen an Verkleidungsteile im Fahrzeuginnenraum“ sowie „projektspezifische Aspekte“ zu differenzieren. Die Zielvorgaben des Projektes bestimmen die Gewichtung dieser Faktoren, die finale Festlegung des Bauteilkonzeptes und die damit zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zur Gewichtsoptimierung.

Durch die Weiterentwicklung von Materialien sowie durch eine optimierte Auslegung von Kunststoffbauteilen bietet die Dünnwandspritzgusstechnik einen sehr effektiven Ansatz zur Gewichtsreduktion. Im Vergleich zur bisherigen Bauteil实现ung lassen sich Gewichtsreduktionen bis zu 25% realisieren. Im Bereich der Werkzeug- und Fertigungstechnik gibt es zahlreiche Ansätze, die eine hohe Bauteilfunktionalität bei guter Oberflächenqualität gewährleisten. Moderne Simulationsverfahren unterstützen die Modellbildung und die Auslegung dünnwandgespritzter Bauteile. Weitere Potentiale bieten sich in der Anwendung dieser Technik auf Karosseriebauteile sowie durch den Transfer auf andere Kunststoffe.

#### Quellenverzeichnis

- [1] General Motors: Projektdokumentation Dünnwandspritzguss, Rüsselsheim 2016
- [2] General Motors: Technische Dokumentation, Rüsselsheim 2015-2016
- [3] General Motors: Simulationsbericht Türschwellerverkleidung; Rüsselsheim 2015



# New vinyl ink and robotized digital printing process for the fine decoration of an instrument panel made by PVC slush molding

Dr. **N. Amouroux**, **M. El Fouzari**, IVY Group, Reims, France

## 2 Abstract

Since the Model T Ford, which was available in all colours provided it was black, consumer choice has increased steadily. Consumers can today configure their car online, by choosing from a set of technical and aesthetic options. However, when it comes to the instrument panel, the color black remains too often the main, or even the only choice. As the automotive industry shifts from mass production to mass customization, production tools should gain in flexibility and responsiveness. In order to address this trend, the IVY Group has developed specialty vinyl inks and a robotized digital printer able to print on curved surfaces, mold or parts, for the fine decoration of instrument panels, door panels and other parts made by PVC slush molding. This technology is ideal for widening the choice for consumers; it opens up new possibilities for limited editions, co-branding initiatives, facelifts and even personalization.

## 3 1 Introduction

The transition from mass production to mass customisation is encouraged by the digitalization of society. Online virtual configurators make interaction with consumers very efficient, enabling automakers to test in advance the demand for specific designs. Customization of the design is already a reality for other industries such as electronics, fashion or sport apparel. For example, NIKE proposes through the NIKEiD initiative the possibility of personalizing sport shoes, which are made to order and shipped in a few days.

Cars are made to order according to the choice of buyers, ranging from exterior color to engine type. In the interior, options are mainly limited to seat-covering type and electronics. The instrument panel, one of the largest parts in the interior, located just in front of the driver and passenger, is for most of the cars only available in black. The IVY Group conducted surveys in car dealerships, and found that both consumers and dealers were receptive to having

more personalized interiors. Consumers would prefer to choose from a closed list of options rather than to propose their own design.

For automakers, the possibility of easy customization of the instrument panels and other parts covered with skins by with PVC slush molding is an opportunity for limited editions, co-branding and facelifts without major changes in the shape.

TMG Automotive introduced inkjet printing on flat TPO performed by in-mold graining (IMG) for the Toyota Yaris [4]. This solution is limited to simple printed designs, as the printed image is deformed during the IMG process. In addition, printing cannot coincide with an embossed area. It suffers also from the limitation of TPO itself: limited depth of forming and poor tactile properties.

In contrast, PVC slush molding is a very flexible technology regarding design freedom, which gives a leather-like feel.

The IVY Group is the leading supplier of PVC slush compounds (PSC) for automotive interiors, with plants in France, Germany, Mexico and China manufacturing PSC under the trademark Nakan® DrySol. The IVY Group manufactures also specialty in-mold vinyl paint Nakan® SpraySol for production of two-tone instrument panels, with full respect of grain and the possibility of using a wide range of colors and effect pigments. To address the trend of growing customization in automotive interiors, the IVY Group has developed specialty vinyl inks Nakan® PrintSol and a unique robotized digital printing solution able to print fine decoration on curved surfaces. The combination of Nakan®DrySol, SpraySol and PrintSol offers a powerful and flexible toolbox to designers for enhancing automotive interiors with an unrivalled freedom, a prerequisite for mass customization.

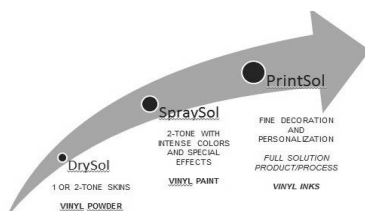


Fig 1: Product range for customization of the dashboard

This printing system can offer our industrial customers great flexibility since it allows decoration of the instrument panel by printing directly in the mold (in-mold printing) or by printing directly on the dashboard (post-printing).



Fig 2: Artist's view

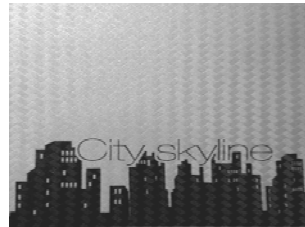


Fig 3: In-mold-printed skin

*For in-mold printing:* decoration is printed within the mold and transferred from the mold to the skin after the slush molding process.

*For post-printing:* decoration is printed directly on the final part; this alternative printing process is useful for customizing at the very last step of the manufacturing process.

In this paper we will focus on the main technical challenges that we had to solve during the development of this mass customization solution, and also on a comparison of in-mold and post-printing solutions and a description of future developments.

#### 4 Technical challenges

We can list the technical challenges in five points:

- Development of inks which meet inkjet printing process requirements
- Formulation of inks compatible with slush-molding high-temperature manufacturing processes
- Development of a highly accurate robotized printing process for printing onto embossed designs
- Development of a CMYK/multi-color printing process
- Meeting automaker requirements (abrasion resistance, fogging, odor, emission, heat ageing, UV ageing....)

Several types of inks are known on the market: solvent-based inks, water-based inks, hot-melt inks, latex inks, UV curable inks, and so on. Our choice was to formulate solvent-based vinyl inks (Nakan® PrintSol) that offer the advantage of being fully compatible with PVC slush and which give a superior perceived quality especially for large printed areas in plain colors.

Concerning the ink formulation, the main parameters for good spitting from the inkjet head are:

- Rheology: Newtonian behavior
- Viscosity level
- Nozzle opening time (the time during which the head can be left inactive without jetting)
- Particle size distribution
- Surface tension.

The formulator must take into consideration the effect of each component on the overall performance of the ink. When the formulation is optimized, the ink forms droplets without satellites, thus ensuring a good quality of printing.

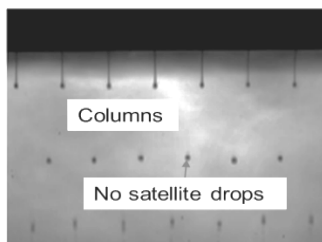


Fig 4: Jetting performance and drop formation

The formulation contains a vinyl polymer which is solubilized in different solvents, additives, thermal stabilizers, pigments and surfactants. The ink is dried by increasing the temperature in the heating oven before the slush molding process or by using an infrared lamp in post-printing. A film forms and achieves its optimum mechanical performance when the solvents have been completely evaporated.

The heat stabilizers ensure a good resistance to processing temperatures, and a complete transfer from the mold to the PVC skin without increasing the demolding force.

For this project, we have developed with our partners a specific 6-axis robotized digital printer able to print on curved surfaces. The robot uses a laser profilometer to scan the surface then selects the printing head with the right color, and prints the surface according to the design. The high-resolution printing head has 360 nozzles per inch spacing, for a total of 512 nozzles spitting 42 pl drops. Its compact design enables the head to print on concave areas, provided the radius of curvature is larger than 60 mm. The intrinsic path repeatability of the robot is approximately 100  $\mu\text{m}$ . This accuracy is sufficient to ensure reliable printing on embossed / debossed areas.

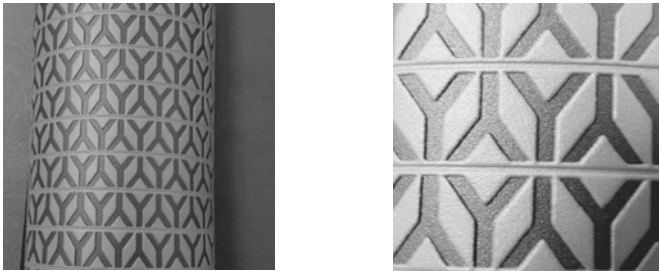


Fig 5: In-mold printed sample; embossed Y shapes are printed

The robot can pick a different printing head for multi-tone designs. The ink is color-matched according to the automaker's requirement. The robotized digital printer can alternatively work in cyan, magenta, yellow, black and white colors (CMYK).

Another challenge was to meet abrasion resistance performance as specified in different OEM requirements. We have developed a specific varnish – inkjet-printable – composed of vinyl and acrylic resin that remains flexible and resistant to the slush molding process. In in-mold printing, this varnish also makes it possible to control the wetting problems linked to variations in the surface tension of the substrate.

## 5 Results

*Abrasion*: very satisfactory results were achieved in the crockmeter test, with no significant transfer to white cotton cloth and a good aspect of the printed surface.



Fig 6: Crockmeter test, 100 cycles, black ink in-mold-printed,  
(DIN/EN/ISO 105-X 12 with additional weight of 10 N)

Other abrasion tests have been validated:

- Abrasion Taber : SAE J948
- Resistance to scuffing : SAE J365
- Resistance to cleaning agents : D235201

*Print Quality* The use of a varnish before printing makes it possible to control the spreading of the ink at different temperatures. Printing on mold results in an impact diameter (DI) up to 200  $\mu\text{m}$  at 40 °C while on varnish the spreading of the ink is limited to 90  $\mu\text{m}$  whatever the temperature of the mold.

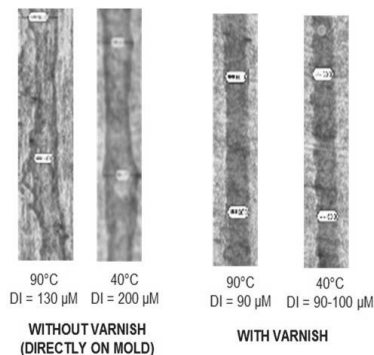


Fig 7: Spreading of the ink at different temperatures

Printing on a mold requires the surface tension of the substrate to be controlled before printing. In slush molding, the surface tension of the mold changes as a function of the number of skins produced; this modification results in a difference in the wetting of the ink evidenced by a change of the contact angle.

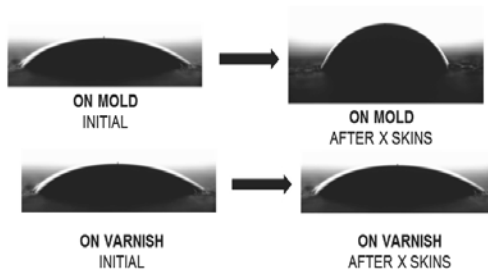


Fig 8: Ink wettability on mold and varnish

The use of a varnish permits the variations in the surface tension of the mold to be solved cycle after cycle during the slush molding process and thus makes it possible to ensure a consistent quality of printing.

The printing resolution is a key factor in ensuring a sharp design. A resolution of 360\*360 dpi gives good results.



Fig 9: Printing with color-matched inks

*Transfer temperature/demolding force:* the ink was designed to be transferred from the mold to the skin, when using the in-mold-printing process, while maintaining a mold release force close to that of the standard slush powder.

	Commercial Ink (solvent-based)	Nakan®PrintSol
Transfer temperature	200 °C	230-235 °C
Transfer quality	Incomplete	Total
Demolding force	41 N	16 N

We evaluated the behavior of a solvent-based commercial ink in comparison with Nakan® PrintSol. The commercial ink does not withstand the high temperatures of the slush process, while our formulation contains thermal stabilizers and release agents to allow transfer up to a temperature of 230 °C while maintaining a release force of 16 N.

## **6 Technical comparison between in-mold- and post-printing**

The instrument panel can be printed and customized using two processes which have their own advantages and drawbacks.

The 'in-mold-printing process' offers the highest perceived quality since the ink is totally integrated into the skin, and the grain remains identical in the printed and non-printed areas. This process thus ensures homogeneity of gloss. Furthermore, it is suitable for printing on embossed or debossed areas. Indeed, due to the consistency of the mold geometry for cycle after cycle, the scanner does not need to survey the surface before each printing. This process is not suitable for narrow molds such as door panel elements. The passenger area of the instrument panel can be printed easily with current printing head.

The 'post-printing process' offers an opportunity to customize a *standard part* at the very last moment, which is a real advantage in mass customization in shortening the response time. With this process a larger area of the instrument panel or door panel can be printed, and in favorable cases, edge to edge. However its main drawback relates to the grain, causing a levelling which increases the gloss. The other current limitation is the ability to print accurately on embossed or debossed areas, due to slight variations of geometry from part to part, thus making scanning of each part necessary before printing.

	In-mold-printing	Post-printing
Accessibility	Limited on edges and in narrow areas	Area of printing more important, edge to edge often possible
Robot installation	On the slush line	Offline
Impact on slush cycle time	Additional printing step	No effect as offline
Drying system	No additional step	Additional step on offline printing station
Printing quality on grain	Excellent, full respect of grain, no over-thickness, gloss homogeneity	Over-thickness causing a leveling of grain, increasing gloss locally
Printing on embossed or debossed areas	Feasibility validated, scanning of mold, not every part	More complex due to part to part variation, fast scanning of every part needed

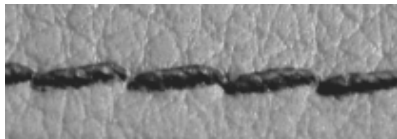


Fig 10: Faux stitches in-mold-printed

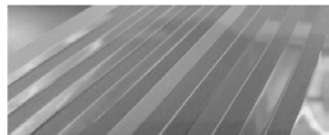


Fig 11: Lines embossed and debossed in-mold-printed

The development of vinyl inks and flexible robotized digital printing solution opens up the road to mass customization of instrument panels and other parts made by PVC slush. This technology supports working with two different printing processes, either in-mold-printing or post-printing. In-mold-printing ensures a high perceived quality and a very precise positioning. The robotized printer is also able to print on final parts. This alternative post-printing process is useful for applying decoration in the very last step, although it has the inconvenience of being on top of the grain.

The next step for in-mold-printing is to work on accessibility using a smaller printing head. In post-printing, the challenge is to develop a rapid scanning technology for parts to ensure accurate positioning and to control the gloss of printed areas.

The IVY Group is collaborating with ABB to develop a ready-to-use robotized digital printing station. An illustration of an industrial post-printing station is shown below.

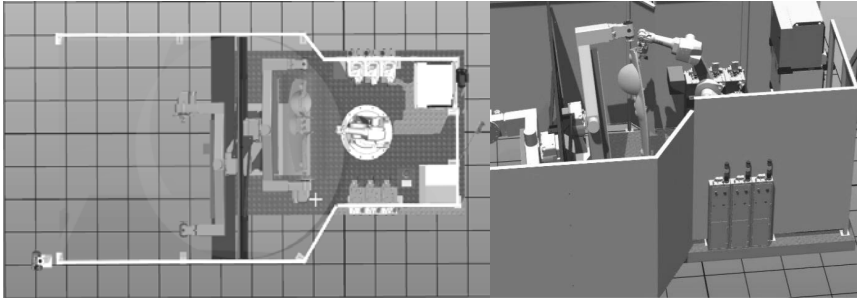


Fig 12: Design for a post-printing station

## 6 Acknowledgements

We would like to thank our partners for their involvement in this project, and especially Mr. Alain Maupas of ABB France.

## 7 References

- [1] From Mass Marketing to Mass Customization, Phillip Kotler, Planning Review, September/October 1989
- [2] Mass Customization, The New Frontier in Business Competition, B. Joseph Pine II, Harvard Business School Press, 1993
- [3] How technology can drive the next wave of mass customization, Anshuk Gandhi, Carmen Mager and Roger Roberts, McKinsey on Business Technology, Number 32, Winter 2013
- [4] Digital printing for flexible interior trim, Dr R. Tol, E Pinho et al., VDI Proceedings 2015
- [5] Mass Customization and the Factory of the Future, Kevin O'Marah, SCM World

# Neue Oberflächen und Anforderungen an die Anwendung von bestehenden Testmethoden

## New surfaces and requirements of applying existing testing methods

Dipl.-Ing. **J. Guenther**, Dipl.-Ing. **D. Malecha**, **J. Reinicke**, B.Eng.,  
Kunststoff-Institut Lüdenscheid, Lüdenscheid

### Kurzfassung

Im ersten Teil des Vortrags wird auf das Verfahren „Lackieren im Werkzeug mittels Überflutung durch PUR-Systeme“ näher eingegangen. Im zweiten Teil erfolgt eine kurze Betrachtung der Komplexität der grundsätzlichen Qualifizierung und Prüfung von neuen Oberflächen in Form von Testmethoden automobiler OEMs am Beispiel des Gitterschnitts.

### Abstract

The first part of the lecture explains the procedure of "painting inside the mold by using PUR". The second part briefly examines the complexity of the qualification and testing of new surfaces by test methods of automotive OEMs using the example of cross-cut.

### Einleitung

Schon lange werden Kunststoffbauteile durch die unterschiedlichsten Verfahren veredelt. Veredeln bedeutet, ihr eigentliches Erscheinungsbild in positiver Hinsicht zu verbessern um die Bauteile den verschiedenen Anforderungen der Kunden anzupassen. Die nachträgliche Veränderung der Bauteiloberfläche, ggf. sogar die der Struktur, kann z.B. durch nachträgliches Galvanisieren, PVD-Beschichten, Beflocken oder anschließendes Lackieren erfolgen. Bei vielen Veredelungsverfahren ist es wichtig, dass die Rohteile keinerlei Fehler auf der Oberfläche aufweisen, da diese später, nach der Bearbeitung, sichtbar werden.

Der zweite Aspekt zur Anwendung von Oberflächenverfahren ist die Verbesserung der Eigenschaften. Die Beschichtung hat die Aufgabe, die Bauteile zu schützen gegen:

- Verkratzung
- Medien, wie Handschweiß, Cremes, Öle/Fette etc.
- UV-Strahlung

Die hohe Qualitätsanmutung der Oberfläche/Bauteile soll somit auch langfristig konserviert und Nachhaltigkeit über den Produktlebenszyklus gewährleistet werden.

### **1.1. Lackierung**

Ein Beispiel hierfür wäre die Lackierung von Kunststoffbauteilen im Automobilbereich. Nach dem Herstellprozess folgt in vielen Fällen der Transport zum Dienstleister, wo die Bauteile lackiert werden sollen. Die Schwierigkeit liegt bei diesem Prozess besonders auf dem Aspekt „Sauberkeit der Bauteile“, da durch den Transport der Formteile die Oberflächen kontaminiert werden könnten. Es ist wichtig, dass die Kunststoffteile fehlerfreie Oberflächen aufweisen, da jegliche Beschädigungen der Oberflächen Ausschuss oder immense Zeitverzögerungen und somit Kostensteigerungen zur Folge haben können. Unabhängig davon, welches Verfahren gewählt wird, erzeugen nachträgliche Beschichtungen zusätzliche Kosten, u.a. bedingt durch den logistischen Aufwand. Ein nennenswerter Vorteil des Lackierens im Spritzgießwerkzeug ist das Eliminieren von Overspray. Bei einem herkömmlichen Lackierprozess muss hier das überschüssige Lackmaterial aufwendig gefiltert werden um es zurückzugewinnen oder es muss zur Entsorgung aufbereitet werden. Da das Lacksystem beim Fluten in eine geschlossene Form injiziert wird, kann hier der Lack nicht in die Umgebung entweichen. Zudem kann eine Beschichtung durch Fluten im Werkzeug brillantere Oberflächen mit Tiefeneffekten erzeugen, wie es mit klassischen Lackierverfahren selten möglich ist.

### **1.2. PUR - ein facettenreiches Material**

Es besteht die Möglichkeit unterschiedliche Schichtdicken im Polyurethan-Beschichtungsprozess bei der Lackierung im Werkzeug (LiW) zu realisieren. Typischerweise werden Schichten mit Dicken zwischen 200 µm und 1 mm umgesetzt. Oberflächendefekte des Kunststoffteils können so teilweise kaschiert werden, wie z.B. Bindenähte. Den zahlreichen Trends folgend, stehen Produkte mit Oberflächendesigns in Piano-Black-Optik vermehrt im Fokus des Designs, was durch das Fluten im Werkzeug sehr gut realisiert werden kann. Es wird somit eine zusätzliche Hochwertigkeit erreicht.

Die Eigenschaften der dafür verwendeten Systeme lassen sich auf vielfältige Weise einstellen. Beispielsweise können die Lacke weiche oder harte Oberflächen aufweisen. Auch können sie hinsichtlich der Kratz- oder Chemikalienbeständigkeit modifiziert oder mit Selbstheilungseffekten ausgestattet werden. Beides ist in Kombination mit den unterschiedlichsten Träger-Materialien wie z.B. Kunststoff – auch Folien hinterspritzt - oder Holz möglich.

Insbesondere die exakte Abformung der Oberfläche ermöglicht neue Designs, welche mit klassischer Lackiertechnik oder anderen Verfahren so nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand herstellbar waren.

Mit dem Lackieren im Werkzeug ist es nun möglich, matte Oberflächen in scharfer Abgrenzung zu hochglänzenden Oberflächen zu positionieren, erhabene oder vertiefte Schriftzüge, Symbole oder Logos zu realisieren bis hin zu vollflächigen Strukturen und partiellen Lackierungen.

### **1.3 Verfahrensablauf „Lackieren im Werkzeug“**

Für das Lackieren bzw. Überfluten der Bauteile wird eine PUR-Anlage, eine Spritzgießmaschine mit spezieller Schnittstelle sowie ein Spritzgießwerkzeug mit mind. zwei Kavitäten benötigt. Zunächst erfolgt die klassische Herstellung des Spritzgussbauteils in der ersten Kavität des Werkzeuges.

Während das Kunststoffformteil bzw. der Kunststoffträger hergestellt wird, zirkulieren die beiden Komponenten in getrennten Kreisläufen vom Behälter zum Mischkopf und wieder zurück. Hierbei stehen die Komponenten unter hohen Drücken von ca. 170 - 220 bar.

Zunächst wird ein Kunststoffbauteil konventionell spritzgießtechnisch hergestellt. Danach wird dieses in eine zweite, erweiterte Kavität umgesetzt, welche die Beschichtungsdicke und Oberflächenstruktur vorgibt. Dies kann mithilfe eines Schiebetisch-, Drehtellers oder Würfelwerkzeuges geschehen.

Um die im Vergleich zu Kunststoffen niederviskosen Materialien homogen miteinander vermischen zu können, werden dann die beiden Komponenten Polyol und Isocyanat unter hohen Geschwindigkeiten im Gegenstrom vermischt und durch einen hydraulisch betätigten Steuerstößel injiziert. Nach Ablauf der benötigten Härtezeit des PUR-Systems kann das fertige Bauteil entformt werden.

### **1.4 Anwendungsgebiete LiW**

Ein Anwendungsbereich der PUR-Materialien ist hierbei die Automobilbranche. In dieser finden Polyurethane in unterschiedlichen Formen wie z.B. in Form von Schaumstoffen, Klebern oder Lacken Verwendung. Im Interieur-Bereich werden Zierleisten aus verschiedenen Hölzern, Mittelkonsolenabdeckungen oder Kunststoffteile bereits seit längerem mit Polyurethan beschichtet. Diese erlangen durch die Beschichtung mit einer haptischen oder optischen Schicht aus einem PUR-Gießlack besondere Eigenschaften und Funktionen. Eine haptische

Schicht soll dem Formteil mit einer meist dickeren, strukturierten Beschichtung eine andere, durchaus bestimmte Haptik verleihen.

Ein Beispiel hierfür ist eine lederähnlich, weiche Oberfläche. Angewandt wird dies bei verschiedenen Abdeckungen im Innenraum von PKWs.

Aktuell werden überwiegend transparente Lacksysteme eingesetzt, die zusammen mit der Grundfarbe des Kunststoff oder durch Folien Hinterspritzung zu einem farbigen System werden – z.B. schwarze Bauteile für die so populäre Piano-Black Optik. Interessant ist hierbei, dass trotz der Transparenz Oberflächenfehler am Bauteil zu einem gewissen Anteil kaschiert werden. Grundsätzlich sind auch farbige PUR-Systeme möglich. Dazu kann die PUR-Komponente eingefärbt werden, was jedoch eine Anlagenreinigung für einen Farbwechsel so aufwändig gestaltet, dass dies in der Praxis eher selten eingesetzt wird. Es besteht auch die Möglichkeit die Einfärbung über eine dritte oder bei Bedarf vierte Komponente direkt am Mischkopf zu injizieren, was eine wesentlich charmantere, aber, hinsichtlich der zu tätigen Investitionen, auch teurere Lösung darstellt.

Werden Investkosten und Platzbedarf miteinander für eine Neuinstallation verglichen, ist die PUR-Technik gegenüber der Lackiertechnik als klarer Sieger zu bezeichnen.

Im Hinblick auf die ökologische Verwendung von Rohstoffen und einem üblichem Oversprayanteil von bis zu 80% in der Lackiertechnik kann auch hier die PUR-Technik im Optimalfall mit einem Nutzungsgrad von nahezu 100% aufwarten.

Die Systematik der selbstheilenden Oberflächen bei der Verwendung PUR-Systemen gegenüber feinen Kratzern, macht das System zusätzlich auch aus Kundensicht attraktiv und unterstützt die Nachhaltigkeit.

## 1.5 Werkzeug

Um das hergestellte Kunststoffteil möglichst effizient und schnell in eine zweite größere Kavität umzusetzen, stehen verschiedene Lösungen bereit. Hier sollte schon zu Beginn der Planung darauf geachtet werden, welche Art von Werkzeug für das Formteil sinnvoll und wirtschaftlich erscheint. Die Möglichkeiten eines Schiebetisch-, Wendeplatten-, Würfelwerkzeuges oder adaptierten Drehtellers sind auf unterschiedliche Losgrößen ausgelegt. Verschiedene auf den PUR-Werkzeugbau spezialisierte Unternehmen bieten hier konkrete Lösungen an.

Polyurethan ist im Gegensatz zum thermoplastischen Kunststoff ein äußerst niederviskoses Material. Hierdurch muss bei der Werkzeugauslegung besonders auf eine ausreichende,

jedoch nicht zu groß gewählte Entlüftung geachtet werden. Bei zu groß gewählter Entlüftung kann das niedrigviskose Polyurethan in die Trennebene und die Entlüftungskanäle gelangen. Fehlerbilder wie bei thermoplastischen Kunststoffteilen können somit entstehen (Schwimmhäute). Die Komplexität eines PUR-Werkzeugs ist ähnlich der zur Herstellung von Werkzeugen für die Silikonverarbeitung und erfordert einen spezialisierten Werkzeugbau.

Da die üblichen Hochgeschwindigkeits-Mischköpfe ein Mindest-Dosiervolumen benötigen, ist zudem auf die Kavitätsgröße zu achten. Wenn die Bauteilgröße/Anzahl der Kavitäten kein ausreichendes Schussvolumen gewährleisten können, muss mit einer entsprechenden Überlaufkavität gearbeitet werden.

## **1.6 Trennmittel**

Trennmittel sind in der Polyurethanverarbeitung unerlässlich, egal ob interner oder externer Art, da es sonst zu massiven Anhaftungen und Ablagerungen im Werkzeug führen kann. Verwendet werden deshalb Trennmittel, welche die Anhaftung des Polyurethans an der Werkzeugwand verhindern. Diese bilden eine geschlossene Trennschicht zwischen PUR und Werkzeugwand. Wie bereits erwähnt, werden Trennmittel in innere, die größtenteils in der Polyol-Komponente enthalten sind und äußere, die mit Sprühpistolen oder Pinsel auf die Werkzeugoberfläche aufgetragen werden, aufgeteilt. In manchen Fällen reicht es jedoch nicht aus, interne Trennmittel zu verwenden, wodurch äußere Trennmittel zusätzlich oder hauptsächlich eingesetzt werden müssen. Diese reichen hin von Sprays, die eine dünne Schicht zwischen Werkzeugwand und PUR-Schicht bilden, bis hin zu Werkzeugbeschichtungen. Jedoch halten diese auch nur einer begrenzten, wenn auch vergleichsweise höheren Stückzahl stand. Die Anforderungen an PUR-Trennmittel sind hoch, was die Gestaltung geeigneter PUR-Systeme für die Serienfertigung schwierig gestaltet. Zum einen soll die Wirkung des Trennmittels zuverlässig wie effektiv sein, andererseits soll eine gute Haftung der PUR-Schichten am Substrat realisiert werden. Hier muss seitens des Herstellers und des Verarbeiters ein Kompromiss gefunden werden, bei dem das Trennmittel die Anhaftung am Träger nicht behindert, jedoch eine ausreichende Haftung der Beschichtung gewährleistet werden kann. Zusätzlich dazu soll das Trennmittel keinen Einfluss auf die Beständigkeiten der Lackierung gegen Medien oder Prüfsubstanzen haben.

## **1.7 Zykluszeit**

Da es sich bei Polyurethan-Beschichtungen um Reaktionsgießharze handelt, brauchen diese eine gewisse Zeit zum vollständigen Aushärten. Aus diversen Versuchen wurden Aushärtezeiten nach Herstellerangaben von ca. 30-150 Sekunden ermittelt. Die daraus resultierenden

Zykluszeiten in Kombination mit verschiedenen Kunststoffen lagen in einem Bereich von ca. 70 – 190 Sekunden. Hier wird von den Herstellern der Lacksysteme eine kontinuierliche Reduzierung der Aushärtezeit angestrebt. Die Reaktionsgeschwindigkeit sollte jedoch an die limitierenden Parameter der Maschine angepasst werden bzw. diese nicht über- oder unterschreiten.

### **1.8 Lackierung vs. Lackieren im Werkzeug**

Möchte man die hergestellten Kunststoffbauteile nachträglich lackieren, so muss eine makellose, sprich glatte und saubere Oberfläche vorliegen, um später eine fehlerfreie Lackierung zu erhalten. Wurde die Oberfläche keiner Vorbehandlung unterzogen und nicht von Unebenheiten und Kontaminationen befreit, bildet die nachträgliche Lackierung diese Fehler aus. Wo vorher Verunreinigungen waren, sind diese nach dem Lackieren mittels Sprühapplikation ebenfalls vorzufinden. Im Gegensatz dazu wird bei der PUR-Lackierung die Oberfläche durch Transport oder Umlagerung nicht kontaminiert. Weiterhin kann eine unebene raue Oberfläche mit dem klaren Vergussmaterial egalisiert werden, da die Qualität der PUR-Oberfläche durch die Rauheit, Struktur und Maße der Werkzeugwand bzw. des Werkzeuges vorgegeben wird.

### **1.9 Weitere Untersuchungen**

Das Kunststoff-Institut Lüdenscheid widmet sich innerhalb des Firmengemeinschaftsprojekts „Oberflächenbehandlung von Kunststoffformteilen“, mit über 30 teilnehmenden Projektpartnern, u.a. dem Thema Lackieren im Werkzeug. Seit 2014 werden in dem Projekt Grundlagen zu dieser Technologie erarbeitet, Prüflinge aus unterschiedlichen Materialkombinationen (Kunststoff-/Lacksystem) hergestellt und ausgewählte Automobilprüfungen genutzt, um die Performance der so hergestellten Bauteile zu überprüfen. In der aktuellen Projektperiode sollen antiadhäsive Werkzeugbeschichtungen ermittelt werden, um die Verwendung von Trennmitteln nach Möglichkeit zu eliminieren. Des Weiteren werden die Möglichkeiten der Strukturabformung im Spritzgießwerkzeug untersucht und die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur konventionellen Lackierung auf den Prüfstand gestellt.

## 2. Qualifizierung / Prüftechnik

Die Automobilindustrie stellt besondere Ansprüchen an eine beschichtete Kunststoffoberfläche. Im Rahmen der Qualifizierung müssen mit verschiedenen Testmethoden Kratz- und Abriebbeständigkeit, Resistenz gegen chemische Angriffe, klimatische Widerstandsfähigkeit, Bewitterungsresistenz sowie gesundheitliche Unbedenklichkeit (Emissionen) bewiesen werden. Beschichtete Kunststoffflächen werden zudem Haftfestigkeitsprüfungen unterzogen.

Allgemein können die Eigenschaften und die Qualifizierung einer Oberfläche durch vier Hauptfaktoren beschrieben werden: die optische Erscheinung, die Funktion einer Oberfläche, die haptischen Eigenschaften und die Beständigkeit gegen äußere Einflüsse (Bild 1).

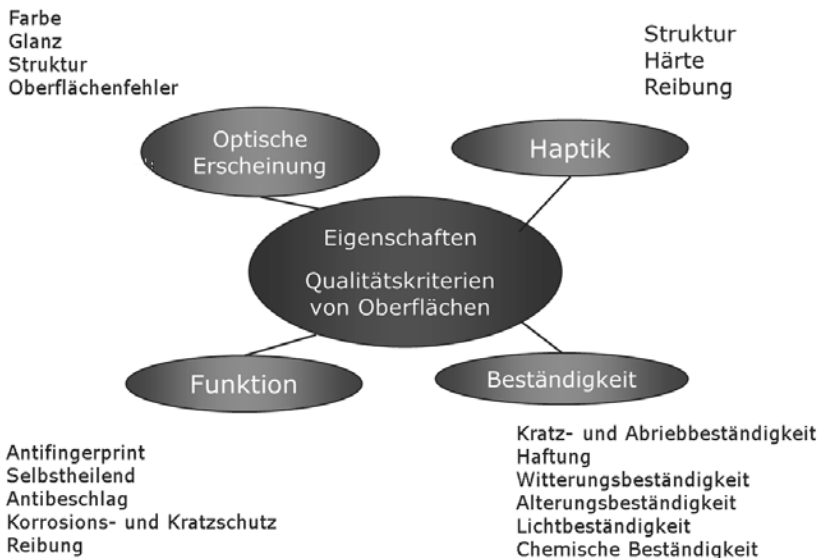


Bild 1: Qualitätskriterien von Oberflächen

Darüber hinaus müssen die ästhetischen Ansprüche des Kunden erfüllt werden. Hieraus resultiert die Anforderung zur Überprüfung der Haptik, der Konstanz und dem Erhalt des Farbtons und Glanzgrades sowie des optischen Eindrucks insgesamt mit Hilfe von standardisierten Verfahren, die möglichst reproduzierbare und vergleichbare Resultate liefern. Die vielfältigen Möglichkeiten sowohl der Art der Belastung als auch der Art der Beurteilung spiegelt sich in der Fülle und dem Facettenreichtum der etablierten Prüfverfahren wieder.

## 2.1 Prüfnormen

DIN EN ISO-Normen enthalten häufig lediglich Rahmenbedingungen, unter denen eine bestimmte Prüfung anzuwenden ist - es herrschen große Spielräume. Automobilstandards beinhalten häufig mehr Details zum Prüfungsaufwand. Jeder Hersteller besitzt einen eigenen Werksnormenkatalog, in dem die für die OEM verbindlichen Prüfungen zur Qualifizierung eines Artikels dargelegt sind. Spezielle Anforderungen an Bauteile im Automotive-Bereich werden durch darauf zugeschnittene Prüfvorschriften abgefragt. Einige Automobilstandards basieren auf DIN (EN-, ISO-) Normen, manche wurden unter dem Dach des VDA gemeinsam erarbeitet, andere sind wiederum vollkommen eigenständig entwickelt worden. Beispielhafte Werksnormen für lackierte Kunststoffteile sind die VW-Norm TL 226 (TL = Technische Liefervorschrift) und die Daimler-Benz-Norm DBL 7384 (DBL: Daimler-Benz-Liefervorschrift).

Am Beispiel der VW-Norm wird deutlich, in welchem Umfang Oberflächenprüfungen durchgeführt werden können (Bild 2).

TL 226 VW AG					
Prüfung	Norm	Auswertung	Prüfung	Norm	Auswertung
Farbe und Glanzgrad	VW 50190	Erstmusterprüfbericht	Lichtehttheit	PV 1303 Bedingungen je nach Position des Bauteils	keine Veränderung u. a. nach Graumaßstab Haftungs- und Kratzprüfung
Freibewitterung	VW 50185	Lacksystem	Hydrolyselagerung	Wärme und sehr hohe Luftfeuchte 40°C // ≥ 96 % rel. LF	keine Veränderung der Farbe und Haptik Haftungs- und Kratzprüfung
Haftung	Gitterschnitt DIN EN ISO 2409 Anforderung: Gt ≤ 1	alternativ Kreuzschnitt Anforderung: keine anhaftenden Lackpartikel	Sonnenlichtsimulation	DIN 75220	keine Veränderung der Farbe und Haptik Haftungs- und Kratzprüfung
Kratzbeständigkeit	PV 3952 Anforderung: kein Aufreißen der Lackierung	alternativ Erichsen-Härte Anforderung: kein Aufreißen der Lackierung	Abrieb trocken Abrieb feucht Abrieb gegen Reinigungsmittel	PV 3906; Crockmeter	keine Veränderung der Oberfläche; das verwendete Reibgewebe Graumaßstab GM ≥ 4
Wärmelagerung	Umluft-Wärmeschrank Bedingungen je nach Position des Bauteils	keine Veränderung der Optik und der Haptik; Haftungs- und Kratzprüfung	Beständigkeit gegen Reinigungsmitteln und synthetischem Schweiß	Tropfentest	keine Änderung des Lackfarbtons, des Glanzes und der Lackstruktur
Klimawechseltest	PV 1200, PV 2005	keine Veränderung der Optik und der Haptik; Haftungs- und Kratzprüfung	Cremerbeständigkeit	PV 3964	Keine Farb- oder Haptikänderungen; Glanzzunahme ist erlaubt; Haftungs- und Kratzprüfung
Kondenswasser-konstantklima	Durchführung: DIN EN ISO 6270-2	Beurteilung der Blasenbildung; Haftungs- und Kratzprüfung	Scheuerfestigkeit für Hochglanzoberflächen	PV 3975 (für Volkswagen)	Restglanz

Bild 2: Kurze Zusammenfassung des möglichen Prüfungsaufwands und der Beurteilung am Beispiel der VW TL 226

Dabei ist die Umsetzung einer OEM-Norm alles andere als trivial und transparent zu bezeichnen: Es existieren viele Querverweise zwischen Normen und die Prüfverfahren müssen kombiniert und zeitlich koordiniert werden. Welche Prüfung jeweils angewendet werden

muss bzw. welches Prüferesultat als bestanden gilt, ist abhängig von Material, dem Bauteil selbst, der Position im Fahrzeug und der Belastungssituation. Zudem ist die Anwendbarkeit von Prüfungen abhängig von der Bauteilgröße und Geometrie, sodass entweder die Prüfung abgewandelt werden muss (z.B. Andreas-Kreuz statt Gitterschnitt) oder Testplatten verwendet werden müssen, deren Vergleichbarkeit mit den Originalbauteilen jedoch nur als eingeschränkt bezeichnet werden darf.

Als besondere Hürde ist zu benennen, dass nicht jedes Unternehmen auch jede Prüfung selbst durchführen darf. So gibt es in Abhängigkeit des OEMs Vorgaben hinsichtlich der Akkreditierung von Laboren nach ISO 17025 - welche wieder in der Unternehmenszertifizierung nach TS 16949 bereits vorgegeben ist - bis hin zu speziellen Freigaben für besondere Prüfungen, wie z.B. die Teilnahme an einem speziellen Ringversuch oder auch eine OEM-spezifische Zertifizierung. Leider erfolgt die Angabe, welche Qualifikation erforderlich ist, in der Regel auch nicht in den Spezifikationen selbst, sondern in separaten Dokumenten, die wie die Normen ebenfalls kontinuierlichen Änderungen unterliegen.

## 2.2 „Einfache“ Tests

Vermeintlich einfache Tests wie z.B. der Gitterschnitt sollen eine schnelle Beurteilung der Oberflächenqualität vor und nach Belastungen ermöglichen.

Vor der Durchführung ist es wichtig, dass trotz des einfachen Handlings bei der Prüfung die Bauteile vorkonditioniert werden, damit gewährleistet ist, dass z.B. Lacksysteme auch vollständig ausgehärtet sind. Am Beispiel von VW und Daimler gibt es bei der Vorkonditionierung in den Vorgaben diverse Unterschiede. Beide Automobilhersteller ermöglichen vor einer Prüfung eine Schnellkonditionierung durch 48 h Warmlagerung bei 60 °C. Einige Hersteller geben optional oder verpflichtend eine Konditionierung von 7 Tagen bei Raumtemperatur vor. Damit soll gewährleistet werden, dass nach der Lackierung alle Lösemittel verdunstet und dadurch die End Eigenschaften des Systems erreicht werden.

Vor einer Haftfestigkeitsprüfung wird die zu prüfende Oberfläche üblicherweise gereinigt. Hierzu eignet sich ein Gemisch aus Isopropanol und Wasser (Verhältnis 1:1) aber auch Reinigungsmittel (Tenside). Von aggressiveren Reinigungsmitteln ist abzuraten, es können nicht sichtbare Oberflächenschäden wie Mikrorisse entstehen. Im Anschluss kann der Gitterschnitt eingebracht werden. Hier variieren die Anzahl der Schnitte, der Schnittabstand und die Klingengeometrie. Lässt die Geometrie des Bauteils es nicht zu, einen Gitterschnitt durchzuführen, dann sollte ein sogenanntes Andreaskreuz bzw. ein Kreuzschnitt eingebracht werden. Der Kreuzschnitt wird mit einer scharfen, dünnen Klinge bis in das Substrat geschnitten (z. B.

Sicherheitsmesser mit Trapezklinge). Der kleine, spitze Winkel des Andreaskreuzes ist besonders empfindlich gegen das Aufreißen der Beschichtung. Nach dem Entfernen von überflüssigem Material mittels Bürste wird ein definiertes Tesa-Gewebeband aufgebracht und ruckartig abgerissen.

Zur Auswertung des entstandenen Schadenbildes kann die Einstufung in Gitterschnittklassen verwendet werden (Abbildung 3). Hierbei sollte nicht nur die beschichtete Oberfläche sondern auch das abgezogene Tesa-Gewebeband betrachtet werden.






Gitterschnitt-Kennwert	Beschreibung	Aussehen der Oberfläche im Bereich des Gitterschnittes, an der Abplatzung aufgetreten ist (Beispiel für sechs parallele Schnitte)
0	Die Schnittländer sind vollkommen glatt; keines der Quadrate des Gitters ist abgeplatzt.	
1	An den Schnittpunkten der Gitterlinien sind kleine Splitter der Beschichtung abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche nicht größer als 5 % der Gitterschnittfläche.	
2	Die Beschichtung ist längs der Schnittländer und/oder an den Schnittpunkten der Gitterlinien abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 5 %, aber nicht größer als 15 % der Gitterschnittfläche.	
3	Die Beschichtung ist längs der Schnittländer teilweise oder ganz in breiten Streifen abgeplatzt, und/oder einige Quadrate sind teilweise oder ganz abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 15 %, aber nicht größer als 35 % der Gitterschnittfläche.	
4	Die Beschichtung ist längs der Schnittländer in breiten Streifen abgeplatzt, und/oder einige Quadrate sind ganz oder teilweise abgeplatzt. Abgeplatzte Fläche größer als 35 %, aber nicht größer als 65 % der Gitterschnittfläche.	
5	Jedes Abplatzen, das nicht mehr als Gitterschnitt-Kennwert 4 eingestuft werden kann.	-

Bild 3: Gitterschnittklassen nach DIN ISO 2409 [1]

In der Regel werden ausschließlich Ergebnisse, die im Bereich der Gitterschnittklasse 1 und besser liegen, akzeptiert. Schlechtere Ergebnisse müssen nachgeprüft werden ggf. müssen auch diese Ergebnisse dem OEM vorgestellt werden.

Je nach OEM-Spezifikation und Bauteil sind sowohl Mehrschneidengeräte als auch Cutter-Messer zugelassen. Diese verfügen jedoch häufig über andere Geometrien und erzeugen somit auch andere Schnitte.

Obwohl viele Randbedingungen der Prüfungen eindeutig festgelegt sind, handelt es sich um eine Prüfung, die stark von der Vorgehensweise des jeweilig Prüfenden abhängt:

- Prüfkraft
- Kontinuität des Schneidvorgangs
- Parallelität/Rechtwinkeligkeit der Schnitte
- Klebekraft des Klebebands
- Applikation und Abreißen des Klebebands (Kraft, Geschwindigkeit, Winkel)
- Interpretation des entstehenden Musters

Als wichtiger Aspekt muss auch benannt werden, dass der Gitterschnitt so auszuführen ist, dass die Beschichtung nur eben durchdrungen wird und die Bauteiloberfläche frei legt.

Somit darf hier nicht – wie in der Praxis häufig üblich - mit „Maximalkraft“ tief ins Substrat geschnitten werden, da sonst nicht vergleichbare Ergebnisse zu erwarten sind.

Im Hinblick auf die Betrachtung von unterschiedlichen Beschichtungen sollte noch erwähnt werden, dass bei weichen Softtouch-Lacken eher glatte Ränder an den Schnittkanten erzeugt werden (GT 0) als bei glasartig, spröden, kratzfesten UV-Monocure Lacken (eher GT 1). Hieraus zu interpretieren, dass die Haftfestigkeit bei Softtouch-Lacken grundsätzlich besser als bei UV-Lacken ist, wäre sicherlich eine falsche Schlussfolgerung.

Auch nicht unterschätzt werden dürfen der Einfluss der Luftfeuchtigkeit und auch die Bauteilreinigung, der die Gleitreibung/-wirkung verändert. Beim Gitterschnitt ist mit diesem Effekt subjektiv weniger zu rechnen, jedoch bei anderen Prüfungen, z.B. mittels Erichsen-Stab, konnten hier bereits gravierende Ergebnisänderungen in Untersuchungen am Kunststoff-Institut Lüdenschied festgestellt werden – und in den meisten Spezifikationen wird für die Durchführung der Erichsen-Prüfung kein Normklima vorgeschrieben.

Anhand dieser einfachen Beispiele, die beliebig erweitert werden könnten, muss somit die Empfehlung ausgesprochen werden, dass bei Vorliegen von abweichenden Ergebnissen oder auch bei unerklärlichem oder sporadischen Nichtbestehen von Tests, zunächst die Prüfbedingungen von Experten genau kontrolliert werden sollten, statt schon im ersten Schritt den Beschichtungsprozess und die Materialtauglichkeit in Frage zu stellen und zu verändern.

## 2.3 Neue Verfahren / Materialien

Vor eine besondere Herausforderung ist ein Unternehmen gestellt, wenn es ein neues Material entwickelt hat oder ein neues System einsetzen möchte und dieses für unterschiedliche OEMs qualifizieren lassen will, wie z.B. bei der Lackierung im Werkzeug.

Hierfür kommt häufig vom OEM die berechtigte Frage: „Habt ihr denn auch schon die Prüfung X bestanden?“ Die vollständige Qualifizierung nach eine OEM-Spezifikation ist jedoch als zeitaufwändig und kostenintensiv zu bezeichnen – häufig werden z.B. allein für die Bewitterungsprüfung 2-4 Wochen benötigt und es entstehen externe Kosten > EUR 10t pro OEM und System!

Zudem muss die vollständige Prüfspezifikation erneut abgeprüft werden, sobald an dem getesteten System Änderungen vorgenommen werden. Wenn keine speziellen Vereinbarungen getroffen wurden, kann es somit im Extremfall dazu kommen, dass ein neues System bereits beim Gitterschnitt im unbelasteten Zustand durchfällt aber die vollständige Spezifikation abgeprüft wird. Danach muss das Material verändert werden und der Aufwand entsteht erneut.

Um den Aufwand und auch das Risiko für diese Problematik der Unternehmen zu minimieren, hat die KIMW Prüf- und Analyse GmbH eine spezielle Systematik entwickelt. Hierzu wurde eine (nicht verkäufliche) Matrix erstellt, in der die Spezifikationen einer Reihe Automobil OEMs gelistet und systematisiert wurden.

Es wurden Gruppen im Bereich der grundlegenden Belastungsarten gebildet und es kann nun eine individuelle Prüfsystematik angeboten werden, die alle Kategorien umfasst und je nach Kundenwunsch die:

- zeitlich schnellste Abprüfung
- subjektiv kritischsten Einzelprüfungen
- eine möglichst breite Mischung verschiedener OEMs

darstellt.

Dabei können selbstverständlich auch Einzelkategorien zunächst ausgespart werden (z.B. Bewitterung, Emissionsprüfungen). Auch eine sinnvolle Reihenfolge und Haltepunkte bei Nichtbestehen einzelner Prüfungen sind individuell vereinbar.

Dadurch werden Anbieter von neuen Systemen zwar nicht befreit, ihr System zur endgültigen Zulassung bei einem OEM abschließend zu qualifizieren aber Sie erhalten zunächst einen Nachweis der Performance ihres Systems in Form eines unabhängigen Prüfberichts von einem akkreditierten Labor, mit dem sie zunächst bei verschiedenen OEMs vorsprechen können. Dadurch sollte beim OEM ein größeres Vertrauen geschaffen worden sein und sich Risiken/Kosten/Zeitaufwand beim Anbieter minimiert haben.

- [1] DIN EN ISO Norm Beschichtungsstoffe – Gitterschnittprüfung (ISO 2409:2013);  
Deutsche Fassung EN ISO 2409:2013



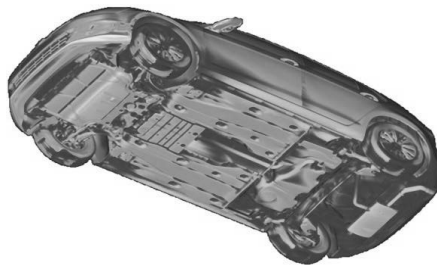
# Der Unterboden

## Ein unterschätzter Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung

O. Mende, Volkswagen AG, Wolfsburg

### Kurzfassung

Durch die zukünftige CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung werden Aerodynamik und Leichtbau von Kraftfahrzeugen stark an Bedeutung gewinnen. Dieser Vortrag beschreibt mögliche Potenziale im Bereich des Fahrzeugunterbodens und wie man diese mittels eines Materialbaukastens anforderungsgerecht realisieren kann. Dabei wird beschrieben, wie der Fahrzeugunterboden im Spannungsfeld Aerodynamik, Kosten und Leichtbau optimal ausgestaltet werden kann und welche Herausforderungen es dabei gibt.



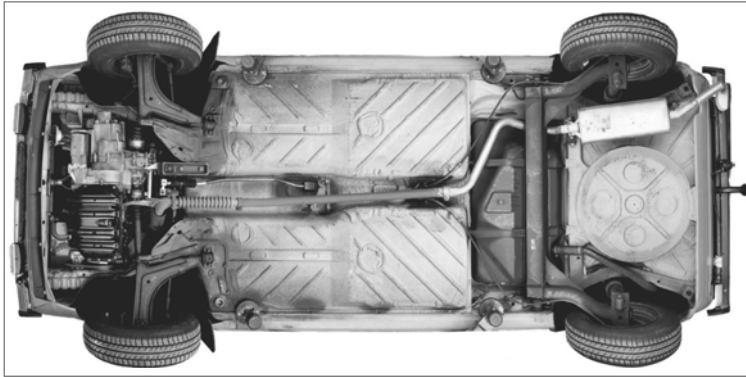
## 1. Geschichte des Unterbodens am Beispiel des Volkswagen Golf



### 1 Golf 1 bis Golf 7

Als 1974 der erste Golf vom Band lief, gab es noch keine speziellen Anforderungen hinsichtlich  $\text{CO}_2$ -Ausstoß an die Beschaffenheit des Unterbodens. Weder Aerodynamik noch Leichtbau wirkten sich direkt auf die Entwicklung aus. Die Aggregate lagen offen, der Bereich des Mittelbodens wurde aus Gründen des Korrosionsschutzes ausschließlich durch PVC geschützt.

Mit einem damals noch zeitgemäßen  $c_w$ -Wert von über 0,4 hatte der Golf 1 einen relativ hohen Luftwiderstand im Vergleich zu heutigen Fahrzeugen. Allerdings war er auch aufgrund geringerer Sicherheits- und Komfortanforderungen sehr viel leichter als heute üblich.



## 2 Unterboden Golf 1

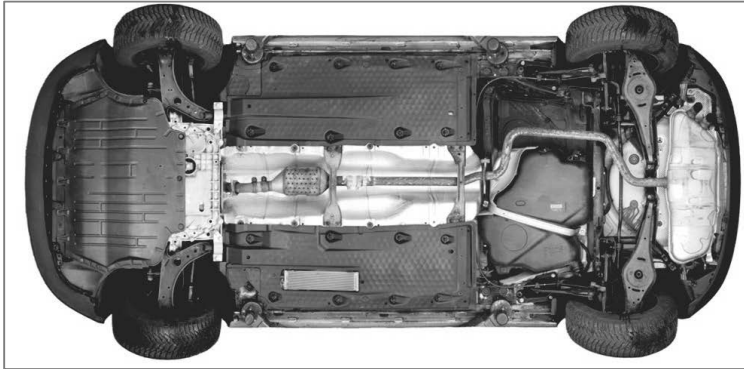
Aufgrund veränderter Randbedingungen und dem ständig steigenden Rohölpreis, wurde bei der Entwicklung des Golf 2 Wert auf eine verbesserte Aerodynamik gelegt. Der mittlere  $c_w$ -Wert von 0,34 zeigt, dass schon deutliche Anstrengungen unternommen wurden um den erhöhten Anforderungen gerecht zu werden.

Allerdings beschränkte sich der Fokus der Optimierungen allein auf den Bereich des Aufbaus. Mögliche Potenziale im Unterboden blieben noch ungenutzt. So blieb es auch im Golf 3.

Erste Optimierungen wurden mit der Entwicklung des auf der Plattform PQ34 basierenden Golf 4 realisiert, der 1997 in den Markt eingeführt wurde. Im Bereich der Aggregate wurden Kapselungen vorgenommen, um die Teile vor Umwelteinflüssen zu schützen. Als positiver Nebeneffekt wurde damit erstmals die Aerodynamik im Unterboden positiv beeinflusst. Je nach Umgebung und unterschiedlicher Wechselwirkungen, kann der Einfluss der Motorabschirmkapsel eine  $c_w$ -Verbesserung von bis zu 0,007 bewirken.

Die Plattform PQ34 wird bis heute in China produziert und wurde dabei mehrfach durch zusätzliche Bauteile aerodynamisch optimiert.

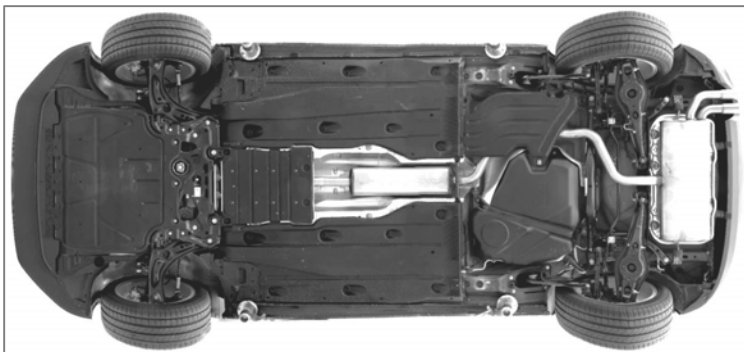
Ein deutlich besseres Bild zeigen dann der Golf 5, bzw. Golf 6, die technisch beide auf der Plattform PQ35 basieren. Hier sieht man große Verkleidungen im Bereich des Mittelbodens und bis zum Tank eine verhältnismäßig glatte Fläche.



### 3 Unterboden Golf 5 und GOLF 6 (PQ35)

Mit dem Golf 7 kam der modulare Querbaukasten (MQB) erstmals bei Volkswagen zum Einsatz. Hier sind schon Optimierungen bezüglich der aerodynamischen Eigenschaften, aber auch des Gewichts durch individuelle Materialauswahl erkennbar.

Die Bauteile des MQB kommen weltweit millionenfach marken- und klassenübergreifend zum Einsatz. So wird z.B. die Motorabschirmkapsel sowohl im Golf, als auch im Touran und Passat, aber auch im Audi A3 und Skoda Superb, etc. verwendet. Die fahrzeugspezifischen Anforderungen müssen dabei schon in der frühen Entwicklungsphase berücksichtigt werden, damit ein übergreifender Verbau möglich ist.

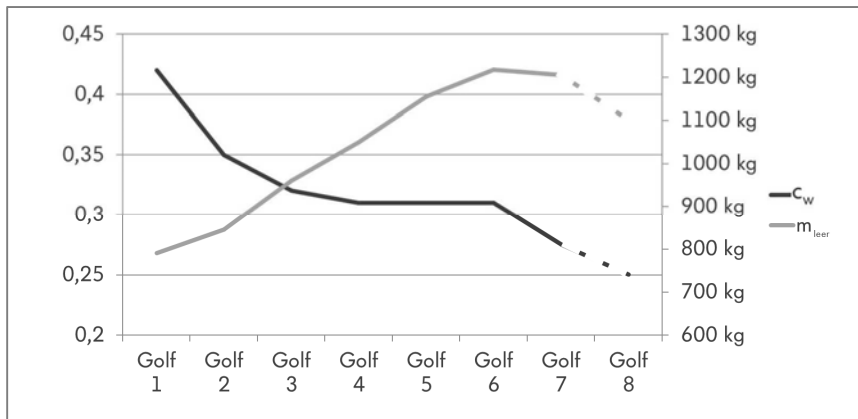


### 4 Unterboden Golf 7 (MQB)

Durch ständig steigende Anforderungen hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Ausstoß ist es nötig, immer größere Bereiche des Fahrzeugbodens abzudecken. Beim Touran und Passat sieht man heute schon nur noch relativ kleine Bereiche, die offen liegen.

Bis zum Golf 6 hat sich mit jeder Generation das untere Leergewicht deutlich erhöht. Der  $c_w$ -Wert stagnierte über viele Jahre. Erst mit dem Golf 7 zeigt die Statistik wieder geringere Werte.

Für zukünftige Neuentwicklungen erscheint es unerlässlich, jedes Potenzial im Unterboden zu nutzen. Mittlere  $c_w$ -Werte unter 0,25 werden in der Kompaktklasse erforderlich sein, um im Wettbewerb zu bestehen und die zukünftigen Gesetze zu erfüllen.

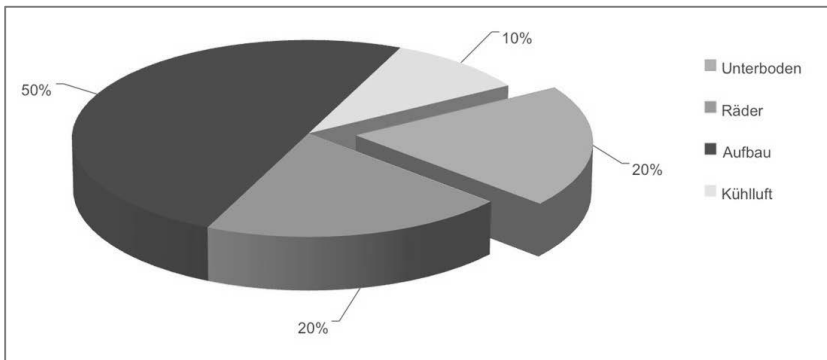


## 5 Verlauf Gewicht und Luftwiderstandsbeiwert

## 2. Einfluss des Unterbodens auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Fahrzeuges

Wenn man versucht, die Beitragsleister des  $c_w$ -Wertes zu ermitteln, stellt man fest, dass den größten Anteil der Aufbau mit ca. 50% ausmacht. Räder und Kühlluft kommen mit ca. 30% zum Tragen.

Den Unterboden schätzt man, je nachdem welche Grenzen gesetzt werden, mit ca. 20% ein. Das bedeutet bei einer Kompakt-Klasse, mit heute immer noch typischem Mittelwert  $c_w=0,3$ , einen Anteil von 0,06 oder 60/1000.



### 6 Aufteilung Luftwiderstand einer typischen Kompakt-Klasse

Untersuchungen zeigen, dass ein großer Anteil davon reduziert werden kann, wenn das Zusammenspiel aus Aufbau, Kühlluft ein- und austritt und Unterbodengestaltung optimal ausgenutzt wird. Zum Beispiel können Verbesserungen erreicht werden, wenn die Kühlluft gezielt in einem bestimmten Bereich des Tunnels ausströmt

Aus dem Rennsport ist bekannt, dass aerodynamisch optimierte Unterböden sehr großen Einfluss aufs Fahrverhalten haben. Zum Beispiel können sogenannte Diffusoren, die man aus Rennfahrzeugen kennt, bei geschickter Auslegung sowohl den Abtrieb erhöhen, als auch den Luftwiderstand senken.

Volkswagen hat mit dem XL1 gezeigt, was mit optimaler Gestaltung zu erreichen ist. Mit einem  $c_w$ -Wert von 0,186 führt er derzeit die Statistik für Serienfahrzeuge an.

Ab 2020 wird in der EU ein verschärfter Grenzwert zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß von Fahrzeugen gelten. Dabei gilt für die gesamte Flotte eines Herstellers, dass im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) nur noch 95g CO<sub>2</sub>/km ausgestoßen werden dürfen. Weitere Verschärfungen auch in anderen Märkten sind bereits angekündigt.

In der EU fallen bei Überschreitung des Grenzwertes empfindliche Strafzahlungen in Höhe von 95€ pro Gramm und Fahrzeug an.

Wenn beispielsweise ein Hersteller 1 Million Fahrzeuge verkauft und im Mittel 1g CO<sub>2</sub>/km überschreitet, beträgt die Strafe 95 Millionen Euro.

In einer typischen Kompakt-Klasse mit Dieselmotor gelten im NEFZ grob folgende Äquivalente:

$$1\text{g CO}_2/\text{km} \triangleq 0,015\text{ c}_w \triangleq 30\text{kg} \triangleq 0,04\text{l}/100\text{km}$$

Das heißt, eine c<sub>w</sub>-Verbesserung von 0,015 reduziert den CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Fahrzeuges um ca. 1 Gramm. Gleiches gilt für eine Gewichtsreduzierung von 30kg.

Wenn man annimmt, dass ein Fahrzeug eine Lebensdauer von 250.000km hat, werden durch die genannten Verbesserungen im Zyklus NEFZ 100 Liter Dieseldieselkraftstoff eingespart. Im Realverbrauch ist es entsprechend mehr.

Befindet man sich mit einem speziellen Fahrzeug nah an der Grenze zum CO<sub>2</sub>-Verstoß, können verbessernde Maßnahmen unter den genannten Randbedingungen wirtschaftlich sinnvoll sein.

Löst man die oben genannte Gleichung auf und setzt sie ins Verhältnis zu den Strafzahlungen, ergibt sich in engen Grenzen folgende Gleichung:

$$0,001\text{ c}_w \triangleq 2\text{kg} \triangleq 6\text{€}$$

Das bedeutet, dass es sich lohnen kann für eine Verbesserung des c<sub>w</sub>-Wertes von 0,001 oder eine Gewichtsreduzierung von 2kg bis zu 6€ pro Fahrzeug zu investieren.

Eine typische c<sub>w</sub>-Optimierung im Unterboden liegt zwischen 0,002 und 0,007, somit lohnt sich in diesen Grenzen fast jede Maßnahme, wenn man dadurch eine entsprechende Straf-

zahlung vermeiden kann. Wenn das worldwide harmonized light duty test procedure (WLTP) ab 2017 schrittweise eingeführt wird, nimmt der Einfluss der Aerodynamik aufgrund höherer Geschwindigkeiten im Fahrprofil noch mal um ca. 50% zu.

Es ist aber nicht nur aus Gesetzesgründen erforderlich, den Unterboden zu optimieren. Der Kunde erwartet bei Neufahrzeugen nicht nur ein gestiegenes Niveau an Sicherheit und Komfort, sondern vor allem einen niedrigen Kraftstoffverbrauch. Es gilt also bei jeder Fahrzeugneuentwicklung, ein Optimum aus Kosten, Gewicht, Robustheit, Aerodynamik etc. zu erreichen.

Wenn die CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung hinsichtlich Flottenverbrauch eines Herstellers in Zukunft schrittweise weiter verschärft wird, kann diese nur noch durch einen großen Anteil an elektrifizierten Fahrzeugen erfüllt werden. Elektrofahrzeuge werden aktuell mit einem Ausstoß von 0g CO<sub>2</sub>/km angerechnet, aber auch hier beeinflussen gut gestaltete Unterbodenverkleidungen die Aerodynamik und das Gewicht positiv.

Die Reichweite ist zurzeit einer der größten Kritikpunkte an diesen Fahrzeugen. Da Batteriezellen im Moment der Hauptkostentreiber sind, lohnt es sich hier noch mehr als bei konventionellem Antrieb über die hier beschriebenen Maßnahmen die Reichweite zu erhöhen, bzw. die Batteriekapazität zu reduzieren.

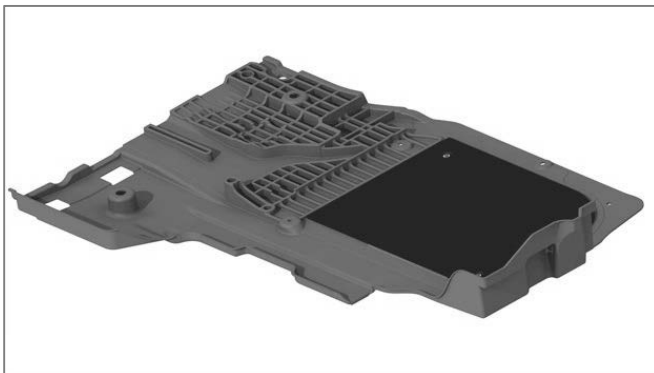
### 3. Entwicklung eines Materialbaukastens zur zielgerichteten Optimierung des Unterbodens

Je nach Anforderung an das jeweilige Bauteil im Unterboden gibt es verschiedene Materialien, die auf den Einsatzzweck optimiert sind. Kein Material funktioniert an jeder Stelle für jeden Einsatzzweck optimal.

In Abhängigkeit der Fahrzeuganforderungen gibt es eine Vielzahl möglicher Halbzeuge, die zur Auswahl stehen. Folgende Kriterien stehen dabei im Fokus:

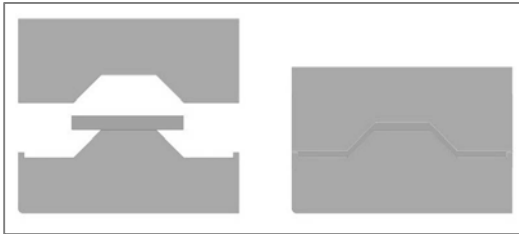
#### a) Robustheit

Beim Golf 7 GTE Plugin Hybrid wurde im Laufe der Entwicklung klar, dass die empfindliche HV-Batterie im Unterboden eine zusätzliche Schutzmaßnahme erforderlich macht. Das Gehäuse der Batterie besteht aus einer 3,5mm starken Aluminium Druckguss Legierung. Um verschiedenen Alltagstests vollumfänglich gerecht zu werden, wurde eine Verkleidung benötigt, die stärker sein musste, als eine einfache Polypropylen-Mischung. Als Lösung wurde ein Polypropylen mit 50% Glasfaseranteil in einer Wandstärke von 5mm gewählt und mit massiver Rippenstruktur verstärkt. Im Bereich der höchsten Belastung wird ein Glasgewebe eingelegt, um die Robustheit zusätzlich zu erhöhen.



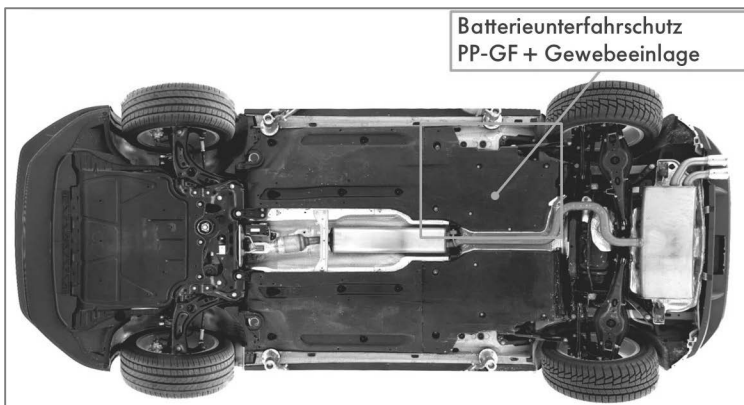
7 Batterieunterfahrschutz Golf GTE

Das Bauteil wird im Thermofließpressverfahren hergestellt, bei dem ähnlich des Schmiedens das Halbzeug massiv umgeformt wird.



## 8 Thermofließpressverfahren

Pro Seite wiegt der sogenannte Batterieunterschutz ca. 5kg. Ein vergleichbares Bauteil aus Stahl läge bei über 10kg und würde zusätzliche Korrosionsschutzmaßnahmen erfordern.



## 9 Unterboden Golf GTE (MQB PHEV)

Das Thermofließpressverfahren hat gegenüber Spritzguss den Vorteil der deutlich längeren Glasfasern (ca. 10mm statt unter 1mm). Man spricht hier auch von LFT (Long Fiber Thermoplastics)

Dieses Verfahren kommt beim MQB auch bei der Herstellung der Motorabschirmkapsel zum Einsatz. Allerdings ist diese nur 2mm stark und es wird kein zusätzliches Glasgewebe verwendet.

Auch hier wird LFT genutzt, um den Vorteil der höheren Steifigkeit gegenüber konventionellem Spritzguss zu nutzen.

## **b) Leichtbau**

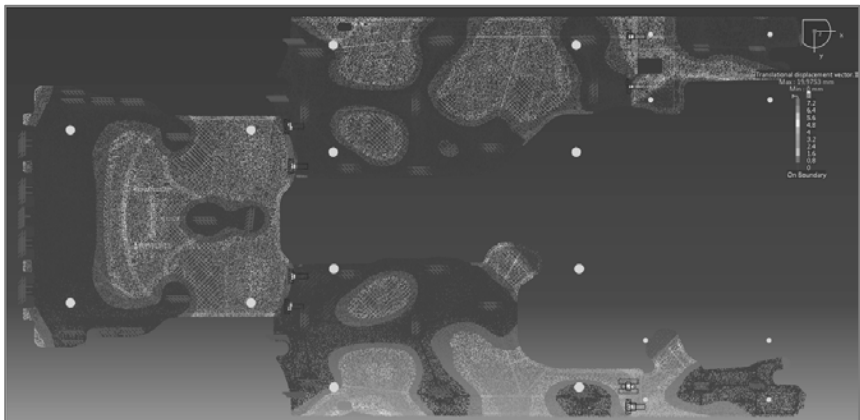
Normales Polypropylen mit Füllstoffen hat eine Dichte von ca.  $1,1\text{kg/dm}^3$ . Bei einer Materialstärke von 1,8mm im Mittel kommt man auf ein Flächengewicht von  $2\text{kg/m}^2$ .

Mit einem LWRT (Light Weight Reinforced Thermoplastic) ließe sich eine Gewichtseinsparung von bis zu 50% erzielen. Allerdings zu ca. 250% der Kosten eines Spritzgussbauteils.

Um die gleichen Gewichtsvorteile zu erreichen ohne dabei die vollen Mehrkosten inkaufnehmen zu müssen, setzt Volkswagen als erster OEM weltweit ein Leicht-GMT (glas matten thermoplast) ein, das im Touran Modelljahr 2015 zum Einsatz kommt. Dieses unterscheidet sich in der Herstellung von den konventionellen Verfahren. Ein mehrschichtiges Polypropylen mit vernadelten Glasfasern wird in einem Presswerkzeug in Form gebracht und anschließend mit dem Wasserstrahlschneidverfahren beschnitten.

Das Verfahren ist dem niederhalterlosen Tiefziehen in der Blechteilfertigung sehr ähnlich. Beim Touran wird dieses Material für die Mittelbodenverkleidungen verwendet. Das spart gegenüber konventionellem Spritzguss mehr als 1,5kg Gewicht pro Fahrzeug zu moderaten Mehrkosten.

Wenn moderne Leichtbaukunststoffe aus Kostengründen ausscheiden, ist Leichtbau trotzdem nicht unmöglich. Was in der Unterbodenentwicklung vor wenigen Jahren noch Neuland war, hat sich mittlerweile im Entwicklungsprozess fest etabliert: der Einsatz der Finiten Elemente Methode (FEM). Hierdurch ist es möglich die Bauteile gezielt hinsichtlich Wandstärken und Anbindungspunkten zu optimieren. Durch ständigen Praxisabgleich ist Volkswagen heute in der Lage sehr exakte Prognosen zu machen und dadurch sowohl leichtere Bauteile zu entwickeln, als auch Entwicklungsschleifen einzusparen. Dazu hat sich die FEM-Schnittstelle in CATIA V5 bewährt, die leicht von Konstrukteuren anzuwenden ist.



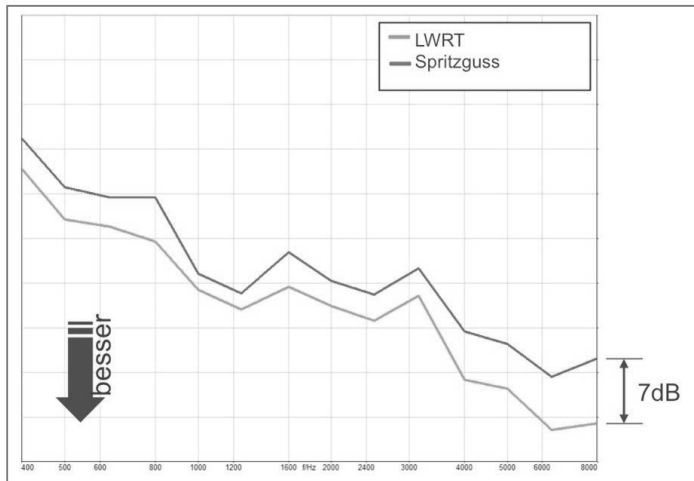
**10 FEM-Simulation eines Sets von Unterbodenverkleidungen**

### c) Akustik

Sind zusätzlich zum Leichtbau auch akustische Eigenschaften gefordert, z.B. für höhere Fahrzeugklassen, kann ein LWRT verwendet werden. Die Herstellung ist dem Leicht-GMT sehr ähnlich. Allerdings ist die Anfertigung des Halbzeuges aufwändiger. Je nach Lieferant werden PP-Fasern und Glas-Fasern miteinander vermischt und vernadelt und anschließend mit einem robusten PET-Deckvlies verklebt.

Bei der Bauteilfertigung stellen sich die Fasern auf und das Bauteil wird dadurch aufgebacken (=geloftet). Die Durchlässigkeit führt zu verbesserten akustischen Eigenschaften. Der Einsatz von LWRT hat sich mittlerweile ab B-Klasse aufwärts etabliert, da Kunden in diesen Fahrzeugklassen besonders hohe Anforderungen an die Akustik haben und auch bereit sind, die Mehrkosten zu tragen.

Beim Passat kommt seit dem Modelljahr 2014 in verschiedenen Ausstattungen LWRT zum Einsatz. Das reduziert die im Innenraum wahrnehmbaren Außengeräusche um bis zu 7dB, was für die Fahrzeuginsassen deutlich wahrnehmbar ist. Gegenüber der konventionellen Ausstattung spart der Einsatz außerdem über 2,5kg Gewicht.

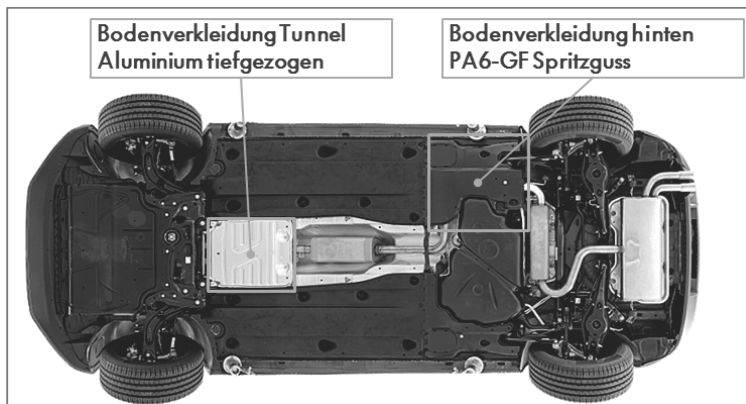


### 11 Durchschallungsmessung im Prüfstand

#### d) Temperaturbeständigkeit

An vielen Stellen im Fahrzeug können die vorher beschriebenen Materialien den hohen Betriebstemperaturen nicht standhalten. Die Abgasanlage wird in manchen Bereichen mehrere 100°C heiß. Im Golf 1 wurde durch den komplett offenen Unterboden ein ausreichender Luftdurchsatz, bzw. Kühlung erreicht. In modernen Fahrzeugen ist der Vorderwagen so stark verkleidet, dass die heiße Luft sich weiter hinten staut und so Temperaturen auftreten, die deutlich über den zulässigen Grenzwerten von PP liegen.

Um dieses Problem zu lösen gibt es verschiedene Ansätze. Im Bereich des Abgaskatalysators wird es so heiß, dass jeder übliche Kunststoff versagt. Deshalb setzt Volkswagen beim Touran erstmals eine tiefgezogene Aluminiumlegierung an dieser Stelle ein. Durch konsequente Nutzung von FEM konnte gegenüber dem alukaschierten Kunststoffteil aus dem Golf sogar eine Gewichtseinsparung erzielt werden.



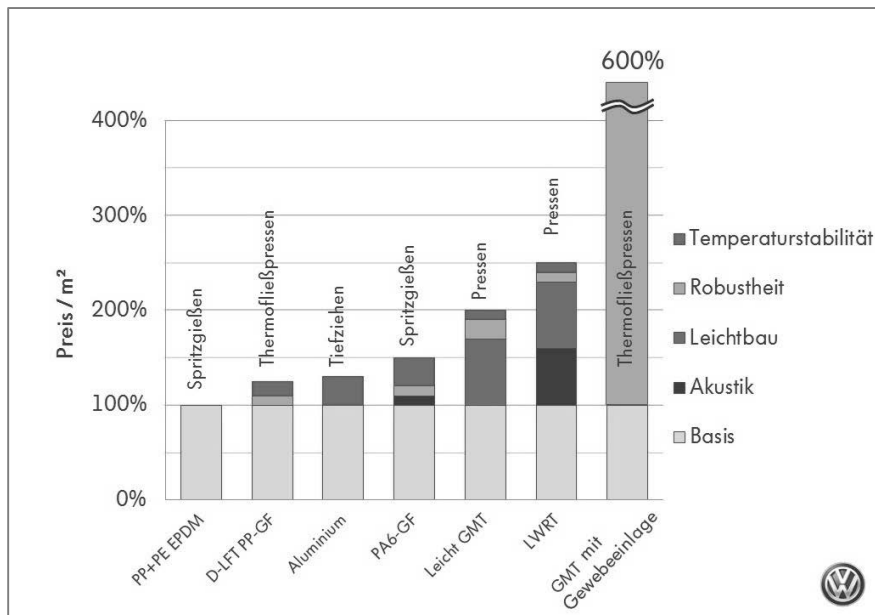
**12 Unterboden Touran MJ 2015**

Im hinteren Bereich des Touran sollte als  $c_w$ -Maßnahme die Abgasanlage abgedeckt werden. Hier schied Aluminium aus akustischen Gründen (Steinwurf) aus. Deshalb kommt hier ein schlagzähigkeitsoptimiertes Polyamid (PA) zur Anwendung, das sich durch eine deutlich erhöhte Temperaturbeständigkeit gegenüber PP auszeichnet. Als positiver Nebeneffekt ist PA auch deutlich steifer. Somit kommt man trotz der großen abgedeckten Fläche mit relativ wenig Anbindungspunkten aus.

## Kostentreiber

Je nachdem welche Eigenschaften gefordert sind, steht dem Entwickler also ein ganzer Baukasten an Materialien zur Verfügung.

Die Grafik zeigt wie die Eigenschaften die Kosten beeinflussen. Dargestellt sind die Kosten pro m<sup>2</sup> abgedeckter Fläche. In die Darstellung sind typische Materialstärken und Verstärkungen mit eingeflossen. Ein GMT mit Glasgewebe ist unter anderem deshalb so teuer, weil es mit bis zu 5mm vergleichsweise dick ausgelegt wird, um die hohe Robustheit zu erreichen. Zum Vergleich: Leicht-GMT wird typischerweise nur in 1,1mm entwickelt.



## 13 Kostentreiber im Vergleich

## Ausblick

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, kommt es bei der Unterbodenentwicklung auf viele Faktoren an. Sicher ist, dass die beschriebenen Anforderungen, insbesondere beim Thema CO<sub>2</sub>, bzw. Reichweite und Verbrauch, immer weiter steigen werden und es so unerlässlich ist, jedes bekannte Potenzial zu nutzen.

Um Volkswagen zukunftsfähig zu machen, laufen ständig Vorentwicklungen zur Optimierung aller Bauteile. In diesem Rahmen zeigte sich, dass auch mit verhältnismäßig wenig Aufwand und geringen Modifikationen weitere Verbesserungen der Aerodynamik und des Gewichts möglich sind.

Es erscheint realistisch mit geringen Mehrkosten eine aerodynamische Verbesserung von  $c_w$  bis zu 0,02 zu erzielen ohne dabei das Gewicht signifikant zu erhöhen.



### 14 optimierter Unterboden Golf 7

Wenn zusätzlich auch noch Leichtbau und Akustik zum Tragen kommen, kann trotz der größeren abgedeckten Fläche durch den Einsatz von Leicht-GMT und/oder LWRT sogar eine Gewichtseinsparung erzielt werden.

Wenn man die Annahmen aus Kapitel 2 berücksichtigt, werden durch diese Optimierungen bis zu 150 Liter weniger Kraftstoff im Fahrzeugleben verbrannt.

#### **4. Fazit**

In den nächsten Jahren wird es sich kein Fahrzeughersteller leisten können, auf die im Vortrag gezeigten Potenziale im Bereich des Fahrzeugunterbodens zu verzichten. Es ist also nicht die Frage, ob der Unterboden abgedeckt wird, sondern nur noch wie. Um in dem Spannungsfeld aus Kosten, Gewicht, cw, etc ein Optimum zu erzielen ist Volkswagen für die Zukunft gut präpariert.



# **Stoßfänger in Dünnwandtechnologie – ein Update zu Werkstoffen, Verfahren und Technologie-Innovationen**

Dipl.-Ing. **J. Götzelmann**, Magna Exteriors, Sailauf;  
Dipl.-Ing. **P. Diehl**, Magna Exteriors, Esslingen

## **Abstrakt**

Die Integration von Funktionen und somit die Anforderungen an Stoßfängerverkleidungen haben sich immer weiterentwickelt. Sie sind von einem eigenständigen System zur Vermeidung von Bagatellschäden, zum formintegrierten Stylingelement mit erweiterten Anforderungen an Aerodynamik, passive Sicherheit und Sensorik gewachsen. Hierdurch haben sich auch die Anzahl der zu integrierenden Bauteile stetig gesteigert. Vor allem bei den sogenannten Soft-noses, die Teile der Motorhaube und der Kotflügel substituiert haben, hat sich das Systemgewicht deutlich erhöht. Der Beitrag befasst sich mit dem Thema, wie durch neue, verbesserte Polypropylen-Typen (PP) mit höherer Fließfähigkeit und Steifigkeit nennenswerte Gewichtsreduzierungen durch Wandstärkenreduzierungen erzielt werden können. Natürlich sind die Lackierspezifikationen und die Qualitätsanforderungen an eine Class A-Oberfläche ohne Abstriche zu erfüllen. Daraus folgend wurden gezielt Neuentwicklungen in der Ultraschall-Schweißtechnik auf deren Anwendbarkeit in einer Serienfertigung untersucht und schließlich zur Serienreife weiterentwickelt.

## **Einführung**

### **1. Ganzheitliches Anforderungsmanagement an Stoßfängerverkleidungen**

Zunächst sind natürlich die Lastenheft-Anforderungen der OEMs zu erfüllen. Diese umfassen im Wesentlichen die Anforderungen an die Erfüllung der Lebensdauer am Fahrzeug. Dieses Kriterium gilt als erfüllt, wenn Deformationen der Stoßfängerverkleidung nach Klima und Vibrationsprüfungen auf ein akzeptables Niveau reduziert sind. Weiterhin sind als Lastenheft-

Anforderungen Klima- und Witterungsbeständigkeiten, Energieabsorption und der Beitrag der Stoßängerverkleidung zum aktiven und passiven Fußgängerschutz zu nennen.

Auch werden die Qualitätsmaßstäbe unserer Kunden immer anspruchsvoller. Die Einhaltung geringster Toleranzen und enger Grenzen bei Fugen- und Spaltmaßen stellen die Systemlieferanten vor immer größere Herausforderungen. Beim Außenstyling geht die Formensprache weiter in Richtung hoher Qualitätsanmutung, welche sich in kleinsten Radien und großen, relativ flachen Freiformflächen manifestiert.

Demgegenüber werden beim Lieferanten auf hohem Qualitätsniveau beherrschbare Prozesse gefordert. Hier stehen die Spritzguss-Technologie mit einfachen zu verarbeitenden Materialien und die Anwendungstechnik mit prozesssicheren Lackier- und Schweißverfahren im Fokus.

Darüber hinaus werden die Systemlieferanten seitens der Fahrzeughersteller aufgefordert, Beiträge zur Reduzierung der weiter ansteigenden Fahrzeuggewichte zu liefern.

## **2. Vorüberlegungen zum Leichtbau**

Aus der Vergangenheit sind Systeme bekannt, die eine Wandstärke von 2,0mm aufwiesen. Die Reduzierung der Wandstärke wurde hier mit einem leichtfließenden PC/PBT-Blend erreicht. Zur Aussteifung wurde im Anschluss an das Spritzgießen die Verkleidung vor dem Lackieren mit Polyurethan-Schaum hinterschäumt. Aufgrund der durch die Wandstärke von 2,0mm reduzierten Fließwege wurden seinerzeit diese Verkleidungen direkt auf die Sichtfläche angespritzt.

Auch eine jüngste Entwicklung eines japanischen Fahrzeugherstellers, ein Stoßängersystem in einer Wandstärke von 2,2mm in Serie zu produzieren, zeigt die prinzipielle Machbarkeit einer Wandstärkenreduzierung gegenüber der heute üblichen Auslegung auf eine Wandstärke von  $2,8 + 0,3\text{mm}$ .

Bisher entstanden mit den aktuellen, auf Lackhaftung optimierten PP-Typen, aufgrund deren relativ schlechten Fließfähigkeit über die Produktionsdauer allmählich Probleme durch Vergratungen an den Formtrennungen.

Grund hierfür ist der bei diesen schlechter fließenden PP-Typen für die Füllung benötigter höherer spezifische Spritzdruck. Im Verbund mit den beim Kaskaden-Spritzgießen entstehenden Druckspitzen verschleßen die Formtrennungen erheblich. Die dadurch entstehenden Flittergrate können zuverlässig nicht restlos entfernt werden. Hieraus resultiert, dass die Spritzgießwerkzeuge in der Produktion sehr häufig instand gesetzt, d.h. nachtuschiert werden müssen. Das führt über die Laufzeit zu einer je nach Geometrie erheblichen Reduzierung der Wandstärken in Richtung der Werkzeugöffnung. Insbesondere bei hohen Stückzahlen und den beispielsweise im Nutzfahrzeug längeren Modellzyklen wurden schon erhebliche Wandstärkenreduzierungen durch die Arbeiten der Forminstandhaltung gemessen.

Daher entstand auch hieraus die Forderung nach einer Materialweiterentwicklung hinsichtlich verbesserter Fließfähigkeit unter Einhaltung der spezifizierten Materialeigenschaften. Hier sind im speziellen die Lackhaftung, Reißfestigkeit und Tieftemperaturschlagzähigkeit zu nennen.

Neuere Materialentwicklungen gehen genau in diese Richtung. Da diese Modifikationen auch einen höheren Elastizitätsmodul aufweisen, entstand die Idee, die weitaus bessere Fließfähigkeit und die höhere Steifigkeit dieser neuen PP-Typen in Richtung Leichtbau auszunutzen.

### **3. Umsetzung in Prototypen**

Die Umsetzung dieser Idee, so war allen Beteiligten im Vorhinein klar, sollte durch ein Werkzeug entstehen, welches serienproduktionsfähig hinsichtlich Anspritzkonzept, Kühlung und mechanischer Auslegung sein muss. Ein Serienwerkzeug nach Ende der Serienproduktion umzubauen, kam nicht in Frage. Erstens hätte das einen erneuten Bemusterungsprozess für die Kundendienstfertigung notwendig werden lassen. Zweitens wären die Ergebnisse auf einen Fahrzeughersteller beschränkt gewesen. Deshalb wurde ein vorhandenes Serienwerkzeug auf 2,0mm umgebaut und es stand ein durch Serienheißkanal, Kühlung und Schiebermechanik abgesichertes erstes Serienwerkzeug mit Wandstärke 2,0mm zur Verfügung. Die somit gewonnenen Erfahrungen sollten uns später bei der Serienentwicklung neuer Fahrzeugverkleidungen Auslegungskriterien und Konstruktionsrichtlinien liefern.

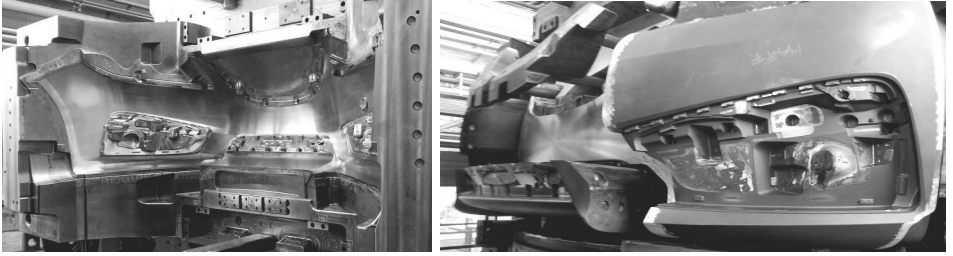


Bild 1: Serienwerkzeug 2,0mm Verkleidung Stoßfänger vorn

Dieses Werkzeug wurde nun zur Erreichung einer gleichmäßigen Wandstärke von 2,0mm aufwändig umgebaut. Die komplette Auswerferseite wurde nachgesetzt und im Schieberbereich großflächig aufgeschweißt. Die Simulation der rheologischen Vorgänge zeigte zudem, dass mit dem bestehenden Heißkanalsystem das Werkzeug mit den auf verbesserte Fließfähigkeit modifizierten PP-Typen problemlos auch bei 2,0mm zu füllen ist. (Bild).

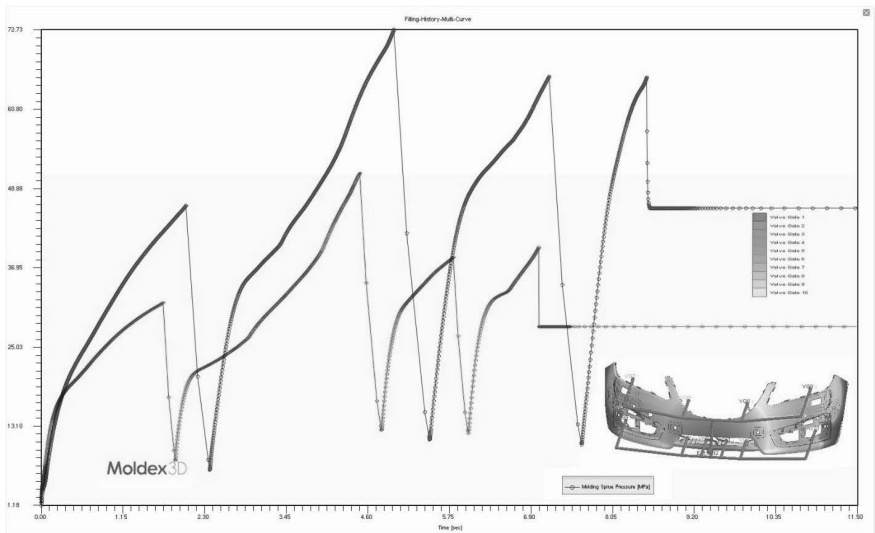


Bild 2: MOLDEX Druckverlauf Simulation Wandstärke 2,0mm (Rot) im Vergleich zur Originalwandstärke 2,8mm (Grün)

Die Auswahl der Materialien erfolgte breit angelegt. Alle Materialhersteller, der in Frage kommenden PP-Typen, wurden auf deren Materialvorschläge konsultiert. Es wurden auch mehrere Materialien eines Herstellers überprüft, da je nach OEM unterschiedliche Materialfreigaben existieren oder entsprechende Materialentwicklungen zur Erfüllung der Forderungen eines bestimmten OEM nicht immer mit Anforderungen anderer OEM kompatibel sind. Bei der Materialauswahl spielte auch die weltweite Verfügbarkeit eine Rolle. Da im amerikanischen und asiatischen Automobilmarkt andere Materialien für Stoßfänger zum Einsatz kommen, wurden in der Materialauswahl auch amerikanische und asiatische Materialien und deren Hersteller in einer Versuchsmatrix berücksichtigt.

Die Auslegung der Wandstärke auf 2,0mm entstand aus den folgenden Überlegungen: Erstens ist das der Beitrag zur maximalen Gewichtseinsparung und nach den Ergebnissen der rheologischen Simulation gerade noch für eine Serienproduktion vertretbar. Weiterhin ist diese Wandstärke hinsichtlich Abzeichnungen von Schiebern auf der Außenhaut kritisch, so dass hier bei den geplanten Verbesserungen der Schieberpassungen die sukzessiv erzielten Ergebnisse wesentlich aussagefähiger sind. Auch sind bei der 1:1-Substitution der mechanischen Werte aus dem Datenblatt Wandstärken in 2,0mm denkbar - nur leider erreicht man diese mechanischen Werte im realen Spritzgussbauteil durch Abbau der Molekülketten im Prozess nicht, wodurch 2,0mm zur Zeit nur theoretisch und hier als Extrembeispiel denkbar sind!. Da für größere Stückzahlen nach unserer Wirtschaftlichkeitsberechnung die optionale Ausstattung mit Abstandssensoren wirtschaftlich nur durch Schweißen erfolgen kann, wurden gezielt die hier neuentwickelten Verfahren wie torsionales Ultraschall- Schweißen (Abbildung) oder die Verschweißung mit 45° Ultraschall-Sonotroden (Abbildung) auf Machbarkeit bei 2,0mm-Wandstärke getestet. Und auch die Aspekte des Handlings in der Produktion können mit einem radikalen Ansatz im Vergleich zu einer Reduzierung um wenige Zehntel sehr viel besser bewertet werden.

Zusätzlich war eine derartige Wandstärkenreduzierung deswegen vertretbar, da die neuen PP-Typen im Vergleich zum Serienmaterial einen deutlich höheren Biege-E-Modul aufweisen (zwischen 30 und 55%). Die E-Module wurden in Fließrichtung und quer dazu im Biegeprüfverfahren an Probekörpern aus Bauteilabschnitten ermittelt. Aus der hier anzuwendenden Berechnung der Plattensteifigkeit wurde beispielsweise bei 50% höherem E-Modul bei gleicher Steifigkeit im Vergleich zum Serienbauteil mit 2,8mm eine mögliche Wandstärkenreduzierung auf 2,45mm ermittelt.

Ergebnisse

Der gemessene Gewichtsvorteil beträgt verglichen mit dem Originalmaterial 15%. Der rechnerische Wert bezüglich der Wandstärkenreduzierung von 28% wurde nicht erreicht, da das Bauteil im peripheren Bereich und an den Befestigungspositionen noch auf der Originalwandstärke belassen wurde. Außerdem haben High MFI PP-Materialien einen erhöhten Dichtewert, wodurch sich auch eine geringere Gewichtseinsparung verglichen zu „Standard“-PP-Typen ergibt! Die so entstandenen Bauteile wurden nun umfangreichen Prüfungen unterzogen.

Instrumentierter Durchstoßversuch (Tabelle):

Thickness	2.8mm	2.5mm	2.5mm	2.5mm	2.5mm	2.5mm	2.5mm	2.5mm
Testing								
T1) VEM ISO 6903-A2 (T=23°C)	1	1	1	1	1	1	1	1
Breaktype (1 - 9)	1	2	2	3	2	2	3	2
Energy @90% F-max	22.7	14.55	16.76	18.98	15.88	15.25	17.92	17.79
Energy S.D.	-	-	-	-	-	-	-	-
Force	N	1068	1380	1610	1902	1476	1464	1704
Force S.D.	N	-	-	-	-	-	-	-
Remarks:	-	-	-	-	-	-	-	-
T2) VEM ISO 6903-A2 (T= -30 °C)	1	1	1	1	1	1	1	1
Breaktype (1 - 9)	4	See Pictures	8	8	9	4	9	8
Energy @90% F-max	37.67	-	22.02	8.72	21.50	25.20	23.86	24.17
Energy S.D.	-	-	-	-	-	-	-	-
Force	N	3533	2483	2418	2505	2593	2704	2737
Force S.D.	N	-	-	-	-	-	-	-
Remarks:	-	No Result. Because sample isn't clamped it was pushed away by the impact of the dart.	-	-	-	-	-	-

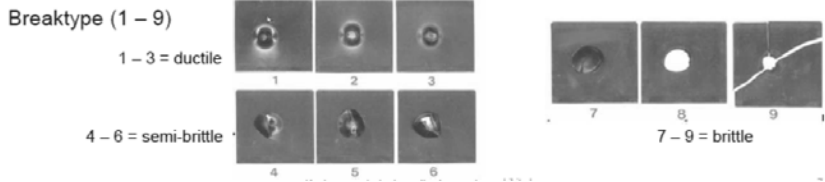


Bild 3: Instrumentierter Durchstoßversuch

Bei Raumtemperatur reagierten alle Probekörper noch duktil. Der Originalwerkstoff hat sich durch die Reduzierung von 2,8mm auf 2,0mm von Stufe 1 auf Stufe 2 nur geringfügig verschlechtert. Die Maximalkraft nahm bei Raumtemperatur im direkten Vergleich um 30% ab. Andere, deutlich steifere Typen fielen nur um 15% der gemessenen Kraft ab. Andere Ergebnisse wurden im Vergleich bei -30°C erzielt. Erwartungsgemäß schnitten hier alle auf 2,0mm reduzierten Probekörper mit sprödem Bruchbild ab. Während die Probe mit 2,8mm im Originalmaterial ein noch verhältnismäßig duktiles Bruchbild aufwies, sind fast alle Probekörper mit 2,0mm spröde gebrochen. Das Niveau der Maximalkraft hat sich um 25–30% reduziert. Lediglich ein Material eines amerikanischen Herstellers erreichte das Niveau des Originalwerkstoffs.

Hier handelt es sich um ein Material, welches für den amerikanischen Markt auf Tieftemperaturerschlagzähigkeit modifiziert wurde. Der gemessene Biege-E-Modul bewegt sich aber immerhin noch 10% über dem Niveau des Originalmaterials.

Ergebnisse Klimawechseltest (innerhalb der Toleranz nach TWT):

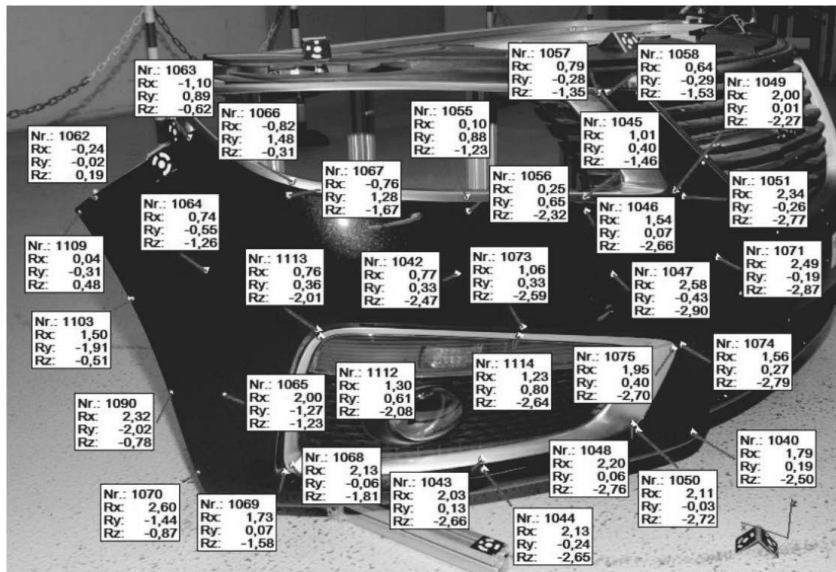


Bild 4: Ergebnisse Klimawechseltest (innerhalb der Toleranz nach TWT)

Haptik / Beulsteifigkeitsvergleich durch Eindrückversuch:

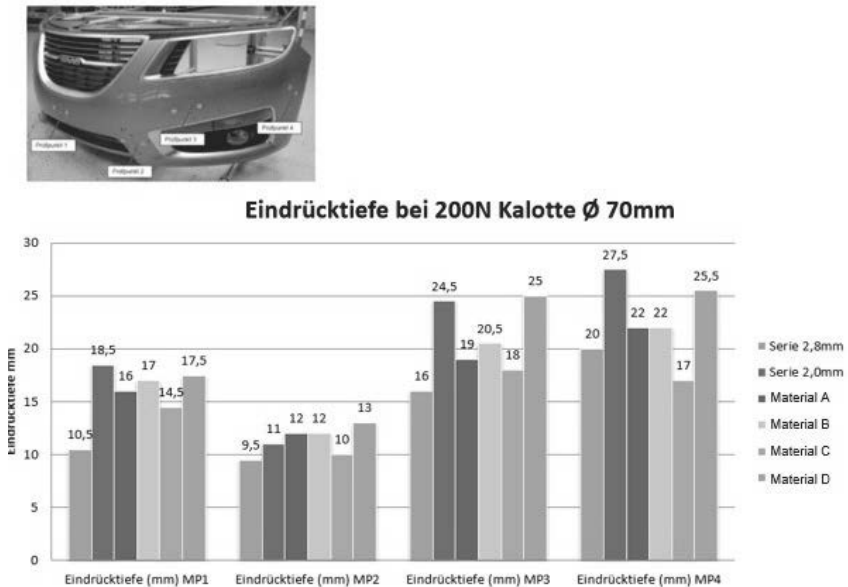


Bild 5: Testergebnisse Haptik / Eindrückversuche nach OEM 2 Testanforderungen

Hier wurden an verschiedenen ausgewählten Messpunkten die Deformationen im simulierten Anbauzustand am Fahrzeug gemessen. Diese Werte sind stark geometrieabhängig, zeigen aber das reale Bauteilverhalten am Fahrzeug. Die Punkte 1, 3 und 4 sind stark abhängig von der Eigensteifigkeit in diesen Bereichen, der Punkt 2 ist relativ nahe an einem Befestigungspunkt. Teilweise wurden hier Steifigkeiten auf dem Niveau der Originalwandstärke erzielt.

## 1. Lackhaftungsergebnisse

Die Ergebnisse der Prüfung der Lackhaftung bei allen Materialien waren im Gitterschnitt, Gitterschnitt nach Kondenswasser Konstantklima und den Multiteinschlagprüfungen nach Kondenswasser Konstantklima ohne Ausfälle. Bei den Dampfstrahlprüfungen unserer Kunden gab

es jedoch deutlich mehr Ausfälle. Wobei sich hier deutliche Unterschiede aufgrund der Prüfverfahren darstellen. Während die Dampfstrahlprüfung nach Vorschrift eines deutschen Premium-Kunden allesamt ohne Ausfälle bestanden wurde, sind die Anforderungen der bekanntermaßen härtesten Dampfstrahltestprüfvorschrift bei einem anderen deutschen Premium-Kunden nicht erfüllt worden. Allerdings zeigen die Ergebnisse bei zwei der getesteten Materialien Potentiale, die durch entsprechende Modifikationen ein „In-Ordnung-Ergebnis“ erwarten lassen.

Lacktechnologieprüfung Projekt "Dünwandtechnik" => SAAB 9-5 Bumper																	
Hersteller	Material	OEM 1 Steamjet test		OEM 1 Steamjet test after climate		OEM 2 Steamjet test		OEM 3 Steamjet test		OEM 4 Steamjet test		OEM 1 multi rockfall test		OEM 2 multi rockfall test		OEM 1 multi rock fall test after climate	
		approved	n.i.O.	approved	n.i.O.	approved	n.i.O.	approved	n.i.O.	approved	n.i.O.	LO	n.i.O.	LO	n.i.O.	LO	n.i.O.
Hersteller A		10	3	10	3	10	0	10	4	10	2	0-1	/	0,5	/	0,5	/
Hersteller A		10	1	10	4	10	0	10	3	10	1	0-1	/	0,5	/	1	/
Hersteller A		10	2	10	6	10	0	10	3	10	1	0-1	/	0,5	/	0,5	/
Hersteller B		10	5	10	10	10	0	10	4	10	1	0-1	/	0,5	/	0,5	/
Hersteller C		10	1,8	10	3	10	0	10	0	10	1	0-1	/	0,5	/	/	/
Hersteller D		10	3	10	2	10	0	10	3	10	1	0-1	/	0,5	/	/	/
Hersteller E		10	1,0	10	3	10	0	10	3	10	0	0-1	/	0,5	/	/	/
Hersteller F		10	7	10	1	10	0	10	3	10	0	0-1	/	0,5	/	/	/
Hersteller G		10	4	10	5	10	0	10	4	10	0	0-1	/	0,5	/	/	/
Hersteller H		10	4	10	6	10	0	10	1	10	0	0-1	/	0,5	/	/	/

Bild 6: Lackhaftungsergebnisse verschiedener Werkstoffe bei diversen Kundentests

## 2. Diskussion der Lackhaftungsergebnisse

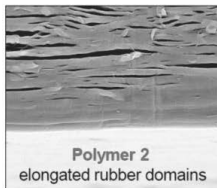
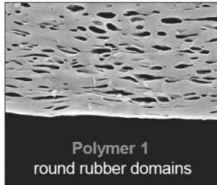
Vermutet wurde, dass aufgrund der intensiveren Scherung bei der Wandstärkenreduzierung auf 2,0mm die Moleküle eine sehr hohe Orientierung erfahren und damit die im PP enthaltenen Kautschukpartikel stark gedehnt werden. Insgesamt ist nach unseren Ergebnissen der Effekt aber ohne großen Einfluss bei den relativ unkritischen Lackhaftungsprüfungen. Bei den höchsten Testanforderungen im Feld könnte aber sehr wohl die stärkere Orientierung einen Einfluss haben.

Die Mikroskopie zeigt die prinzipiellen Unterschiede zwischen Originalwandstärke und der bei reduzierten Wandstärke veränderten Morphologie der Kautschuk Dispergierung. Aus der deutlich sichtbaren höheren Orientierung der Moleküle entstehen innere Spannungen im Material, die durch die hohe mechanische Druckbeanspruchung beim kritischen Dampfstrahltest relaxieren und einen Kohäsionsbruch im Material hervorrufen können.

## Paint adhesion

Influence of the dispersed phase morphology

### Polymer design



### Test conditions

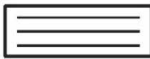
2-layers black paint  
no primer

Oxidative flame  
1:25 propane:air

Gas-flow rate:  
420 l/h; 360 l/h

Steam-jet test parameter:  
Nozzle-to-plate: 130 mm  
Spray time: 60 s  
Temperature: 60°C

Cutter knife



### Paint adhesion results

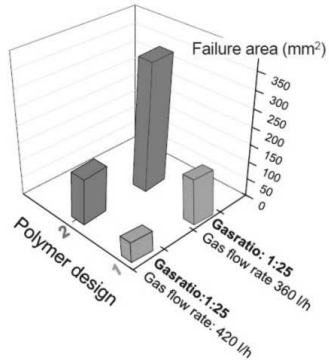


Bild 7: Untersuchungen Fa. Borealis zum Einfluss der Morphologie auf die Lackhaftung

Der Dampfstrahltest prüft zwar vordergründig die Lackhaftung auf dem Substrat. Jedoch hat durch das tiefe Einritzen zur Simulation der Steinschlagbeanspruchung auch die Kohäsion im Material selbst einen Einfluss auf das Resultat der Lackhaftung. Beim kritischsten Dampfstrahltest bewegt sich die Beanspruchung des Grundmaterials auf einem Niveau, welches sicher einen zusätzlichen negativen Einfluss auf die Lackhaftung ausübt (siehe Bild).

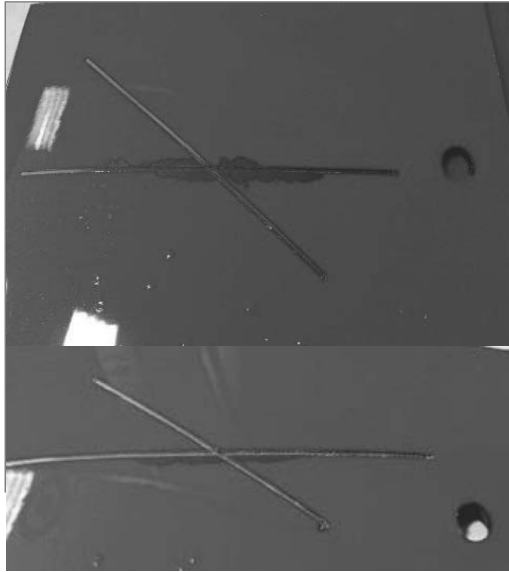


Bild 8: Negativer Einfluss der Lackhaftung durch Kohäsionsbruch im Material (oben), optimiertes Material mit verbesserter Lackhaftung (unten)

### 3. Qualitätseindruck der Oberfläche

Bei der Erstabmusterung in 2,0mm Wandstärke zeigten sich in den Bereichen der seitlichen Schieber bei kritischen Farben deutliche Abzeichnungen. Diese waren aber auch schon in ähnlicher Weise bei dem noch nicht auf den finalen Stand optimierten Serienwerkzeug sichtbar. Um hier bessere Resultate zu erzielen, wurde die Form nach erfolgter Erstabmusterung umfangreich untersucht und überarbeitet. Um einen genauen Vergleich zur Wirksamkeit dieser Maßnahmen zu erhalten, wurde nur das Werkzeug auf einer Seite überarbeitet und von der Qualitätssicherung mit der im Originalzustand belassenen Seite verglichen. Folgende Optimierungen wurden vorgenommen.

- Optimieren des Tuschie- und Druckbilds von Düsen- und Auswerferseite
- Reduzierung der Bewegungen in der Auswerferseite
- Minimieren des Schieberversatzes

Nach erfolgter Überarbeitung hatte sich der Qualitätseindruck der auf 2,0mm reduzierten Wandstärke deutlich verbessert. Leichte Abzeichnungen auf einem akzeptablen Niveau sind für das geübte Auge aber noch sichtbar. Daraus folgert für Magna, dass bei der Dünnwand-Spritzgusstechnik die Formenauslegung konstruktiv aufwändiger erfolgen muss. Die unter Druckbelastungen entstehenden minimalen Bewegungen in der Form müssen sorgfältig mit den üblichen FEM-Verfahren simuliert werden. Hier ist besonderes Augenmerk auf die mechanische Stabilität der Schieberbereiche zu legen.

#### 4. Fügeverfahren

Stoßfängerverkleidungen erhalten eine Vielzahl an zusätzlichen Bauteilen, die zur Aussteifung bestimmter Bereiche oder ausstattungsbedingt zur Aufnahme von Radar, Parkdistanz-Sensoren und Antennen dienen. Diese Bauteile werden direkt mit der Class A-Oberfläche verbunden. Bei den üblichen Verfahren ist entweder das Verkleben der Gehäuse mit der Stoßfängerverkleidung durch doppelseitiges Klebeband oder das Ultraschall-Nadelpaket-Schweißen im Einsatz. Aus unseren Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei größeren Stückzahlen erscheint Kleben kostenseitig nicht als optimal. Das Ultraschall-Schweißen der Halter mit der Stoßfängerverkleidung durch Nadelpaket-Sonotroden selbst ist nur mit einer gezielten Aufdickung der Wandstärke von 2,8mm auf 3,2mm abzeichnungsfrei.

Ziel war es, ein Schweißverfahren zu finden und so weit zu optimieren, dass die Spezifikationen an Ausdrückfestigkeit und Abzeichnungsfreiheit sowie Vermeidung von zusätzlichem Aufwand in der Fertigung erfüllt werden.

Hier wurde das torsionale Ultraschallschweißen und das 45° Ultraschall- Sonotroden-Schweißen mit den jeweiligen Entwicklungspartnern zur Serienreife entwickelt. Für beide Verfahren kommen spezielle Sonotroden zum Einsatz, die nicht nur ein Verschweißen auf dünnen Wandstärken in Class A-Qualität ermöglichen, sondern auch höhere Abzugswerte / bessere Verschweißergebnisse verglichen zum konventionellen US-Sonotroden-Schweißen erzeugen.

Beide Verfahren wurden zunächst an Platten in unterschiedlichen Wandstärken auf ihre „Dünnwandtauglichkeit“ untersucht und später an 3D-Mustern in Prototypen validiert.

Funktionsprinzip 45°-Verschweißen: Beim 45°-Verschweißen werden die Sonotroden in der genannten Winkelausrichtung angeordnet und verursachen so sowohl eine Verschweißungsrichtung 90° zur Oberfläche als auch eine Reibwirkung, die in 45° verläuft.

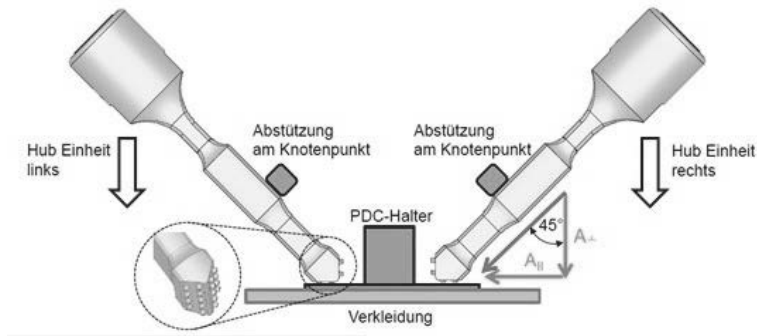


Bild 9: 45° Sonotroden Verschweißung mit freundlicher Genehmigung der Fa. PPtech

Um beim 45°-Verschweißen ein optimiertes Schweißbild von Halter und Stoßfänger zu erreichen, kommen so genannte „Sichelsonotroden“ zum Einsatz. Diese ermöglichen eine verkürzte Hebelwirkung zwischen Halter und Verschweißungsstelle und damit auch eine höhere Abzugskraft.

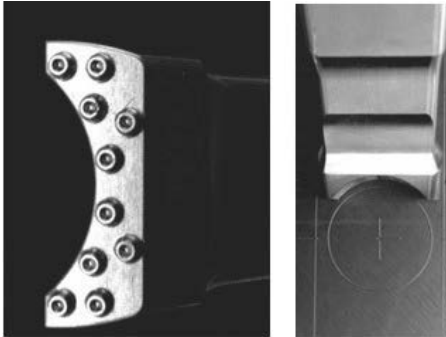


Bild 10: 45°-Verschweißung Sichel Sonotrode mit freundlicher Genehmigung der Fa. PPtech

Beim torsionalen US-Verschweißen kommen Rundsonotroden zum Einsatz, die eine umlaufende Verschweißung ermöglichen und somit die Abzugswerte extrem in die Höhe treiben können! Dies ist aber nicht zwingend erforderlich und im Zuge der Class A-Qualitätsanforderungen auch optimierbar.

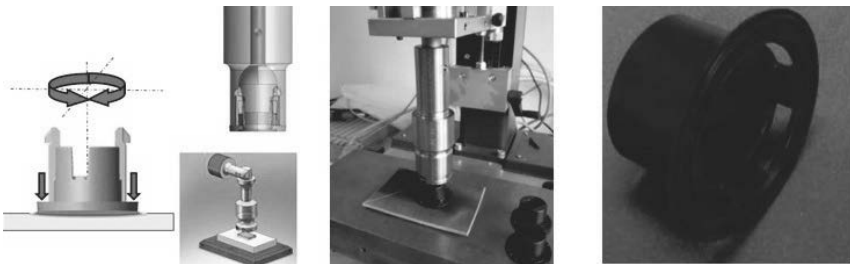


Bild 11: Verschweißung mit torisonaler US-Sonotrode

Die Torsionsbewegung der Sonotrode erfolgt durch die Ultraschallanregung im  $\mu\text{m}$ -Bereich und erreicht eine sehr gute umlaufende Verschweißung schon nach sehr kurzer Schweißzeit! Die Optimierung in der Serie zu einem Class A- Verschweißergebnis erfolgt letztendlich in der Abstimmung der Schweißrippe und der Schweißgeometrie sowie dem zur Verfügung stehenden Package des Stoßfängers zum Verbau der Sensoren!

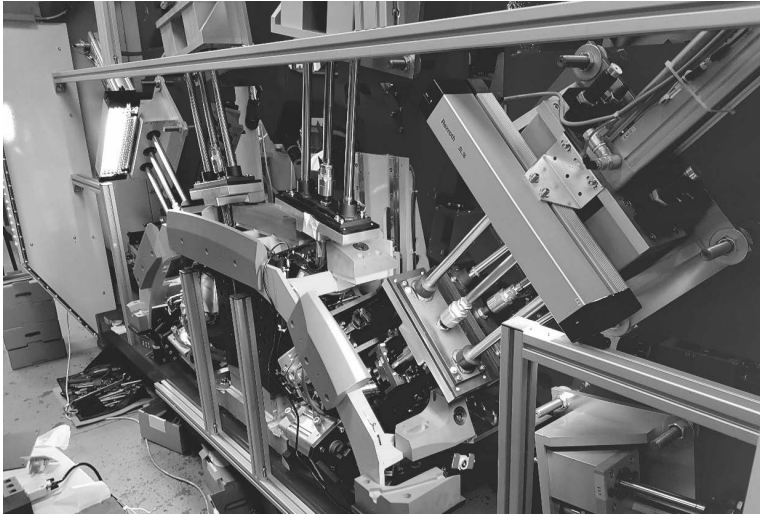


Bild 12: Serienanlage Skoda mit Torsionalen Ultraschall-Schweißen

## Zusammenfassung und Ausblick

Nach erfolgreicher Serienumsetzung der Dünnwandtechnologie in mittlerweile vier Stoßfängerprojekten ist Magna Exteriors davon überzeugt, dass die Dünnwandtechnologie ihren Einzug auch im absoluten Premiumsegment der Fahrzeughersteller finden wird und deren Anforderungen heute schon erfüllen kann. Dünnwandtechnik wird aber nicht auf einem Wert von 2,5mm stehen bleiben, sondern schon sehr früh durch die Entwicklung neuer Werkstoffe den nächsten Evolutionsschritt meistern.

Magna Exteriors bereitet sich hierauf durch konsequente „Best in class“-Prozesse im Spritzguss, Lackieren und Assembly vor und wird mit innovativen Lösungen auf diesen anhaltenden Trend reagieren.

So wie wir neue Märkte wie z. B. Aerodynamikprodukte, Composite-Fertigungen und große Exteriormodules (z.B. Seitentüren) entwickeln, so verfeinert und optimiert Magna Exteriors die

existierenden Produkte kontinuierlich weiter, um in allen Bereichen ein World Class-Produzent von Kunststoff-Exteriorbauteilen zu sein!

Literaturhinweise:

- [1] Unterlagen Basell
- [2] Unterlagen Borealis
- [3] Unterlagen PP Tech
- [4] Unterlagen Telsonic
- [5] Longitudinales und torsionales Ultraschallschweißen  
– ein Verfahrensvergleich / *Longitudinal and torsional ultrasonic welding -A comparison of the processes* Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde, Dipl.-Ing. Sven Friedrich, Dipl.-Ing. Rene Fuhrich, TU Chemnitz, Chemnitz

# Entwicklung eines Tankdeckel-Scharnierarms mit Recycling-Material

**M. Thurmeier**, M.Eng., **C. Horbas**, Dipl.-Ing. (FH) **F. Wagner**,  
AUDI AG, Ingolstadt

## Kurzfassung

Der Vortrag befasst sich mit der Entwicklung der neuen Generation Tankdeckeln, die durch die hinzugefügten Anschlüsse immer großflächiger werden. Dadurch wachsen die Anforderungen an das Material, das im Folgenden am Beispiel des Tankdeckelscharnierarms näher beleuchtet werden soll.

## 1. Motivation

Im Laufe der letzten Jahre ist durch die technische Entwicklung der Fahrzeuge die Komplexität enorm angestiegen. Somit kommen neben der Einfüllöffnung für Kraftstoff vermehrt auch Anschlüsse für SCR und Elektromobilität zum Einsatz. Direkt damit verbunden ist somit auch die Größe des Tankdeckels bzw. des Tankklappenmoduls. Um die höheren Kräfte durch die angewachsene Oberfläche kompensieren zu können, wird ein neues, verstärktes Material benötigt.

## 2. Bauteilauslegung

Um das Bauteil auslegen zu können, müssen zunächst die verschiedenen Anforderungen betrachtet werden. Neben den mechanischen Anforderungen müssen zwingend Qualitäts-, Thermische- und Materialanforderungen, sowie fertigungsrelevante Punkte beleuchtet werden. Die verschiedenen Lastfälle bzw. Einflussfaktoren haben dazu geführt, dass die Hauptanforderung an das Bauteil die Steifigkeit ist.

## 3. Werkstoffherstellung, Material, Bauteilherstellung

Bei der Herstellung von Karosserieteilen werden Gelege und Gewebe aus Carbonfasern gefertigt und dann auf die erforderlichen Größen zugeschnitten. Bei diesem Arbeitsschritt fallen als Nebenprodukt Faserreste an. Diese werden dann wiederum verwendet, um Spritzgusscompound PP CF30 mit sehr guten spezifischen Eigenschaften herzustellen.

Neben dem geringen Gewicht besitzt das Material eine hohe Steifigkeit und eine geringe Wärmeausdehnung. Mit diesem Material aus PP CF30 lassen sich gegenüber dem Serienmaterial aus PA6 GF50 ca. 38% Gewicht einsparen. Weiterhin nimmt PP kein Wasser auf und erfüllt damit die hohen Qualitätskriterien eher als ein PA.

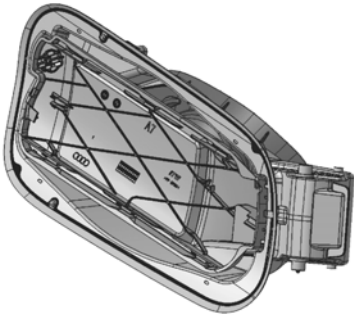


Bild 1: Komplett-Ansicht des Tankklappenmoduls

## Leichte Masse mit Klasse

### Heckschürze aus Polyurethan mit äußerst geringer Dichte

Dipl.-Ing. (FH) **C. Bauernfeind**,  
Dr. Ing. h. c. F. Porsche AG, Weissach;  
Dipl.-Ing. **E. Blees**,  
Polytec Group (Polytec Car Styling), Hörsching, Österreich

#### Kurzfassung

Der GT3 RS stellt das derzeit extremste Fahrzeugmodell der Porsche 911 Modellfamilie dar. Als Bindeglied zwischen den Sportwagen mit Straßenzulassung und den reinen Rennfahrzeugen hat dieses Modell bedingungslos den höchsten Anspruch an Leichtbau und Performance zu erfüllen. Hierzu ist es unbedingt notwendig, die technischen Möglichkeiten jedes einzelnen Bauteils maximal auszureizen.

In der Heckverkleidung des GT3 RS kommt durch die enge und partnerschaftliche Zusammenarbeit der beteiligten Entwicklungspartner erstmals eine Leichtbauvariante der füllstoffverstärkten Polyurethane (PUR-RRIM) zum Serieneinsatz. In diesem Bauteil kann die neue Werkstofftechnologie ihr volles Potential erfolgreich unter Beweis stellen und unter Beibehaltung aller erforderlichen mechanischen und qualitativen Eigenschaften das Bauteilgewicht um 23 Prozent reduzieren.

## 1. Einleitung

In der Karosserieentwicklung der Porsche GT Fahrzeuge liegt der Hauptfokus auf der Verbindung von Funktion und maximalem Leichtbau, ohne dabei den Anspruch an Qualität und Robustheit gegenüber der Porsche Serienfahrzeuge herabzusetzen. Im Gegenteil – eine stärkere Anregung durch die rennsportnahen Fahrwerke sowie die verschärften thermischen und aerodynamischen Grenzbetriebsbedingungen verlangen den Bauteilen ein Höchstmaß an Belastbarkeit ab.

Um die Abtriebskraft massiv zu erhöhen und gleichzeitig die Leistungsfähigkeit auf der Rennstrecke gegenüber seinem Vorgänger noch einmal merkbar anzuheben, wurde beim aktuellen 911 GT3 RS neben vielen Highlights in der Fahrwerks-, Antriebs- und Elektrikentwicklung auch nahezu jedes Karosseriebauteil modifiziert. Neben Kotflügeln und Frontdeckel aus Kohlenstofffaser, einem Dach aus feinstem Magnesiumblech und einem Kohlenstofffaser-Heckdeckel mit Leichtbauflügelwerk, trägt die Leichtbauheckverkleidung aus Polyurethan einen wichtigen Teil zur Gesamtgewichtsbilanz des Heckmotorsportlers bei.

Wurden die Front- und Heckschürzen der GT-Fahrzeuge in der Vergangenheit aus Standard-Polyurethan mit Faserverstärkung (PUR-RRIM) gefertigt, so kommt im Heck des aktuellen GT3 RS nun ein Lightweight-PUR-RRIM zum Einsatz, das an der Hinterachse über ein Kilogramm Gewicht einspart. Neben der richtigen Werkstoffwahl tragen eine optimale Bauteilauslegung sowie ein ausgereifter Herstellprozess zu diesem bemerkenswerten Ergebnis bei.



Bild 1: Porsche 911 GT3 RS

## 2. Werkstoff

Das neuartige und in diesem Projekt weltweit erstmals in einer Serienanwendung eingesetzte PUR-Elastomersystem zeichnet sich durch eine extrem geringe Dichte aus. Mit weniger als einem Gramm pro  $\text{cm}^3$  ist der Werkstoff sogar leichter als Wasser. Zum Vergleich: Die Dichte von Stahl und Aluminiumblech liegt im Bereich von rund acht beziehungsweise drei Gramm pro  $\text{cm}^3$ . Der Leichtbauwerkstoff Bayflex® Lightweight ist eine Entwicklung der Covestro Deutschland AG, Leverkusen, ehemals Bayer MaterialScience, die in enger Zusammenarbeit mit der 3M Deutschland GmbH, Neuss, und dem Verarbeiter Polytec Car Styling, Hörsching/Österreich, entstand. Dank dieses Werkstoffes wiegt die Heckverkleidung etwa 1,2 Kilogramm weniger als ihr Pendant des Vorgängermodells. Dies entspricht einer Gewichtseinsparung von rund 23 Prozent und ist somit leichter als vergleichbare Verkleidungsteile aus Polypropylen.

Die deutlich höhere Dichte des vormals verwendeten Bayflex® 180, ebenso ein zähelastisches PUR-Elastomersystem von Covestro, beruht im Wesentlichen darauf, dass die zur Steigerung der Festigkeit und Steifigkeit zugegebenen Mineralfasern (Dichte 2,85 Gramm pro  $\text{cm}^3$ ) einen Gesamtgewichtsanteil von 17 Prozent beanspruchen. Der Materialhersteller machte sich daher auf die Suche nach alternativen Füll- und Verstärkungstoffen, um die Dichte zu reduzieren und zu einem noch leichteren PUR-Elastomer zu kommen.

Die Lösung brachte schließlich der Einsatz der 3M Glass Bubbles (Glashohlkugeln) in Kombination mit leichten, gemahlenen Kohlenstofffasern anstelle der Mineralfasern. Die mikroskopisch kleinen Hohlkugeln mit einem mittleren Durchmesser von 20 Mikrometern dienen als funktioneller Leichtfüllstoff. Sie bestehen aus Borosilikatglas und verbinden eine sehr niedrige Dichte von weniger als 0,6 Gramm pro  $\text{cm}^3$  mit einer für die Verarbeitung wichtigen hohen Druckfestigkeit von bis zu 1.100 bar. Die Glashohlkugeln sind chemisch inert, wasserunlöslich und im PUR-Reaktionssystem fein dispergiert.

Die gemahlenen Kohlenstofffasern haben die Aufgabe, dem PUR-System eine gute Festigkeit und Steifigkeit zu verleihen. Ihre geringe durchschnittliche Länge von nur 150 Mikrometern und die Form der Glashohlkugeln führen dazu, dass der PUR-Werkstoff im Gegensatz zum mineralfaserverstärkten Bayflex® 180 im Bauteil nahezu isotrope Eigenschaften aufweist, was die Konstruktion und simulative Auslegung der Komponenten für verschiedene Belastungsfälle erleichtert. Durch die geringe Länge können die Kohlenstofffasern aus Resten von Fasermatten zusammengestellt werden, die bei der Produktion von carbonfaserverstärkten Kunststoffteilen anfallen. Diese Rezyklate verleihen den PUR-Werkstoffen die gleichen mechanischen Eigenschaften und sind dabei deutlich kostengünstiger. Zudem schließt die Verwertung der Abfälle Stoffkreisläufe und ist daher besonders nachhaltig.

Der Gesamtgewichtsanteil der Füllstoffe beläuft sich auf 13 Prozent, davon entfallen zehn Prozent auf die Glashohlkugeln und drei Prozent auf die Kohlenstofffasern. Aufgrund der geringen Dichte des Leichtfüllstoffs entspricht dies einem sehr hohen Volumenanteil der Füllstoffe von nahezu 25 Prozent. Im Vergleich dazu enthalten konventionelle RRIM-Bauteile mit 17 Gewichts-Prozent Mineralfasern nur etwa sieben Volumen-Prozent Füllstoff. Bei der Verarbeitung bildet das Material im Kontakt mit dem Werkzeug eine dünne Haut. Die Oberfläche ist daher frei von Füllstoffen und erlaubt eine Lackierung entsprechend höchsten Qualitätsanforderungen.

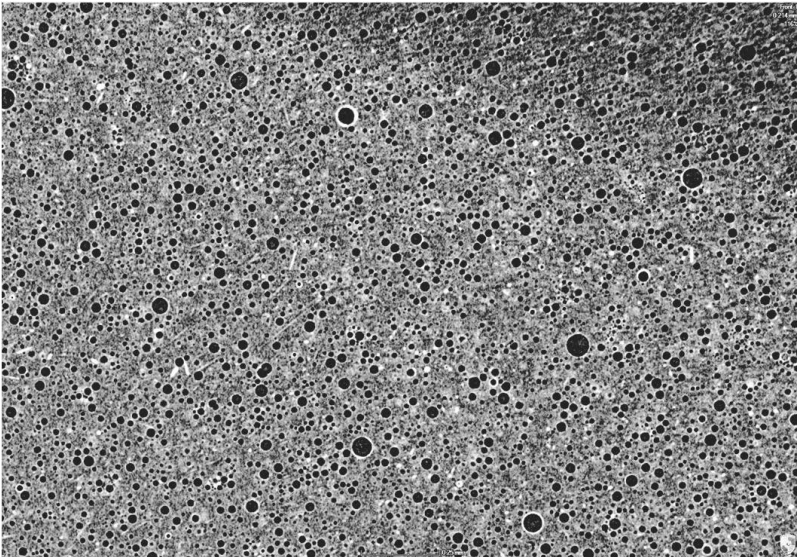


Bild 2: Mikroschliff Porsche.

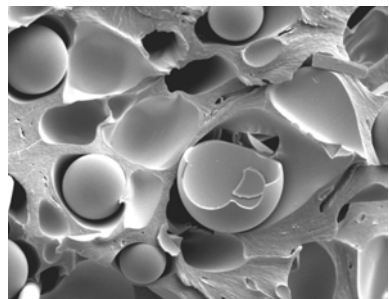
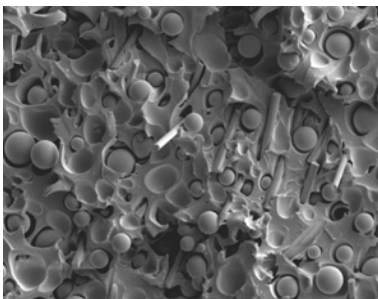


Bild 3, 4: REM Polytec

Der hohe Füllstoffgehalt des neuen Materials führte zu geringerer Zugfestigkeit und Bruchdehnung, sowie zu einer drastischen Verringerung der Schlagzähigkeit bei lackierten Bauteilen. Dies musste bei der Bauteilentwicklung der GT3 RS Heckverkleidung konstruktiv ausgeglichen werden. Die intensive Weiterentwicklung des Materials durch Polytec brachte ein RRIM-Lightweight Material der zweiten Generation hervor, mit mechanischen Eigenschaften, die in jedem Fall mit jenen herkömmlicher RRIM-Teile vergleichbar, zum Teil sogar besser sind. Insbesondere die Kaltschlagzähigkeit konnte im Vergleich zum Ausgangsmaterial vervierfacht werden.

Tabelle: Mechanische Werte von konventionellen und Leichtbau-RRIM-Teilen der zweiten Generation im Vergleich (Werte für getemperte Bauteile)

		<b>RRIM 17% MF</b>	<b>RRIM Lightweight</b>
Dichte	g/L	1,1 ... 1,2	0,9 ... 1
Härte (Shore D)	-	55 ... 65	
Biegemodul längs/quer	MPa	>1000 / >650	>1000 / >800
Zugfestigkeit	MPa	20 ... 30	15 ... 20
Bruchdehnung	%	150 ... 200	100 ... 150
Schlagzähigkeit <sup>1</sup> RT/-25°C	kJ/m²	kein Bruch / > 15	kein Bruch / > 25
Wärmeform- beständigkeit HDT	°C	135 ... 145	

<sup>1</sup> Charpy-Schlagzähigkeit

### 3. Bauteilentwicklung

Die Grundlage für die Bauteilentwicklung bildet das Lastenheft. Darin sind alle technischen, stilistischen, qualitativen und gesetzlichen Anforderungen an die Karosserie definiert. So muss eine Heckverkleidung beispielsweise einen Pendelschlagtest bestehen, der einen Parkrempler unter definierten Auftreffhöhen und -winkeln simuliert. Montierte Leuchteinrichtungen müssen dabei voll funktionstüchtig bleiben, es dürfen keine scharfen Bruchkanten entstehen sowie weder Lack noch Grundmaterial fehlen. Die geringere Bruchdehnung und Schlagzähigkeit des Leichtbau-Polyurethans erster Generation führte in diesem Test anfangs zu einem Materialbruch im Bereich der Reflektoraufnahmen. Erst durch lokales Ausrunden der betroffenen Kanten auf der Bauteilinnenseite konnte das Materialversagen vollständig verhindert werden.

Ziel war es zudem, die Bauteilwandstärken einer vergleichbaren Verkleidung aus Polypropylen umzusetzen. Mit einer Grundwandstärke von 2,8 Millimetern konnte man dieses Ziel sogar übertreffen. In einigen Randzonen wurden Wanddicken von drei Millimetern umgesetzt, um die lokale Steifigkeit zu verbessern und zudem den Materialfluss beim Herstellprozess zu optimieren. In anderen Bereichen konnte die Wandstärke sogar noch stärker ausgedünnt werden. Die heute in Serie befindliche Heckverkleidung des GT3 RS ist somit gewichtsneutral zu einer Verkleidung des 911 Carrera aus Polypropylen.

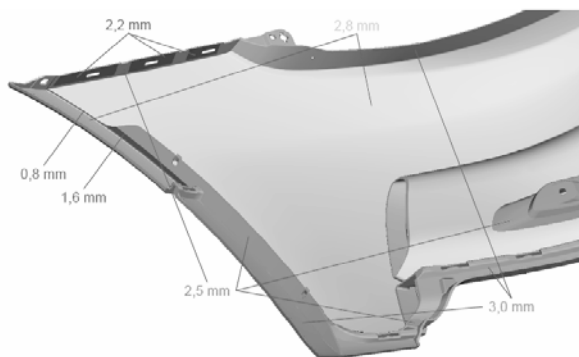


Bild 5: Wandstärkenverteilung

Weitere Gesamtfahrzeugerprobungen wie Hochbelastungsdauerlauf, Crashtests, Korrosionssprüfung oder Windkanalversuche müssen beanstandungsfrei durchlaufen werden.

Bevor die Heckverkleidung ihre uneingeschränkte Entwicklungsfreigabe zur Serienfertigung erhält, erfährt sie zudem noch einige Komponententests. Abschnitte der Verkleidung werden mit vorgegebenen Prüfmedien auf ihre Alltagstauglichkeit getestet.

Die lackierte Kunststoffoberfläche muss gegenüber Benzin, Ölen und verschiedensten Reinigungsmitteln resistent sein. Sie darf unter UV-Einstrahlung nicht schneller altern als die Oberflächen ihrer Anschlussbauteile und muss den Emissionsanforderungen aller Länder entsprechen, in die das Fahrzeug später verkauft werden soll. Kunststoff-Clipverbindungen werden über alle Versuche hinweg geprüft und dürfen nicht versagen. Fallen in der „Squeak & Rattle“-Erprobung am Hydropulsprüfstand oder im Dauerlauf Klappergeräusche auf, beispielsweise durch Materialermüdung, so müssen die Kunststoffbauteile konstruktiv angepasst werden.

Die Heckverkleidung hat trotz aller Leichtbaumaßnahmen die höchsten Ansprüche an Optik und Oberflächenqualität analog vergleichbarer Bauteile eines Großserienfahrzeugs zu erfüllen. Der Klimawechseltest setzt das Bauteil schwankender Temperatur und Luftfeuchte aus und darf bis zu den vorgegebenen Grenzwerten keinerlei Schäden in der Oberfläche zeigen. Hier kam es in den ersten Testläufen zu einer sichtbaren Wellenbildung in der Fläche zwischen den Heckleuchten, hervorgerufen durch eine zu starke Verspannung des Bauteils. Eine gezielte Anpassung ihrer Befestigung an der Fahrzeugstruktur ermöglicht der Heckverkleidung nun eine lokale Längenausdehnung unter Temperatureinwirkung, was eine Bauteilverspannung und somit die Welligkeit in der Fläche verhindert.

Eine große Herausforderung bei der Entwicklung der hinteren Verkleidung eines Sportwagens mit Heckmotor stellt die Abschirmung der Kunststoffteile gegenüber den sehr hohen Abgastemperaturen dar. Die geringen Abstände zu den heißen Endtöpfen und Auspuffrohren erfordern den Einsatz spezieller Hitzeschutzbleche sowie zusätzliche Abschirmblenden aus temperaturstabilen Kunststoffen, um das Polyurethan vor Beschädigung zu schützen.

#### 4. Prozessentwicklung

Beim Reaktionsspritzguss werden die beiden Komponenten Polyol und Isocyanat in einem Mischkopf unter Hochdruck vermischt und in eine Form eingespritzt, wo sie zum Kunststoff Polyurethan reagieren. Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften werden meist Glas- oder Mineralfasern mit einem Anteil von zehn bis 20 Gewichts-Prozent zugegeben.

Die Füll- oder Verstärkungsstoffe werden in der Regel dem Polyol beigemischt. Das Einmischen des Leichtfüllstoffes stellt eine besondere Herausforderung dar. Aufgrund ihrer ausgesprochen geringen Dichte neigen die Glashohlkugeln in Kombination mit dem relativ zähflüssigen Polyol zum Aufschwimmen. Für ein gutes und reproduzierbares Mischergebnis in kurzer Zeit müssen daher alle wesentlichen Parameter wie Tankdurchmesser und -füllstand, Geometrie des Rührwerks sowie Rührgeschwindigkeit und -leistung speziell aufeinander abgestimmt sein. Beim Mischen erhöht sich zudem die Viskosität der Polyolkomponente. Dieser Effekt ist bei RRIM-Lightweight aufgrund des sehr hohen Füllstoffgehalts im Polyol (etwa 45 Volumen-Prozent) besonders ausgeprägt. Um die Komponente fließfähig zu halten, darf auf der gesamten Förderstrecke vom Tank bis zum Mischkopf eine Mindesttemperatur nicht unterschritten werden. Deshalb werden zusätzlich zu den üblichen Temperierungen des Tanks und der Mischköpfe auch alle Polyol-führenden Leitungen beheizt.

Genauso wurde beim Werkzeug auf eine leistungsstarke Temperierung geachtet, um eine gleichmäßige Formfüllung vom Anguss bis an die äußersten Punkte der Kavität zu gewährleisten.

Nach dem Entformen aus dem Werkzeug werden die Heckverkleidungen auf Schablonen abgelegt, um Verzug zu verhindern. Dies ist bei großen RRIM-Bauteilen üblich und für großflächige Leichtbauteile aufgrund der dünneren Wandstärken unbedingt erforderlich. Ebenso ist bei der Aufnahme auf Lackiergestelle auf eine gute Unterstützung der Formkontur zu achten, da sonst Abzeichnungen, Einfallstellen oder Verzug auftreten können. Die Verarbeitung der Leichtbauteile in den nachfolgenden Prozessen (Trimmen, Reinigen und Vorbehandeln, Lackieren) ist jener der konventionellen RRIM-Teile identisch.

## 5. Fazit und Ausblick

Mit der erfolgreichen Industrialisierung der GT3 RS Heckverkleidung bildet das Leichtbau-PUR-Elastomer nun die materialtechnische Grundlage für die Verkleidungsteile der zukünftigen Porsche GT-Fahrzeuge. In naher Zukunft wird sich der Werkstoff nicht mehr nur im Heck, sondern auch in der Frontverkleidung eines GT3 wiederfinden.

Die Entwicklungspartner konzentrieren sich aktuell darauf, die Leistungsgrenzen des Materials und der zugehörigen RRIM-Technologie auszuweiten. Ziel ist beispielsweise, das mechanische Eigenschaftsniveau zu steigern, um die Wanddicken und damit das Bauteilgewicht weiter senken zu können. Ein wichtiger Schwerpunkt liegt außerdem darauf, die Fertigungskosten so weit zu verringern, dass sie auch bei höheren Stückzahlen mindestens auf dem Niveau liegen, das für spritzgegossenes Polypropylen charakteristisch ist.

Auch auf dem Gebiet der Füllstoffe geht die Entwicklung weiter voran. 3M baut derzeit das Sortiment der Glashohlkugeln für den Einsatz in unterschiedlichsten Anwendungen aus. Mittlerweile deckt es durchschnittliche Nenndichten von 0,125 bis 0,60 Gramm pro  $\text{cm}^3$  ab. Um sein Einsatzspektrum zu erweitern, wird es kontinuierlich um Produktvarianten mit modifizierten Eigenschaften ergänzt. Ein Beispiel sind Glashohlkugeln, die im Vergleich zum vorgestellten PUR-Werkstoff schlagzähere Materialien mit einem nur geringfügig niedrigeren Biegemodul und einer minimal höheren Dichte ergeben. Diese Schäume bieten sich für sehr stoßbelastete Bauteile an. Auch über PUR-Systeme hinaus eignen sich die Mikrohohlglasskugeln für diverse Polymertypen. So entwickelt der Hersteller parallel auch hochdruckfeste Varianten für das Spritzgießen von thermoplastischen Leichtbauteilen.



# Active aerodynamic advancements in vehicle underbodies

**A. Povinelli, M. Matthews**, Magna Exteriors, Troy, Michigan, USA;  
**Dr. J. J. Laux**, Magna Management, Cham, Switzerland;  
**J. Goetzelmann**, Magna Exteriors, Sailauf

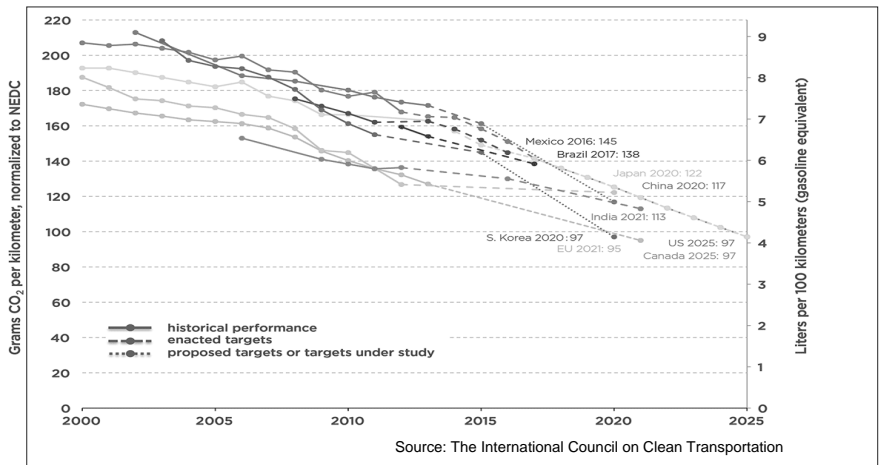
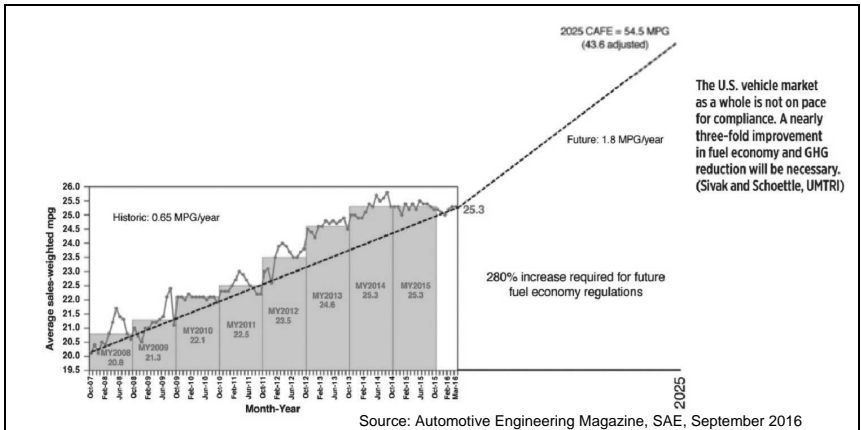
## Abstract

Global fuel economy and carbon emissions regulations are increasing year over year and OEMs, on average, are below requirement targets. To help manufacturers meet their goals, Magna Exteriors, a division of Magna International, has accelerated development work in active aerodynamic systems, supplementing powertrain and styling improvements, to bridge the gap.

A vehicle's aerodynamic profile is a major contributor to its energy consumption, be it fossil fuel or electric vehicle (EV) battery power, and Magna's innovative solutions combine styling with aero to take drag-reduction technology to a new, higher level. Active aerodynamic solutions from Magna include exterior vehicle systems such as active grille shutters (AGS), active front deflectors, active underbodies and others.

## 1. Introduction

In the USA, as CAFE standards increase, manufacturers are not advancing fast enough to meet the 2025 requirement of 54.5 mpg.



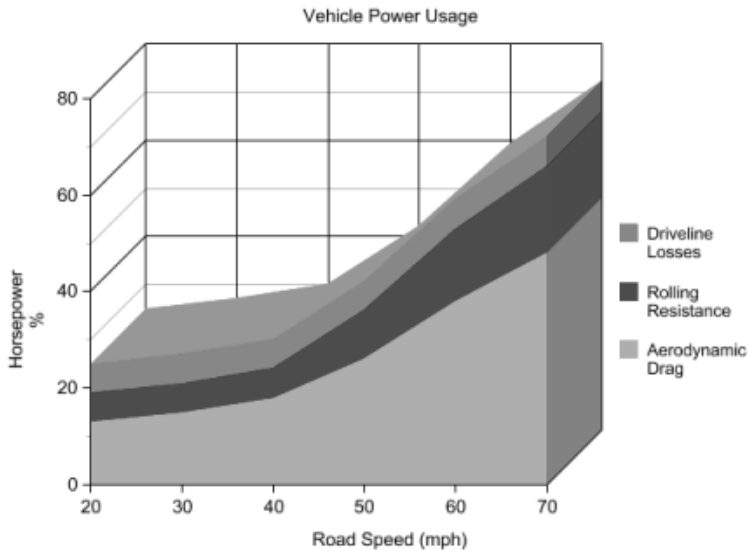
Magna Exteriors anticipated the need for aero technologies to help automakers meet global targets. We have been in the active aero market for nearly a decade and currently have over 14 AGS in production, including one visible, class-A type. Magna works with multiple OEMs and ships more than two million units globally each year. Magna is also creating new active aero applications that will be implemented around the entire vehicle in an effort to find every opportunity to reduce drag. This ex-

perience, and our drive to innovate, has positioned the company to develop the solutions needed by OEMs to meet future regulations.

## 2. Aerodynamic drag impacts

The Environmental Protection Agency (EPA) and the New European Driving Cycle (NEDC) both have substantial requirements for speeds over 40 mph (64 kph): 34% and 19% respectively. The proposed Worldwide-harmonized Light duty driving Test Procedure (WLTP) standard is even higher than NEDC at 33%. Components of vehicle drag include ram air, skin friction and wake, and are roughly 55%, 10% and 35% respectively.

Since about 50% of the energy used at 40 mph (64 kph) is to overcome aerodynamic drag, solutions that reduce drag have the largest opportunity to make significant impacts toward meeting requirements. Additionally, due to the velocity squared impact on drag, the benefits of these systems increase quickly as speed increases.



by Aaron Turpen, Data: National Academy of Science

Vehicle aerodynamic drag is comprised of three main components: ram air pressure on the front of the car, skin friction, and the wake behind the vehicle. Although skin friction is a small percentage (about 10%) of the full aero drag, underbody turbulence and airflow separation can drastically affect the wake component of drag.

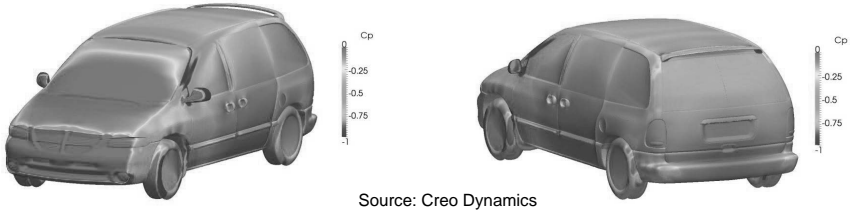


Figure: Mapping of the coefficient of pressure on a vehicle showing ram air pressure, skin friction and wake.

### 3. Vehicle styling impacts

Vehicle aerodynamics, through styling, have improved greatly over the years. Coupled with continuous powertrain improvements, fuel consumption and emissions have continually decreased.



1975



1995



2016

But regulations on lighting, visibility, pedestrian protection and low speed impact, as well as visual appeal, have limited optimal drag profiles.

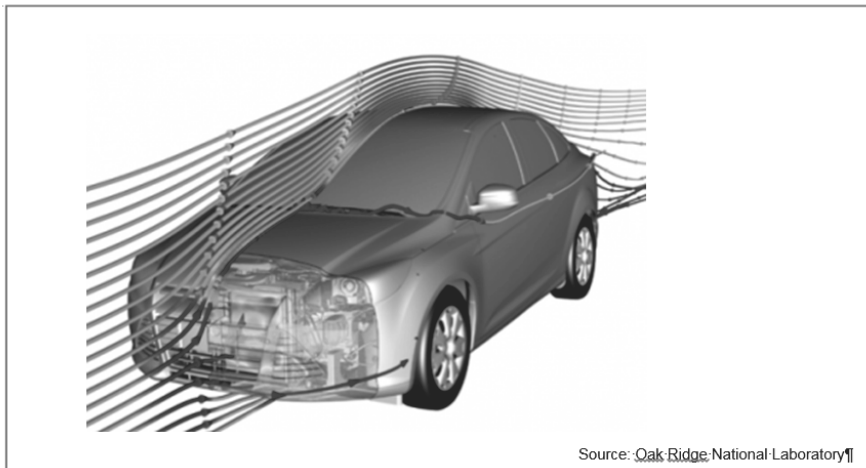


The industry to date has come a long way towards reducing drag. Improved virtual analysis and correlation through physical testing will allow for further reductions. However, significant future improvements require active aerodynamic solutions.

#### **4. Growth of active aerodynamic technology**

AGS were the first widely used application of active aero technology and can now be found on many cars and trucks in production worldwide. An AGS can be visible, integrated with vehicle grilles or behind grilles, like traditional non-visible AGS. There are many variables, such as vehicle type, vehicle styling and engine efficiencies that influence the benefits of active aero grilles, hence the benefit of drag reduction varies.

Airflow through the vehicle front-end (grille, fascia opening) and into the engine compartment is very restrictive. A closed AGS modifies the ram air by diverting air around the vehicle, which is a less restrictive path, thus reducing drag. It also has the added benefit of 'sealing' off the engine compartment in cold weather. This helps achieve faster engine warm-up to meet and maintain optimal operating temperature, which further reduces emissions and fuel consumption.



There are other active systems on the market today, typically aimed at reducing lift or for niche vehicles. Our goal is to provide cost effective drag reduction solutions to the entire market.

## 5. Development considerations and methodology

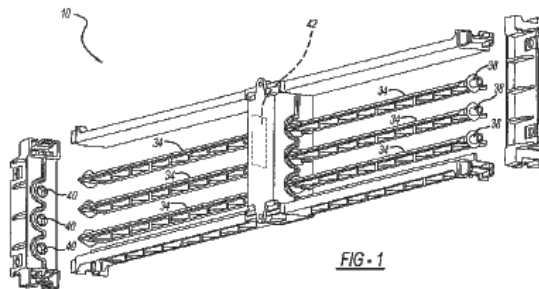
Magna has extensively researched and investigated many kinds of active aero systems including, but not limited to, front deflectors, wheel spats, underbody panel(s), diffusers and rocker panels. Our experience in developing and manufacturing drag reduction components has shown great promise for active aero underbody systems. We identify potential benefits for these systems by:

- Understanding vehicle drag characteristics
- Identifying areas for improvement
- Designing, meshing and running computational fluid dynamics (CFD) analysis to determine potential benefits
- Using physical wind tunnel testing for drag reduction validation and influencing factors
- Correlating CFD to physical testing
- Creating the system framework through design and engineering
- Identifying opportunities for integration and optimization.

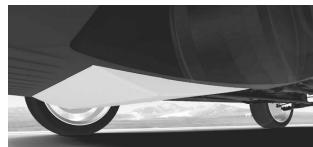
These processes enable Magna to offer unique and innovative solutions to customers with great confidence.

## 6. Innovations in active aerodynamics

As the first broadly used solution for drag reduction, AGS have seen considerable growth globally and are considered fairly common in today's market. Although Magna ships millions of AGS yearly, we work diligently toward continuous improvement to ensure a better product for a better price. Magna has multiple patents around AGS and has one of its patents in production.



In the near future, Magna will supply the automotive industry with multiple aero technologies, with a strong focus on modifying underbody airflow through innovative active front deflectors, active underbody panels and active rear diffusers.



As we move forward with new technologies, we never lose focus on what might be next in aerodynamics. Virtual systems and real-time airflow mapping and control are just a couple of things we are investigating.

As expected with an 'active' aerodynamic system, actuation is paramount to ensure an effective system. In coordination with Magna's closures and mirrors groups, Magna Exteriors has developed a LIN-based, sealed, high-speed, high-torque actuator with an internal clutch to meet the demands of our new aero systems. This makes Magna one of the only fully vertically aligned active aerodynamics suppliers in the automotive market, allowing OEMs to source a complete solution.

## **7. Considerations for application**

As the demand for improved aerodynamics increases, it is necessary for automakers to consider the application of active systems from the start. By analyzing the vehicle with active aero early on (during clay design stage), the studio can understand the impact of aero on styling. Additionally, multiple aero systems can be analyzed together to ensure they work in harmony, which will provide the greatest benefit.

Once optimal system design, shape and location are known, proper packaging can be protected. This allows for optimized travel, which is a key driver in system function, durability and reliability.

## **8. Conclusion**

It is clear that active aero technologies must be applied to meet future fuel and emissions requirements as powertrain improvements and vehicle styling cannot bridge the gap. By incorporating active aero early in the design process, automakers and consumers get the biggest possible benefits of drag reduction. Magna continues to lead in this area by providing innovative, cost-effective and high-quality solutions.

# Improved crash simulation of endless-fiber-reinforced thermoplastics – organic sheets

Dipl.-Ing. **M. Franzen**,

Ford Werke GmbH, Research & Innovation Center Aachen, Aachen;

Dipl.-Ing. **G. Oberhofer**,

MATFEM Partnerschaft Dr. Gese & Oberhofer, Munich;

Dipl.-Ing. **R. Schwarzer**,

Kirchhoff Automotive Deutschland GmbH, Attendorf

## Abstract

Endless-fiber-reinforced thermoplastics show a high potential for weight reduction in the automotive area. However these materials feature a very complex mechanical behavior due to the use of relatively soft and ductile thermoplastic matrix material in combination with stiff and brittle endless fibers.

Within the current crash simulation codes no suitable material models are available to simulate these complex materials correctly and adequately, such as, for example, correctly predicting the elastic, plastic and fracture behavior in dynamic impact loadings. MATFEM Partnerschaft Dr. Gese & Oberhofer in collaboration with the Ford Research & Innovation Center Aachen and Kirchhoff Automotive Deutschland GmbH have developed a material model for crash simulations in order to be able to correctly predict deformation and failure behavior of this complex material group. The MF-GenYld+CrashFEM material model is used within RA-DIOSS<sup>®</sup> and LS-Dyna<sup>®</sup>.

Automotive prototype parts have been manufactured and subjected to various load cases to validate the advanced material model by correlating the CAE models with the test data in terms of measured force-deflection curves and observed material failure. The advanced material model leads to a very good correlation in terms of deflection, deformation and fracture behavior.

## 1. Motivation

Today the automotive industry is challenged by a continuously rising number of demands exerting a strong influence on the development process. The need for CO<sub>2</sub> reduction and hence the resulting need to reduce the vehicle weight as well as the need to constantly im-

prove occupant and pedestrian protection makes it necessary to fully utilize the deployed materials as efficiently as possible. In addition, product development has to be economical with respect to development time and costs. For every single component it must be decided which material is suitable for satisfying the full number of defined requirements in an optimized way. [1]

In order to be able to meet the increased requirements within a framework of shorter cycle times and rising cost pressure, car manufacturers are intensifying the use of computer-aided engineering tools for the various stages of the development process. For the crash simulations the explicit Finite Element Method (FEM) has been applied for a long time. However this process can only be successful when the numerical methods are capable and there is a high confidence level. [1]

Especially for the simulation of continuous-fiber-reinforced thermoplastic materials (organic sheets, for example) there is a great demand for improved crash simulation methods. These materials show a high potential for cost-effective weight reduction in the automotive area. However these materials feature a complex mechanical behavior. Depending on loading in relation to fiber orientation, this behavior can be very stiff with brittleness and no plasticity or soft with ductile behavior and significant plasticity.

Commercially available FEM programs have limitations regarding continuous-fiber-reinforced thermoplastic crash-prediction capability. The matrix material is generally only represented in a simplified manner. Visco-elasticity, visco-plasticity and fracture is not adequately described. For this reason the Ford Research & Innovation Center Aachen, Kirchhoff Automotive Deutschland GmbH and MATFEM Partnerschaft Dr. Gese & Oberhofer started a project to characterize organic sheets in detail and extend the material model MF-GenYld+CrachFEM for crash simulations. The material model has been globally implemented at the Ford Motor Company since 2008.

## 2. Technical approach

To correctly predict the mechanical behavior of continuous-fiber-reinforced thermoplastic parts the Ford Research & Innovation Center Aachen in cooperation with the companies MATFEM Partnerschaft Dr. Gese & Oberhofer and Kirchhoff Automotive Deutschland GmbH have developed a methodology for significantly enhancing crash simulation quality which can

be used in the development process at the Ford Motor Company. The MF-GenYld+CrachFEM material model is used within RADIOSS® and LS-Dyna®.

One basic requirement for this approach is advanced physical material testing in order to identify the complex material behavior in all the required areas. Once these tests have been performed the material cards are set up to supply the MF-GenYld+CrachFEM material model developed by MATFEM. Within the Ford Motor Company this material model is coupled to RADIOSS® and LS-Dyna® and is installed on a global high-performance workstation cluster.

MF-GenYld is a modular plasticity model and CrachFEM is a module for a comprehensive failure prediction. The MF-GenYld+CrachFEM material model can be linked to different explicit finite element codes (such as ABAQUS/Explicit®, LS-Dyna®, PAM-Crash®, RADIOSS®). MF-GenYld offers various yield loci, all of which may be combined with different hardening models in order to reflect the observed behavior of a wide range of metallic and polymeric materials. The MF-GenYld+CrachFEM material model is able to represent specific effects of non-reinforced, short-fiber-reinforced and continuous-fiber-reinforced polymers which are relevant to crash applications:

- Visco-elastic behavior (simplified approach) in combination with orthotropic elastic behavior
- Visco-plastic hardening behavior with different orthotropy for tension and compression
- Anisotropic hardening behavior (different hardening for tension, compression and shear)
- Plastic compressibility
- Significant plastic strains before fracture
- Strain-rate- and stress-state-dependent fracture valid for shell and solid discretization
- Anisotropic fracture behavior (stress- and strain-based)

This approach means that different types of polymer can be treated with one single approach as shown schematically in Figure 1.

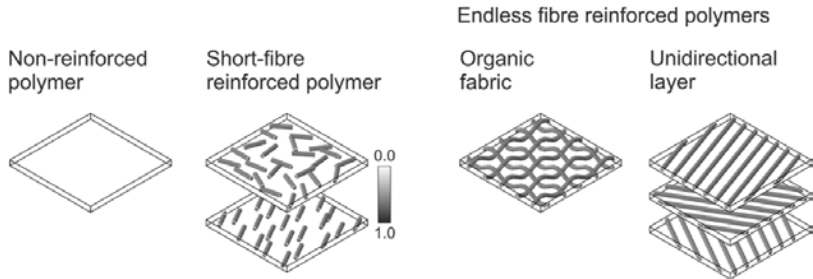


Fig. 1: Different types of non-reinforced and fiber-reinforced polymers

Within this study a characterization method similar to the implemented standard approach for short-fiber-reinforced thermoplastics (SFRT) has been used for organic sheets. Compared to SFRT the degree of anisotropy (elastic, plastic and failure) can be more pronounced. In fiber orientation a comparatively small amount of plastic deformation before fracture can be observed. In off-axis orientations a highly ductile behavior with little hardening can be observed as shown in Figure 2. This characteristic behavior can be stress-state-dependent (for example, different for tension and compression).

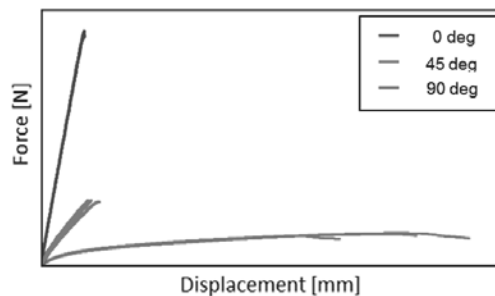


Fig. 2: Typical hardening behavior in uniaxial tension of the investigated organic sheet

The investigated material is described on the assumption of orthotropic behavior. This assumption is reasonable as the thin-walled structure has two perpendicular planes of symmetry. The simplification here is that orthotropy remains constant over deformation. This simplification can be avoided in the future by moving to generally anisotropic approaches in MF-GenYld+CrachFEM. Modules which are used for the material characterization are highlighted in Figure 3.

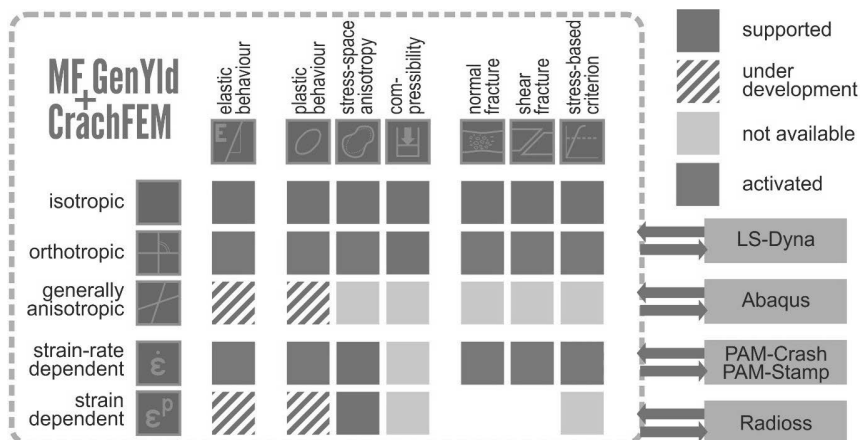


Fig. 3: Modules used for material characterization

A comprehensive test program has been carried out in order to characterize the elastic behavior, hardening behavior and failure behavior. Uniaxial tensile tests with different orientations and at different strain rates have therefore been conducted. Additional compression tests with different orientations, shear tests and biaxial tests have been carried out.

The derived Young's moduli are shown in Figure 4.

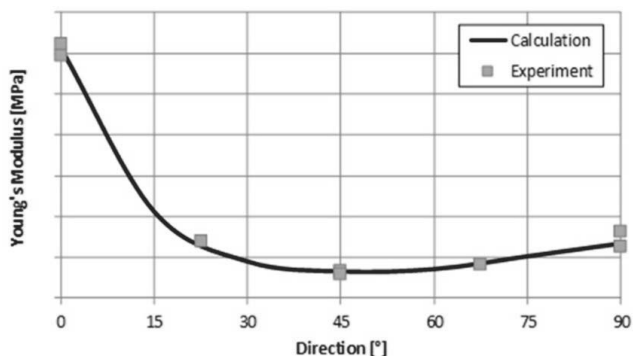


Fig. 4: Directionality of Young's modulus

In the MF-GenYld+CrachFEM material model a reference hardening curve needs to be defined. Usually the symmetry axis with the highest strength is taken as the reference orienta-

tion. As this orientation shows the lowest ductility for the investigated material it is necessary to extrapolate the measured hardening curve in a reasonable way. This can be done by using the hardening curve from the orientation which shows the highest ductility. Inside the material model the equivalent plastic strain based on plastic work is used. Strains from individual loading directions must therefore be transformed into the equivalent plastic strain based on plastic work.

The material model enables the use of different orthotropic yield locus definitions. Here the yield loci according to Hill-1948 [2] and Dell-2006 [3] have been used as a basis. It is possible to distinguish between tension and compression behavior. Figure 5 shows the directionality of the yield strength, Figure 6 the directionality of the plastic Poisson's ratio.

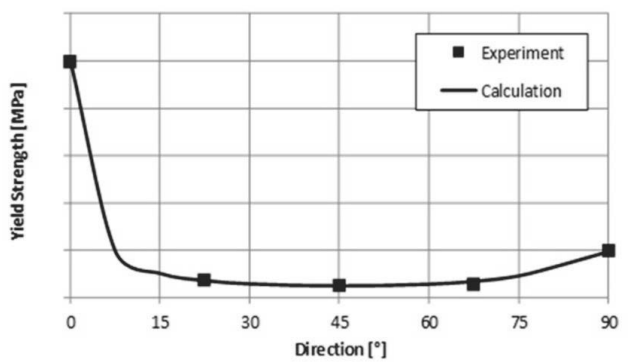


Fig. 5: Directionality of the yield strength

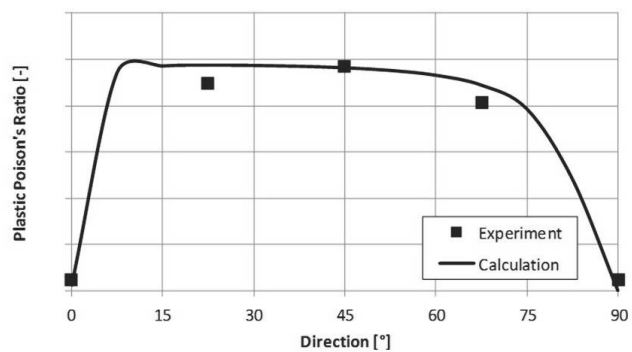


Fig. 6: Directionality of the plastic Poisson's ratio

The hardening behavior of organic sheets can be comparatively high in the fiber directions. In addition, the plastic strain at fracture is usually very low for this direction. Consequently the use of failure criteria which are based purely on plastic strains can cause problems. Very small errors in determining fracture strain can result in serious errors with respect to strength at failure. For this reason a stress-based failure criterion has been developed which also covers the orthotropic behavior of the investigated organic sheet. The orientation-dependent fracture stress is shown in Figure 7.

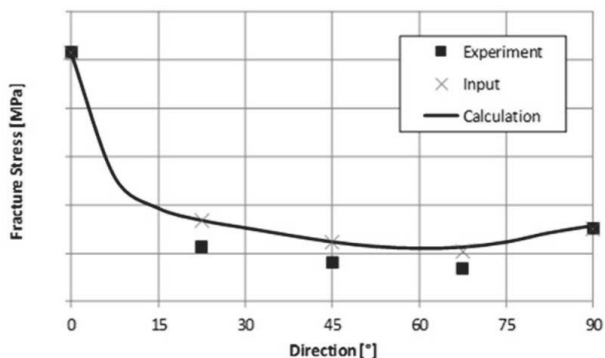


Fig. 7: Directionality of fracture stress based on tensile testing

The fracture locus overestimates the fracture for the orientations at 22.5°, 45° and 67.5°. Tensile tests in these orientations showed a low hardening behavior (schematically shown in Figure 2 for the 45° orientation). Here small errors in defining the fracture stress can lead to large errors for the fracture strain. Due to this problem an additional strain-based failure criterion has been defined which covers the ductile failure modes in the range of orientations away from the fiber orientations.

The stress-based fracture modes do not therefore need to describe the low fracture stresses in the ductile orientations. The combination of the classic strain-based failure model approach in the MF-GenYld+CrachFEM material model and the new stress-based approach seems to be well-suited to describing the complex failure behavior of organic sheets.

### 3. Current status

In a first step basic specimen tests are simulated with the modified material model and a derived material card. The results for the quasi-static tests in different orientations are shown in Figure 8.

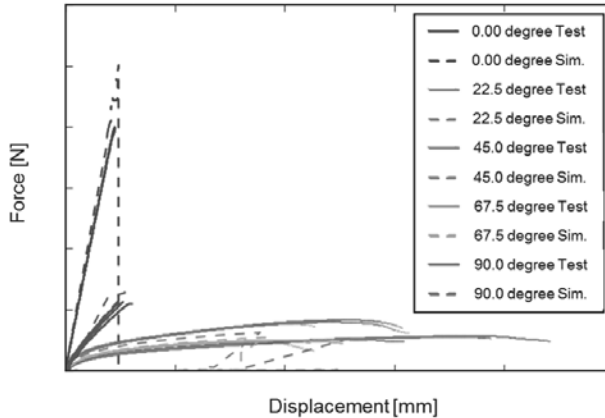


Fig. 8: Simulation of basic specimen forms, uniaxial tension (force-displacement)

This approach covers the strain-rate dependency of the strain-based and stress-based failure modes as well. A comparison between experiment and simulation is shown in Figure 9.

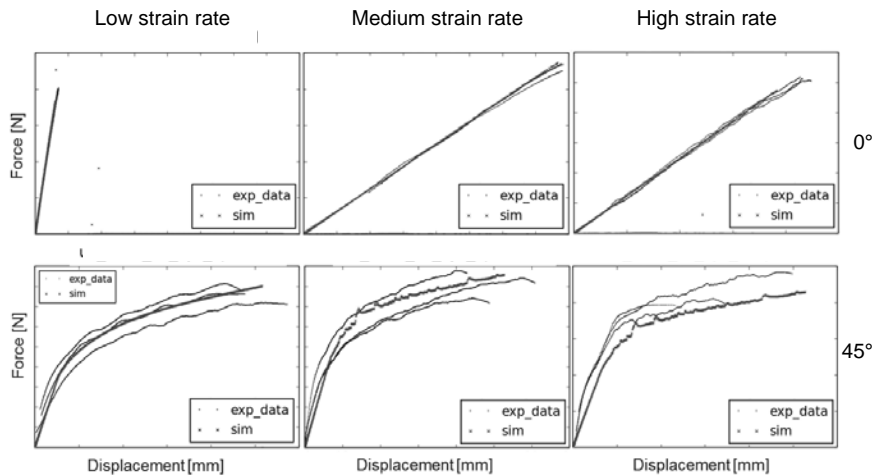


Fig. 9: Simulation of basic specimen forms, uniaxial tension (force-displacement)

In this study the assumption has been made that the material behavior can be described by an orthotropic approach. Current developments of the material model approach are no longer limited to an orthotropic representation. The general anisotropy of elasticity and plasticity can be described either based on the superposition of two or more transversely-isotropic components or on the structural tensors approach [4]. A validation example of the superposition method for initially orthogonal fabric (example without failure criterion) is shown in Figure 10.

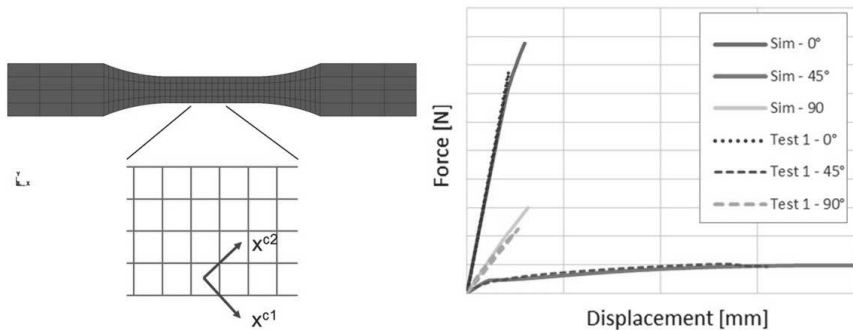


Fig. 10: Force-displacement behavior in the case of the uniaxial tension test

To further validate the new material model, prototype parts have been manufactured with an endless-fiber-reinforced polyamide material and tested in different scenarios, see Figure 11.

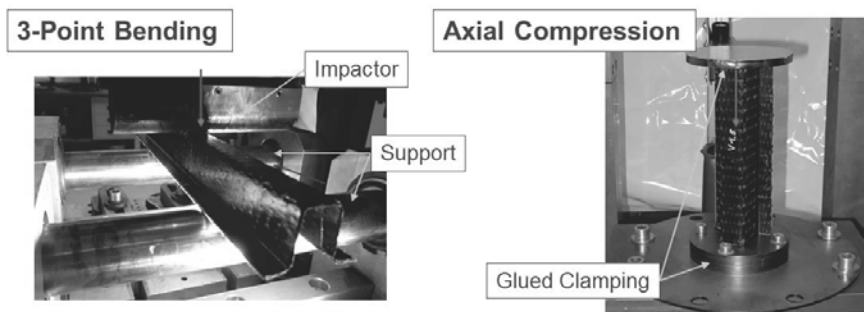


Fig. 11: Prototype parts and load cases for simulation validations

The crash simulations are performed at the Ford Motor Company with the enhanced MF-GenYld+CrachFEM material model supplied by a material card generated by MATFEM and based on advanced physical material tests of this particular endless-fiber-reinforced thermo-plastic.

The validations show a very good correlation when the new material model is used. Figures 12 to 15 show the comparison of simulation and physical tests for quasi-static and dynamic 3-point bending and axial crushing tests.

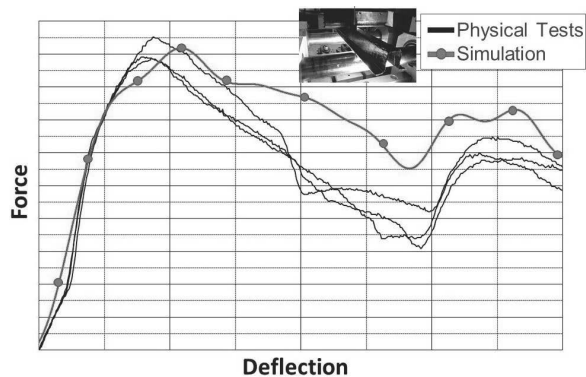


Fig. 12: Crash simulation results vs. test results 3-point bending, quasi-static

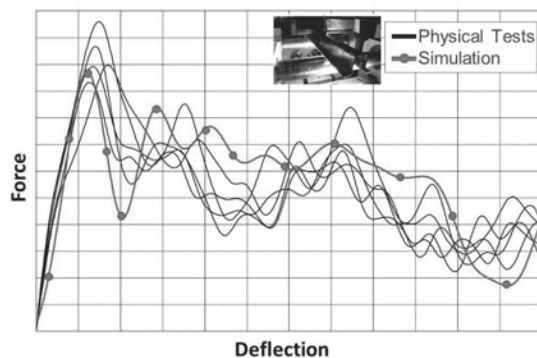


Fig. 13: Crash simulation results vs. test results 3-point bending, dynamic

The results show a very good correlation between simulations and physical tests. The stiffness, yield and fracture behavior of the parts are correctly represented for all load cases and impact velocities, indicating that the developed material model and related material card can correctly predict the complex deformation and failure behavior of organic sheets.

This very good result is only achievable when the geometry is correctly represented in the crash simulation mesh. An element size in the range of 2 mm to 3 mm is used and the local thicknesses must be correctly taken into account.

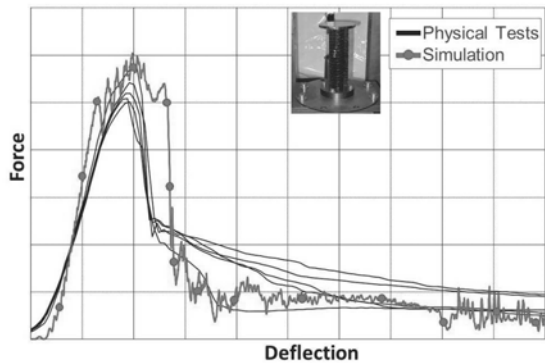


Fig. 14: Crash simulation results vs. test results axial crush, quasi-static

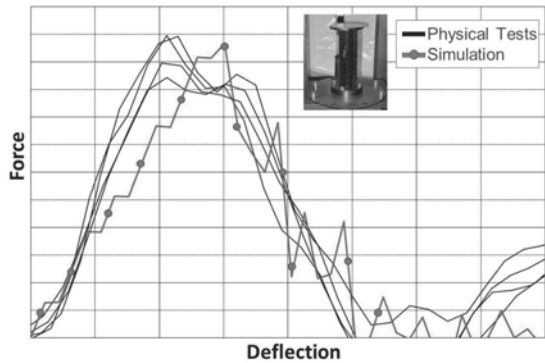


Fig. 15: Crash simulation results vs. test results axial crush, dynamic

#### 4. Future developments

Following the very good crash simulation results with the MF-GenYld+CrachFEM material model for endless-fiber-reinforced thermoplastics, the Ford Motor Company and Kirchhoff Automotive Deutschland GmbH together with MATFEM Partnerschaft Dr. Gese & Oberhofer will work together on the characterization and development of related material cards for additional endless-fiber-reinforced thermoplastic materials to enable the seamless implementation of this promising material group in series production.

In addition, this work is the basis for further material model development for the classic material group of endless-fiber-reinforced thermosets carried out in collaboration between the Ford Research & Innovation Center Aachen and MATFEM Partnerschaft Dr. Gese & Oberhofer.

#### 5. Conclusion

This article shows a possible approach to improved predictability of the FEM simulation of impact-loaded endless-fiber-reinforced thermoplastic parts. Using the MF-GenYld advanced material model in combination with the CrachFEM fracture module a significantly increased accuracy in the deformation and fracture behavior for the analysed endless-fiber-reinforced thermoplastic material can be achieved. The comparison between physical tests and simulation show very good correlation. For this reason the MF-GenYld+CrachFEM advanced material model from MATFEM is in use globally at the Ford Motor Company.

- [1] M. Franzen, H. Lanzerath, G. Oberhofer, H. Gese: Problems and possible solutions in finite element simulation of impact loaded plastic parts in interior applications  
Aachener Kolloquium 'Fahrzeug- und Motorentechnik' ; 8 - 10 October 2007 Aachen
- [2] R. Hill: A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society. London, A193 (1948), p 281
- [3] H. Dell, H. Gese, G. Oberhofer: Advanced yield loci and anisotropic hardening in the material model Mf GenYld + CrachFEM, Proceedings of the Numisheet 2008 September 1 - 5, 2008, Interlaken, Switzerland
- [4] G. Oberhofer, H. Dell, M. Vogler, H. Gese, Current solutions and open challenges in modeling organic sheets, Automotive CAE Grand Challenge, April 12 and 13, 2016

# Innovativer Verarbeitungsprozess thermoplastischer Composites für Porsche Panamera Bremspedal

## Endlofasertechnologie für Sicherheitsbauteile im Fahrzeug

Dipl.-Ing. **D. Häffelin**, BOGE Rubber & Plastics, Damme

### Kurzfassung

Für den modernen Fahrzeugbau steigt der Stellenwert des nachhaltigen und wirtschaftlichen Leichtbaus. BOGE Rubber & Plastics stellt sich dieser Aufgabe u.a. durch die Entwicklung eines vollautomatisierten Verarbeitungsprozesses für Endlofasermaterialien zur Produktion qualitätsgesicherter, kostengünstiger Fahrzeugsysteme in relevanter Stückzahl mit dem Potential zur weiteren Volumensteigerung. Endlofaserverstärkte Kunststoffe bieten Leichtbaupotentiale, jedoch ist ihre bisherige Prozesskette lang und komplex in der Automatisierung. Dies erschwert bisher den wirtschaftlichen Einsatz in der Großserie. Am Beispiel eines Sicherheitsbauteil zeigt die BOGE Rubber & Plastics eine vollautomatisierte Prozesskette für die Produktion von Bremspedalen auf. Sie beginnt bei Kunststoffgranulat und vorkonsolidierten textilen Halbzeugen (Organobleche) und endet mit einem formfallenden Bremspedal. Die dabei im Serienprozess realisierte Gewichtsersparnis beträgt gegenüber konventionellen Pedalen aus Stahl im dargestellten Beispiel 40%. Der hier dargestellte Beitrag zeigt Potentiale und Herausforderungen der Materialklasse der Endlofasern, beschreibt die Herausforderungen bei der Umsetzung im Serienprozess und überträgt aktuelle Prozessforschung auf die Serienanwendung.

### 1. Einleitung

Allgemein kann die Aufgabe des Leichtbaus in die drei Fragen nach

- dem dafür richtigen Werkstoff,
- der dafür besten Form/Gestalt und
- Zusatzaufgaben, die integriert werden können,

gegliedert werden. Diese drei Fragen haben ihre Schnittmenge im Prozess der Bauteilfertigung, was zu einer engmaschigen Vernetzung zwischen Bauteilkonstruktion, Berechnung und Werkstofftechnik führt.

Bei der Frage nach dem richtigen Werkstoff ersetzen vermehrt polymere Lösungen den klassischen Metallbau, zunehmen auch in Primärstrukturen und in Systemen mit Sicherheitsan-

forderungen. Neben wirtschaftlichen Vorzügen der Thermoplaste ist die Begründung in vielen Fällen im günstigen Verhältnis aus Werkstoffmechanik zur Dichte, also im Leichtbaupotential zu finden, dass bei Faserverbundwerkstoffen insbesondere dann hoch ist, wenn:

- a) die der Verstärkung zugegebenen Fasern entlang der Belastungsrichtung verlaufen und
- b) die Fasern lang / endlos

sind.

Unter Endlosfaser werden Faseranteile verstanden, deren Länge in etwa der Größe des Bauteils entsprechen und damit das gesamte Bauteil durchziehen.

Weist ein Material eine höhere spezifische Steifigkeit/Festigkeit auf, deformiert ein daraus hergestelltes Bauteil gleicher Masse weniger oder trägt eine höhere Last. Dieser Zusammenhang ist in Bild 1 dargestellt. Die Abbildung zeigt das Leichtbaupotential von endlos glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) und endlos kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) für die spezifische Festigkeit und Steifigkeit im Vergleich zu Stahl und Aluminium.

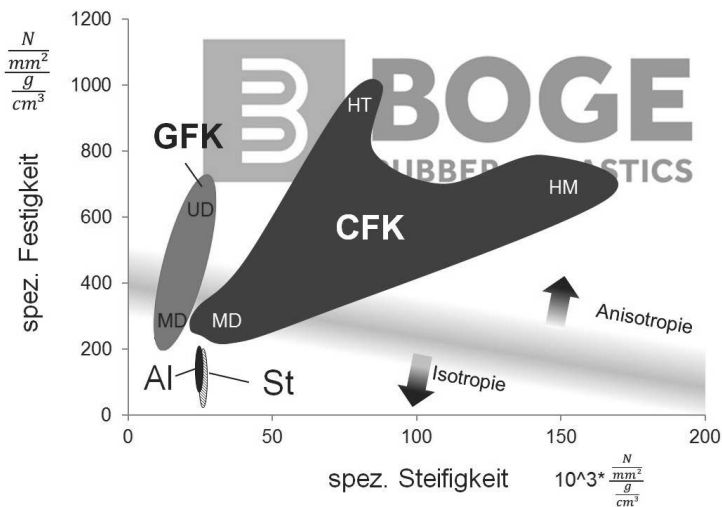


Bild 1: Leichtbaupotential automobiler Werkstoffe (MD: multi-directional; UD: uni-directional; HT: high tension; HM: high modulus)

Die große Bandbreite mechanischer Eigenschaften wird überwiegend von der Faserarchitektur gesteuert. Soll das Material (quasi-) isotrope mechanische Materialeigenschaften aufweisen (die nicht oder wenig richtungsabhängig sind), so müssen Fasern in mehreren Richtungen

in den Werkstoff eingebracht werden (mehrdimensionale Faserorientierung MD aus Bild 1). Werden die Fasern überwiegend in eine Richtung orientiert (unidirektional Faserorientierung UD) verarbeitet, so weist das dabei entstehende Material eine starke Richtungsabhängigkeit auf, das Material ist Anisotrop. Der Wechsel von einer isotropen zu einer anisotropen Werkstoffauslegung ist begleitet durch eine Steigerung des Leichtbaupotentials, jedoch steigt sich das Leichtbaupotential nur in Faserrichtung. Eine genaue Kenntnis der Lastpfadverläufe der Zielbauteile sowie eine Reduktion auf wenige wesentliche Lastpfade sind Grundvoraussetzung der anisotropen Bauteilauslegung mittels gerichteter Endlosfasern (1).

Für ein Bremspedal liegt dieser Umstand dann vor, wenn es auf einen überwiegend torsionsbelasteten Biegeträger zurückgeführt werden kann. Ist die Höhe der Biegelast und Torsionslast bekannt, werden in einem vereinfachten analytischen Ansatz die Fasermengen für den jeweiligen Biege-/ Torsionsfall analytisch berechnet und eine darauf abgestimmte Schichtung der Endlosfasern zu einem anisotropen Organoblech vorgenommen.

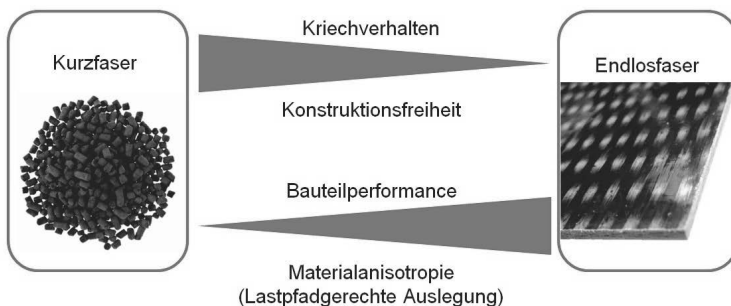


Bild 2: Mechanische Eigenschaftsunterschiede Kurzfaserverstärkung und Endlosfaserverstärkung

Wie auch Stahlbleche nicht endlos tiefgezogen werden können, so können auch endlosfaserverstärkte Materialien ebenfalls nicht beliebig geformt werden. Ausgehend von ebenen, zugelieferten Halbzeugplatten (nachfolgend Organoblech und deren Zuschnitte daraus) wird das Material in einem Umformschritt / Drapiervorgang dreidimensional verformt. Werden die Grenzen der Formbarkeit des Organoblechs überschritten, so entstehen Fehlstellen wie Faserzüge und Falten im Material und als Konsequenz nehmen mechanischen Eigenschaften lokal ab. Aus diesem Grund werden komplexere Bauteilbereiche mit einem kurzfaserverstärkten Spritzgussmaterial versehen.

Wie in Bild 2 dargestellt, bietet die Spritzgussmasse eine hohe Konstruktionsfreiheit, beispielsweise für Rippen, Lager und weitere Funktionsbereiche, allerdings auf Kosten der gezielten Faserausrichtung (Anisotropie). Eine Abstimmung, welche Bereiche in Endlosfaserverwerkstoff und welche in kurzfaserverstärktem Spritzgusswerkstoff ausgeführt werden, ist vor einem technischen wie wirtschaftlichen Hintergrund zu bewerten.



Bild 3: Fußhebelwerk des Porsche Panamera G2 in Endlosfasertechnologie

In Bild 3 ist das Ergebnis dieser Abstimmung anhand des Bremspedals für das Fahrzeug *Porsche Panamera G2* dargestellt. Das Vollkunststoff-Bremspedal besteht im Hauptkörper aus einem durchgehenden, nach unten geöffneten U-Profil aus Endlosfasern. Trittplatte, Lagerstelle, Rippen und ein oben aufsitzendes Sicherheitselement des Pedals bestehen aus kurzfaserverstärktem Kunststoff. Die Oberfläche des Endlosfaseranteils ist glatt, glänzend und geschlossen. Das Bauteil entstammt einer vollautomatisierten Fertigungszelle ohne nachträgliche Oberflächenveredelung.

## 2. Bauteilentwicklung

Ergänzt durch die Wahl von Glasfasern im Endlosfaser- und in der Kurzfaserverstärkung sowie Polyamid als Matrix ist die Werkstoffauswahl abgeschlossen. Die Geometrie/Gestalt des Bauteils ist hingegen noch nicht bestimmt und soll nachfolgend gefunden werden.

Kurzfaserverstärkte und endlosfaserverstärkte Thermoplaste spannen einen Kennwertbereich der Festigkeit und Steifigkeit auf, in dem die Geometrie des Bremspedals vordimensioniert wird. Zusammen mit der Länge des Biege-/Torsionsträgers sowie den zu übertragenden Lasten kann das Bauteil hinsichtlich der Wandstärken und der Bauraumvorgaben abgeschätzt werden. Hier fließt der bereits erwähnte und analytisch abgeschätzte Lagenaufbau mit ein. Randbedingungen der Fertigung sowie optische Aspekte führen in der Konzeption auf das Bauteilkonzept gemäß Bild 3 (nach unten geöffneten Schale mit nach unten ausgezogenen Verstärkungsrippen) (2).

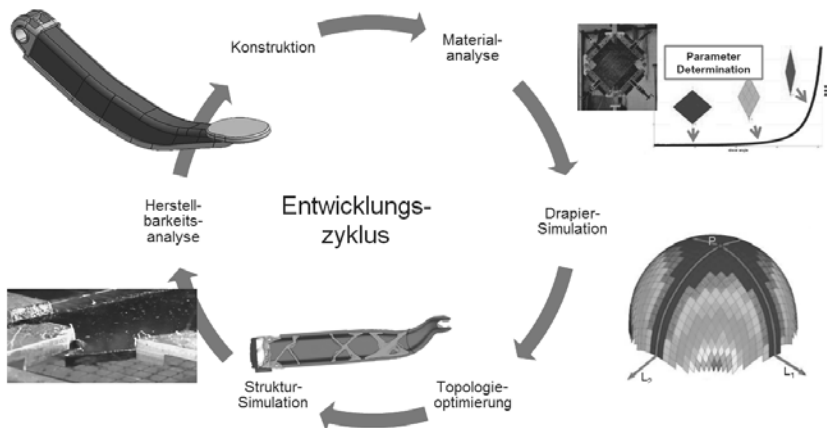


Bild 4: Entwicklungszyklus für ein Bauteil mit Endlosfaserverstärkung

Liegt die erste Konstruktion vor und wurde eine rechnergestützte, isotrope Spannungsmodellierung durchgeführt, lassen sich Bereiche erhöhter Spannung identifizieren und Höhe wie Richtung der Spannung zuordnen. Bauteilbereiche mit hoher Spannung in überwiegend gleicher Richtung markieren das Einsatzpotential der Endlosfasermaterialien. Weiterhin lässt sich mit der Höhe der Spannung und der Aufteilung in Zug-/Druck- Schubspannungen der Lagenaufbau der Endlosfasern genauer dimensionieren.

Bis zu diesem Zeitpunkt liegen eine erste Dimensionierung des Bauteils, der Lagenaufbau des Endlosfasermaterials und die Wandstärken vor. Bereits in dieser frühen Phase der Entwicklung ist es ratsam die Geometrie der Organoblechschale daraufhin zu prüfen, ob eine fehlerfreie Umformung der Fasern, also die Drapierung des Organobleches, möglich ist. Dieser Frage kann sich durch eine rechnergestützte Modellierung oder experimentell genähert

werden. In der experimentellen Prüfung wird eine vergleichbare Faserarchitektur auf einen Modellkern abgelegt und das Materialverhalten im Ablegevorgang sowie das Drapierergebnis beurteilt.

In der rechnergestützten Modellierung findet im einfachsten Fall eine kinematische Drapiersimulation der Geometrie statt, die mit den kritischen Scherwinkeln des Fasermaterials abgeglichen wird. Liegen materialspezifische Kennwerte vor, kann in einer weiterführenden FE-Simulation die Drapierung im Zusammenwirken mit dem Werkzeugeinfluss optimiert werden (3). Ist die Bauteilgeometrie der Endlofaserschale fasergerecht, wird die Geometrie der Spritzgusskomponente bestimmt. Durch rechnergestützte Optimierungsverfahren der Bauteiltopologie unter Berücksichtigung der Endlofaseranteile wird im Rahmen des Verfahrens eine Anordnung von Strukturkomponenten (Anhäufung von Volumenelementen) vorgeschlagen, dem der Konstrukteur durch gezieltes Setzen der Rippen und Aussteifungen folgen kann. Dabei findet stets eine Interpretation durch den Konstrukteur statt. Die Konstruktionsschleife wird mit der Bewertung der Bauteilmechanik weitergeführt. Dabei wird das mit Rippen versehene Modell unter Berücksichtigung

- der anisotropen Endlofaserschale
- der sich durch die Füllung ergebende Faserorientierung der Kurzfaserteile

numerisch analysiert. In der Herstellbarkeitsanalyse werden Werkzeug- und Anlagenkonzepte aufgestellt und die Zykluszeit abgeschätzt. Genügt die Konstruktion allen mechanischen / optischen und wirtschaftlichen Anforderungen, wird die Schleife abgebrochen, ergeben sich Abweichungen, wird ein weiterer Zyklus durchlaufen.

### 3. Prozessentwicklung

Die durchgehende Automatisierung bei der Verarbeitung von Faserverbundwerkstoffen in hoher Stückzahl ist Voraussetzung für die wirtschaftliche Bauteilproduktion. Im Rahmen der Endlofaserverarbeitung aus vorkonsolidierten, thermoplastischen Faserhalbzeugen ergibt sich dabei die Aufgaben des Prozesses zu:

- Zuschneiden der Organobleche zu bauteilspezifischen Einlegern
- Erhitzen dieser Endlofaserzuschnitte auf Umformtemperatur
- Umformung / Drapierung
- Rekonsolidierung der drapierten Organoblechzuschnitte auf Endwandstärke
- Hybridisierung mit kurzfaserverstärkter Spritzgussmasse durch Überfluten / Anspritzen.

Der Prozess beginnt mit dem Organoblech. Vom Zulieferer in bauteilspezifische Zuschnitte angeliefert, können diese der BOGE-Anlage zugeführt werden. Die Handhabung vor der

Aufheizung der Zuschnitte ist unkritisch, weil sie eine glatte und gasdichte Oberfläche aufweisen. Dies ändert sich jedoch mit dem Aufheizen des Organobleches über die Schmelztemperatur der Matrix.

Die bei der Herstellung eingebrachten Verarbeitungsspannungen des Textils im Organoblech relaxieren und dadurch steigt die Wandstärke. In diesem Zustand verhält sich das Organoblech vergleichbar zu einem nassen und heißen Handtuch. Insbesondere während der Aufheizung und während der Umformung muss mechanisch auf die Faser eingewirkt werden, um sie zu halten und in Form zu bringen.

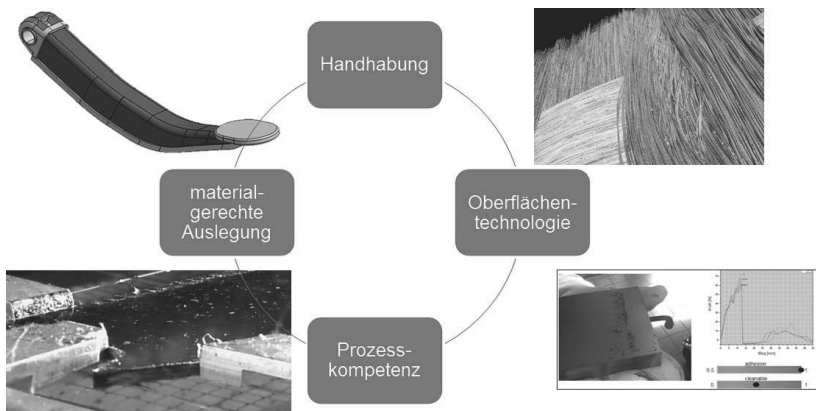


Bild 5: Kompetenzfelder der Verarbeitung

Mit dem Erreichen der Formungstemperatur ist der Werkstoff formbar, die Fasern können gegeneinander verschoben werden, die Oberfläche ist texturiert und mit viskoser Matrix benetzt. Die fasergerechte Handhabung des Werkstoffes in diesem Zustand kann für das Bauteil entscheidend sein. Falten, Faserunterbrechungen oder das separieren von Faserbündeln sind häufige Defekte, die dabei auftreten können (4). Auch die Wahl des richtigen Untergrundes während des Aufheizens des Organobleches und die Art, wie das Organoblech wo gehalten/fixiert werden, sind entscheidende Einflussfaktoren auf die spätere Bauteiloptik und Mechanik (5). Die mit Matrix benetzte Oberfläche des Textils kann zu Ablagerungen im Prozess (an Ofen und Umformwerkzeug) führen. Im automatisierten Ablauf dürfen sich diese Ablagerungen nicht aufbauen und zu Störungen führen. Hierzu ist die richtige Wahl der handhabenden Oberfläche, sei es für Sauger, Werkzeugbeschichtungen oder weiteren Fixierungseinrichtungen einflussgebend.

Das Feld der Prozesskompetenz (**Bild 5**) beschreibt zahlreiche Faktoren, die für die Wirtschaftlichkeit der Verarbeitungskette wichtig sind. Aufheizraten und Regelketten des Ofens, Abkühlraten der erhitzten Organobleche, Transportzeiten, Umformgeschwindigkeit, Werkzeugtemperaturen, Re-Konsolidierungsdrücke und Zuhaltekräfte bei der Umspritzung müssen abgeschätzt und die Anlagentechnik darauf abgestimmt werden.

Da der Einsatz des Verbundwerkstoffs vergleichsweise neu ist, können einige Modelle zur Dimensionierung ungenau sein oder auf ungenauen Annahmen beruhen. Eine Verbesserung und Verfeinerung dieser Modelle verbessert den Entwicklungsprozess und führt zukünftig zu einer zielgenaueren Bauteil- wie Prozessauslegung und damit zur weiteren Gewichtsreduktion.

Eine materialgerechte Geometrie des Endlosfaseranteils endet nicht mit einer positiv bestandenen Drapieranalyse, die eine Ablage in die Bauteilgeometrie freigibt. Insbesondere die Detailkonstruktion der Kantengestaltung und der Umformradien nehmen Einfluss auf den lokalen Faservolumengehalt, Entformbarkeit/Aufnahmequalität der Schale, Anbindung der Schmelze und auf die Ablagerungen im Werkzeug.

Die dargestellten Kompetenzfelder der Verarbeitung zeigen abermals die engmaschige Vernetzung zwischen Werkstofftechnik, Bauteilkonstruktion, Werkzeugtechnik und Berechnung auf und begründet die ebenfalls engmaschige Vernetzung innerhalb der interdisziplinären Entwicklungsteams für Endlosfaserbauteile.

Die Einzelkomponenten der Prozessauslegung werden in den zentralen Prozess integriert. Zwei Varianten bei der Verarbeitung von Organoblechen, in einem einstufigen und einem zweistufigen Prozess, sind bekannt. Beide sind in **Bild 6** vergleichend dargestellt. Beide Verarbeitungsvarianten beginnen mit dem Aufheizen des Organobleches bis zur Formungstemperatur, bei beiden Prozessen wird das heiße Organoblech dem Formungswerkzeug zugeführt und in beiden Prozessen erfolgt eine Formung durch die Schließbewegung des Werkzeuges. Im Unterschied zum zweistufigen Prozess füllt im einstufigen Prozess (**Bild 6** oben) das Organoblech die Werkzeugkavität nicht vollständig aus. Es verbleiben Bereiche, die unmittelbar nach der Schließbewegung mit kurzfaserverstärkter Spritzgießmasse gefüllt werden.

## Einstufiger Prozess



## Zweistufiger Prozess

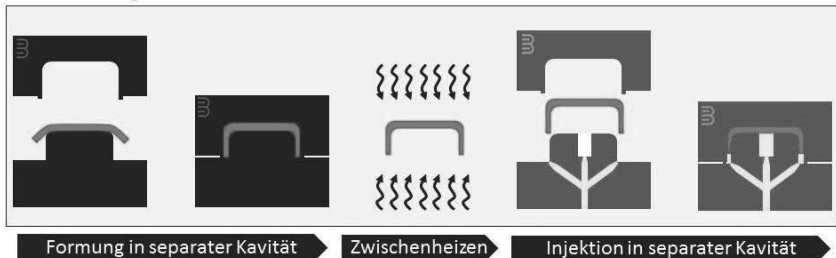


Bild 6: Unterschied zwischen einstufigem und zweistufigem Verarbeitungsprozess

Bei einem zweistufigen Prozess hingegen (**Bild 6** unten) werden zwei Werkzeuge benötigt, eines zur Formgebung des Organobleches und eines zum anspritzen mit Kurzfaserverstärkungen. Es stellt sich die Frage, warum ein zweistufiger Prozess Anwendung findet, wenn der einstufige Prozess ein Werkzeug weniger benötigt und dessen Prozesskette kürzer ist. Die Antwort darauf ergibt sich in

- der geforderten Oberflächenqualität
- dem Faserverlauf im Bereich von T-Stößen
- der Randgestaltung

des Bauteils. Der Unterschied in der Oberflächenqualität ist in **Bild 7** dargestellt. So zeigt die Abbildung des einstufigen Prozesses die geringe Matrixfüllung zwischen den Faserbündeln infolge des geringen Matrixdruckes bei der Re-Konsolidierung. Im einstufigen Prozess wird das heiße und zu formende Organoblech durch einen Kern geformt, der bereits mit den Rippenfeldern versehen ist. Wird nun das Organoblech auf die Endwandstärke des Bauteils verpresst, so ist die Kunststoffmatrix im Textil nicht vollständig eingeschlossen und folgt dem geringsten Fließwiderstand in das offene Rippenfeld.

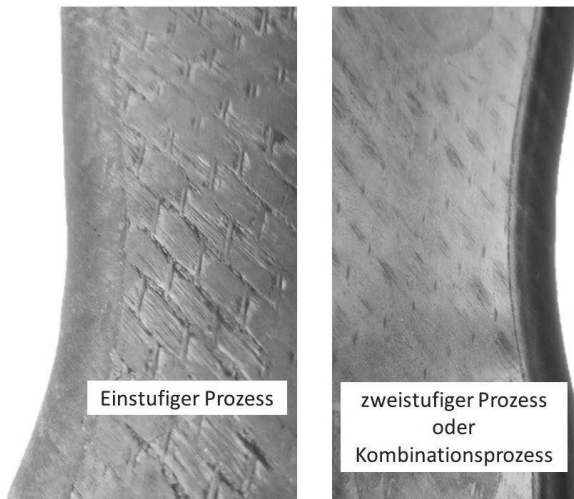


Bild 7: Auswirkung der Prozesswahl auf Bauteiloberfläche

Der zur Abformung der Endoberfläche notwendige Matrixdruck (6) wird nicht erreicht / gehalten und der Quellfluss ins Rippenfeld deformiert Faserlagen über der Rippenbreite, wie in **Bild 8** dargestellt ist.

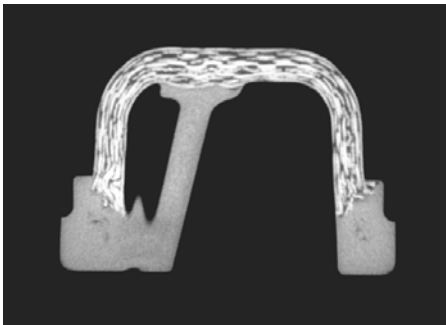


Bild 8: CT-Analyse des Faserverlaufes im einstufigen Prozess

Oftmals ist dies technisch vertretbar, insbesondere wenn die angespritzte Geometrie dünn ist oder wenn keine/geringe Oberflächenanforderungen zu erfüllen sind

Durch die Trennung in zwei Kavitäten ergibt sich jedoch die Möglichkeit das Organoblech auch in den Bereichen exakt zu formen, die später mit Spritzgussmasse hinterfüllt werden. Eine zweite Kavität, die das Organoblech in einem ausgefüllten und abgeschlossenen Volumen formt ist dazu notwendig. So ist es zusätzlich möglich den Randbereich mit einer späteren Hinterschneidung im Organoblech zu versehen oder den Randbeschnitt in die Formung des Organobleches zu integrieren.

Um nun das wirtschaftliche Potential des einstufigen Prozesses mit der Bauteilqualität des zweistufigen Prozesses zu kombinieren, hat BOGE Rubber & Plastics einen Zwischenprozess oder Kombinationsprozess entwickelt (7). Dabei entsteht in jedem Öffnungsvorgang der Presse formfallend jeweils ein Bauteil (einstufiger Prozess) aus einem Werkzeug mit zwei Kavitäten (zweistufiger Prozess). Ausgangspunkt hierfür ist der zweistufige Prozess, dessen Verarbeitungsschritte neu angeordnet werden, wie in **Bild 9** dargestellt ist.

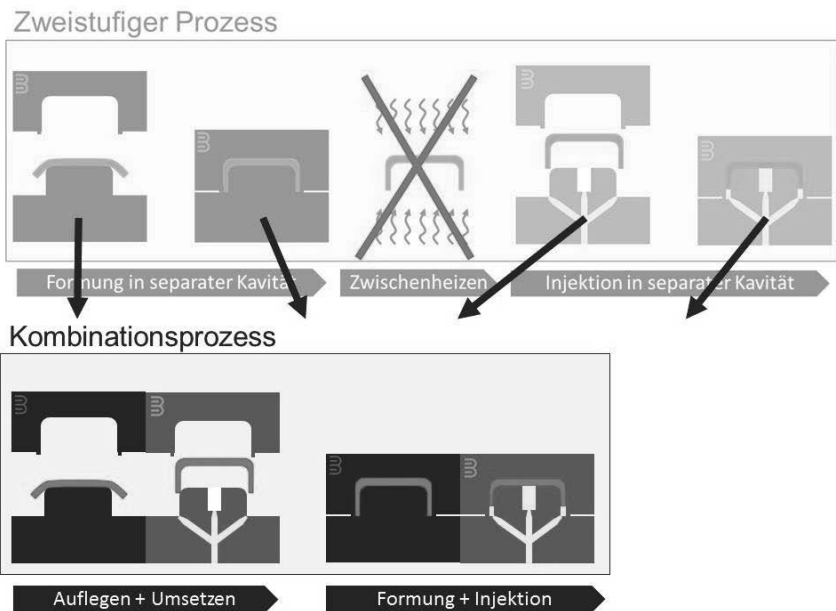


Bild 9: Anordnung im Kombinationsprozess

Grundvoraussetzung für diesen Kombinationsprozess ist die Kantengestaltung des umgeformten Organobleches im Umformwerkzeug. Wenn kein nachträglicher Randbeschnitt des

geformten Organobleches notwendig ist, kann dieses noch heiß entnommen und zur Weiterverarbeitung in die Spritzkavität eingelegt werden.

Anhand der schematisierten Werkzeugdarstellung in **Bild 9** wird nachfolgend der Ablauf beschrieben. Auf der linken Seite (schwarz) wird der plastifizierte Organoblech-Zuschnitt zur Formung/Drapierung zugeführt. Im Schließvorgang des Werkzeuges wird dieser zu einem U-Profil geformt, auf Endwandstärke verpresst und dabei der Matrixdruck durch das vollständige Abschießen der Kavität aufgebaut / erhalten. Das geformte Profil kühlt auf die Werkzeugtemperatur ab und erstarrt. In einer derartigen Anordnung kommt der Temperatur des Umformwerkzeuges doppelte Bedeutung zu. Sie nimmt Einfluss auf die Umformung der Organoblechschale und bestimmt die Temperatur des entformten Endlosfaserprofils, auf dessen Oberfläche die Schmelze auftrifft.

Im Öffnungsvorgang des Werkzeuges wird das U-Profil automatisiert entnommen und in die nebenliegende Kavität versetzt. Gleichzeitig wird der nächste heiße Organoblech-Zuschnitt zugeführt. Ist das Werkzeug erneut geschlossen, trifft die kurzfaserverstärkte Thermoplastschmelze auf das U-Profil und bindet daran stoffschlüssig an. Zeitgleich wird in der Formungskavität das nächste Endlosfaserprofil geformt. Im anschließenden Öffnungsvorgang wird gleichzeitig ein heißes Organoblech zugeführt, das geformte Endlosfaserprofil geformt und das Endbauteil entnommen. Dieser letzte Vorgang wiederholt sich bis zum Ende der Produktion. Der Prozessschritt des Zwischenheizens des zweistufigen Prozesses nach dem Stand der Technik entfällt, die Prozesskette kann durchgehend automatisiert werden, die Vorteile eines zweistufigen Prozesses hinsichtlich Detailkonstruktion und Oberflächeneigenschaften werden mit den wirtschaftlichen Vorteilen eines einstufigen Prozesses kombiniert, die Prozesskette verkürzt sich.

## Literaturverzeichnis

1. **VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE.** Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund Grundlagen. [Buchverf.] VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik. Düsseldorf : VDI, 1989.
2. Kamphaus, T., Wagener, K. und Rogowski, W. *DE 10 2013 206 647 A1* DE, 16.10.2014.
3. *Thermoplastische Composite Hybridbauteile.* **Lutter, F., Willms, P. und Brandt, M.** Fortschritte in der Kunststofftechnik : FH Osnabrück, 2015. Lanxess Deutschland GmbH.
4. **Bel, S. et al.** FINITE ELEMENT MODEL FOR NCF COMPOSITE REINFORCEMENT PREFORMING: IMPORTANCE OF INTER-PLY SLIDING. *Composites: Part A.* Part A 43 (2012) 2269-2277, 2012.
5. **Biermann, D., Hufenbach, W. und Seliger, G.** *SERIENTAUGLICHE BEARBEITUNG UND HANDHABUNG MODERNER FASERVERSTÄRKTER HOCHLEISTUNGSWERKSTOFFE.* Dresden : Technische Universität Dresden, 2008.
6. **Reuter, W.** HOCHLEISTUNGS-FASERKUNSTSTOFF-VERBUNDE MIT CLASS-A-OBERFLÄCHENQUALITÄT FÜR DEN EINSATZ IN DER FAHRZUGAUSSENHAUT. Kaiserslautern : Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2001. ISBN-3-934930-15-8.
7. **Beutler, O.** FERTIGUNG DES ORGANOBLECHBREMSPEDALS. *Porsche OPENING.* DAMME : BOGE Rubber & Plastics , 2015. Bd. Präsentation.



# Energieeffiziente Herstellung von Thermoplast-CFK Bauteilen im einstufigen Direktverfahren

Dr.-Ing. J. Reddemann, Dr.-Ing. H. Seifert, AUDI AG, Ingolstadt

## Kurzfassung

Endlosfaserverstärkte Kunststoffe werden in der Automobilindustrie bisher vorwiegend in Anwendungsbereichen mit geringen Stückzahlen eingesetzt. Ein Grund sind unter anderem die sehr langen Zykluszeiten duroplastischer Matrixsysteme sowie der damit verbundene hohe manuelle Fertigungsaufwand. Thermoplastische Faserverbundwerkstoffe bieten dagegen über automatisierte Prozessrouten die Möglichkeit, auch größere Stückzahlen wirtschaftlich herzustellen. Der Energieeinsatz zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffbauteilen ist jedoch bisher unabhängig vom verwendeten Matrixsystem noch sehr hoch, so dass der Gewichtsvorteil in einer ganzheitlichen Bilanzierung selten den energetischen Mehraufwand der Herstellungsphase ausgleichen kann. Durch die Integration mehrerer Prozessschritte in einem Werkzeug lässt sich dieser Energieeinsatz in der Herstellungsphase jedoch weiter reduzieren.

## 1. Einleitung

Immer striktere Umweltauflagen und zunehmende Craschanforderungen haben dazu geführt, dass der Leichtbau im Automobil bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge in der Vergangenheit zunehmend an Bedeutung gewonnen hat. Faserverstärkte Kunststoffe können dabei gegenüber konventionellen Leichtbauwerkstoffen insbesondere durch die hohe Designfreiheit bei gleichzeitig hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten punkten. Je nach Anwendungsfall kann durch Leichtbau mit Kohlenstofffasern bis zu 80 % Gewicht gegenüber Stahl und bis zu 50 % gegenüber Aluminium eingespart werden [2].

Der derzeitige Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Automobilbau beschränkt sich bisher allerdings vorwiegend auf Baureihen mit kleinen Stückzahlen. Hohe Herstellungskosten durch lange Zykluszeiten und energieintensive Prozessrouten sowie ein hoher Materialpreis für das Ausgangsmaterial der Kohlenstofffasern sind häufige Gründe für die Ablehnung des Einsatzes von Faserverbundkunststoffen in der Großserie. Für einen höheren Anteil von Faserverbundkunststoffen im Automobilbau sind demnach Verbesserungen der Prozesstechnologien und die Entwicklung neuer Prozessrouten zur Herstellung von Faserverbundbauteilen zwingend notwendig. [1, 3, 4]

Im Zuge der zunehmend strikteren CO<sub>2</sub>-Gesetzgebung und dem damit einhergehenden Trend zur Elektromobilität wird zukünftig nicht mehr nur das reine Fahrzeuggewicht entscheidend für die Darstellung der Umweltauswirkungen sein. Bei der Betrachtung der ganzheitlichen Umweltbilanz (auch Ökobilanz oder LCA – Life Cycle Assessment) eines Fahrzeugs wird deutlich, dass für ein Fahrzeug der Kompaktklasse mit einem konventionellen Ottomotor bei einer Laufleistung von 200.000 km etwa 80 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Nutzung und etwa 20 % auf die Herstellung des Fahrzeugs entfallen (Bild 1). Bei einem batteriebetriebenen Fahrzeug (BEV), welches mit Strom aus regenerativen Quellen betrieben wird, entfallen hingegen 95 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Herstellungsphase und lediglich etwa 5 % auf die tatsächliche Nutzung des Fahrzeugs. [5]

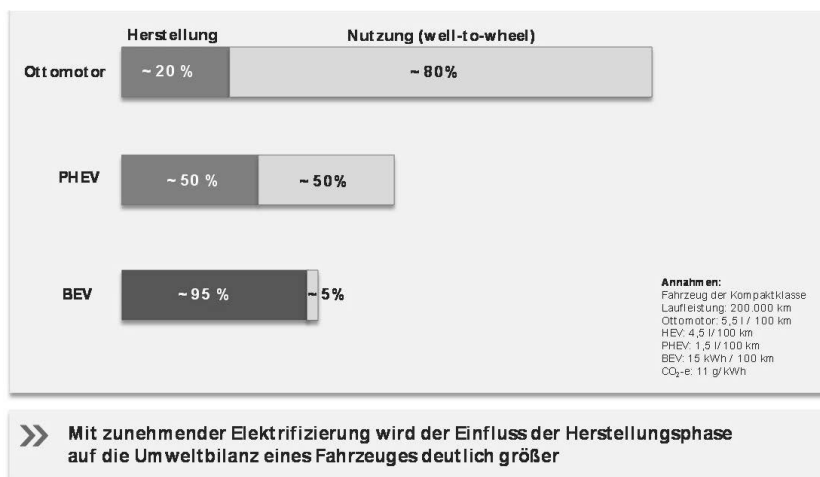


Bild 1: Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschiedlicher Antriebskonzepte [5]

Dieser Vergleich macht deutlich, dass mit zunehmendem Grad der Elektrifizierung von Fahrzeugen nicht mehr nur das reine Fahrzeuggewicht, sondern auch die Effizienz der Herstellungsprozesse von Fahrzeugen in den Vordergrund rückt. Für zukünftige Fahrzeugprojekte wird es deshalb umso wichtiger, auch die zugehörigen Herstellungsprozesse energieeffizient auszulegen. Ein Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Herstellung faserverstärkter Kunststoffbauteile ist das so genannte In-Mould-Impregnation-Verfahren.

## 2. Das In-Mould-Impregnation-Verfahren

Das In-Mould-Impregnation-Verfahren wurde bei der Neue Materialien Fürth GmbH in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Kunststofftechnik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg im Rahmen eines vom Bayrischen Wirtschaftsministerium geförderten Projekts „CFK-Großserie“ erforscht und im Jahr 2012 mit dem AVK Innovation Award ausgezeichnet.

Durch die Verfahrenskombination von Aufheizen, Imprägnierung und Umformung zu einem Prozessschritt ergeben sich verschiedene Vorteile gegenüber den etablierten mehrstufigen Herstellungsverfahren. Die separate Herstellung der Halbzeuge und ihre anschließende Umformung erforderten bisher ein mehrfaches Aufheizen der verwendeten Werkstoffe. Durch die Zusammenfassung all dieser Schritte in einem Werkzeug wird nicht nur der Energiebedarf während der Herstellung reduziert, sondern auch die gesamte Zykluszeit verringert. Darüber hinaus lassen sich die trockenen Fasern lastgerecht auslegen, so dass die Gestaltungsfreiheit deutlich zunimmt. [1, 6, 7]

Die hohe Viskosität der thermoplastischen Schmelze erfordert während der gesamten Imprägnierungsphase eine ausreichend hohe Temperatur, damit die Matrix nicht vorzeitig einfriert. Dies kann für einstufige Verfahren entweder durch eine variotherme Temperierung des Werkzeuges, durch direktes Aufheizen der Fasern oder durch eine Kombination aus beiden Varianten gewährleistet werden [2]. Um die Temperatur aufrecht zu erhalten, wird im In-Mould-Impregnation-Verfahren die Wärme direkt in den Verstärkungsfasern generiert. Dabei wird der elektrische Widerstand der Kohlenstofffasern zur Wärmeerzeugung ausgenutzt. Durch Anlegen eines elektrischen Stroms erhitzen sich die Kohlenstofffasern auf Grund ihres ohmschen Widerstandes innerhalb von wenigen Sekunden auf eine Zieltemperatur, bei der ein stationärer Zustand erreicht wird. Dieser Zustand ist unter anderem von der Stromstärke und der Geometrie der textilen Struktur abhängig. [1]

Bild 2 zeigt die einzelnen Verfahrensschritte des In-Mould-Impregnation-Verfahrens. Zunächst wird das trockene Faserhalbzeug in die Kavität des Spritzgusswerkzeugs eingelegt (Schritt 1). Nach dem Schließen des Werkzeugs wird das Faserhalbzeug durch eine gefeder- te Tauchkante in seiner Position fixiert. In Schritt 1 und 2 ist das Werkzeug noch nicht komplett zugefahren, so dass zunächst noch ein Prägespalt innerhalb der Kavität verbleibt. In der gefederten Tauchkante sind Kontaktleisten integriert, durch die ein elektrischer Strom in das Faserhalbzeug geleitet werden kann. In Schritt 2 wird elektrischer Strom durch die Kontak- leisten in das Faserhalbzeug eingeleitet und es kommt durch den elektrischen Widerstand der Kohlenstofffasern zu einer Erwärmung des textilen Halbzeugs auf eine Zieltemperatur, die idealerweise im Verarbeitungsbereich der thermoplastischen Matrix liegt.

Sobald diese Zieltemperatur im stationären Zustand erreicht ist, wird der Prägespalt über das Spritzaggregat mit Matrixmaterial gefüllt. Dies geschieht zunächst langsam und mit niedrigem Einspritzdruck, um die Faserorientierung im Faserhalbzeug nicht zu beeinflussen und um zu verhindern, dass die Matrix schon in das Faserhalbzeug eindringt. Sobald der Prägespalt komplett mit der vorgegebenen Einspritzmenge gefüllt ist, wird die Kavität vollständig über die Schließkraft des Spritzgusswerkzeugs zugefahren (Schritt 3). Dadurch wird die thermoplastische Schmelze in Dickenrichtung in das Faserhalbzeug infiltriert und die Verstärkungsfasern unter gleichmäßigem Druck über die Schließkraft mit Matrix imprägniert. In Schritt 4 wird nach Ende des Prägevorgangs der Strom abgestellt und das Bauteil kühlt bis auf Entformungstemperatur der Kunststoffmatrix ab. Anschließend kann das Werkzeug geöffnet und das fertig imprägnierte Bauteil entnommen werden. [1]

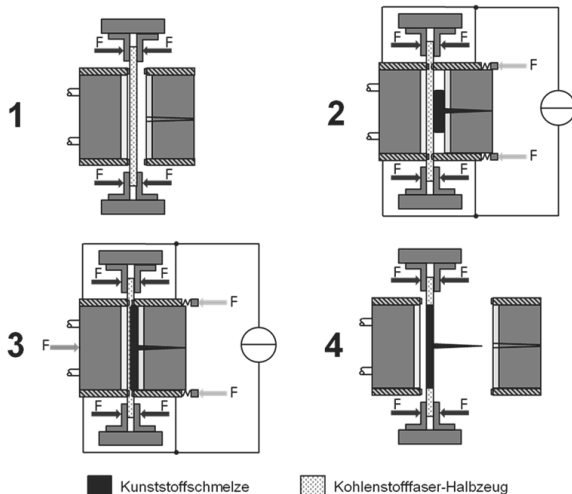


Bild 2: Schematische Darstellung der Verfahrensschritte im In-Mould-Impregnation-Prozess nach [6]

Bild 3 stellt den Prozessablauf der In-Mould-Impregnation in Abhängigkeit der Zeit dar. Die Stromstärke sowie die Dauer der Stromversorgung sind dabei in der Spritzgusstechnik zwei wesentliche neue Stellgrößen für den gesamten Herstellungsprozess. Ebenso kann für den Prägehub ein definierter Startzeitpunkt ausgewählt werden, so dass bereits während des Einspritzvorgangs mit dem Prägvorgang begonnen werden kann.

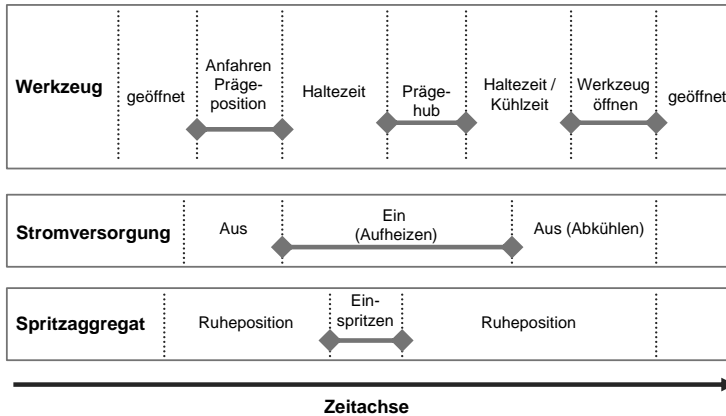


Bild 3: Prozessablauf während der In-Mould-Impregnation in Abhängigkeit der Zeit [1]

## 2. Herstellung von Probekörpern

Textile Aufbauten, die während der Widerstandserwärmung starke Inhomogenitäten aufweisen, wurden zur Analyse des Einflusses der Widerstandserwärmung auf die Imprägnierqualität im In-Mould-Impregnation-Verfahren mit thermoplastischem Kunststoff imprägniert. Die Herstellung erfolgte auf einem Probekörperwerkzeug bei der Neue Materialien Fürth GmbH (siehe Bild 4).

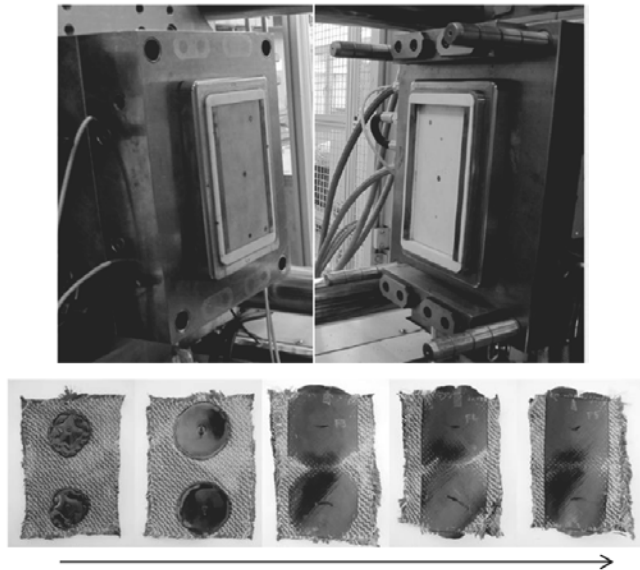


Bild 4: Probekörperwerkzeug auf Spritzgussmaschine und Füllstudie zum In-Mould-Impregnation-Prozess [1]

Beispielhaft sind im Folgenden die Untersuchungen eines zweilagigen Lagenaufbaus mit dem parallelen Lagenaufbau  $+45^\circ/+45^\circ$  sowie dem alternierenden Aufbau  $+45^\circ/-45^\circ$  dargestellt. Dabei zeigt sich bereits in der Infrarotaufnahme eine ausgeprägte inhomogene Erwärmung über der Fläche. Bild 5 zeigt die Temperaturverteilung an der Oberfläche aus der IR-Aufnahme in einem Aufheizprüfstand. Die nicht direkt durchkontaktierten Kohlenstoff-fasern bleiben während der Bestromung vollständig kalt.

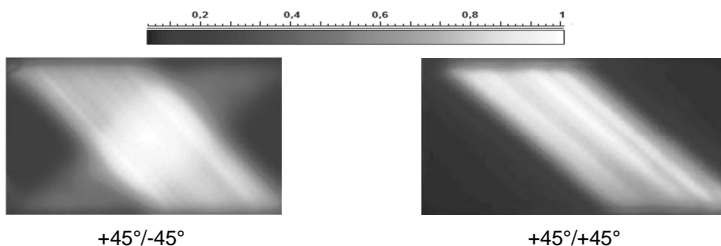


Bild 5: Relative Oberflächentemperatur zweilagiger textiler Aufbauten unter Widerstandserwärmung (elektrische Kontaktierung entlang der langen Seiten) [1]

Der Temperaturverlauf eines Thermoelementes zwischen den beiden Lagen ist in Bild 6 dargestellt. Sobald der Prägevorgang beginnt, zeigt sich ein starkes Absinken der Temperatur. Dies ist insbesondere auf die veränderte Temperaturverteilung im aufgeheizten Gelege unter Druck zurückzuführen. Sobald ein Druck auf dem mehrlagigen Aufbau anliegt, kommt es zu einem Angleichen der Temperaturunterschiede während der Widerstandserwärmung. Dabei nimmt die absolute Temperatur über der gesamten Fläche des aufgeheizten Halbzeugs entsprechend ab. Zusätzlich dazu wird unter Druck auch ein größerer Anteil Wärme in die Werkzeugkavität übertragen. [1]

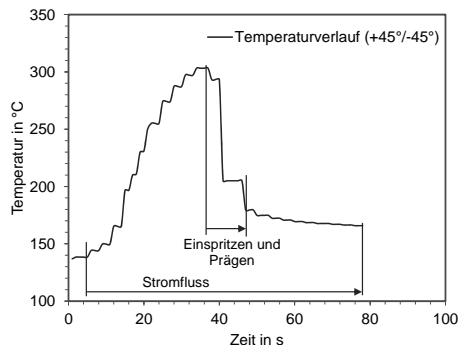


Bild 6: Zeit/Temperaturverlauf bei einem Aufbau (+45°/-45°) und 30 s Stromfluss nach Ende des Prägevorgangs, Thermoelement zwischen den beiden Lagen [1]

Eine Schliiffbildanalyse der hergestellten Probekörper zeigt eine deutlich homogenere Imprägnierung beim Aufbau +45°/-45° gegenüber dem Aufbau +45°/+45°. Bereits auf der angussfernen Rückseite der Platten lassen sich beim Aufbau +45°/+45° zahlreiche trockene Kohlenstofffasern erkennen (Bild 7). Der Bereich der trockenen Kohlenstofffasern stimmt auch mit den aus den Aufheizversuchen bekannten kalten Bereichen während der Widerstandserwärmung überein. Temperaturunterschiede, die bereits während der Widerstandserwärmung der trockenen Fasern auftreten und unter Druckbelastung nicht ausgeglichen werden, führen in den untersuchten Aufbauten dazu, dass sich diese Unterschiede auch in der Imprägnierqualität der hergestellten Platten wiederfinden.

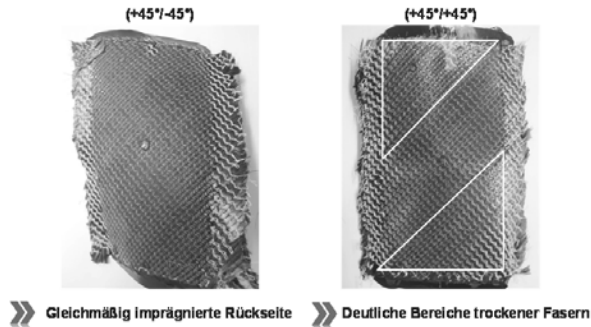


Bild 7: Rückseite der imprägnierten Probekörper und gekennzeichnete Bereich trockener Fasern [1]

Bei der Berechnung der eingesetzten Leistung zum Aufheizen der textilen Strukturen wird deutlich, dass bei mehrlagigen Aufbauten bereits durch geschickten Lagenaufbau (Beispiel  $+45^\circ/-45^\circ$ ) mit deutlich weniger Leistung ähnliche Maximaltemperaturen erreicht werden können. Bild 8 zeigt dies in einer Gegenüberstellung der einlagigen und zweilagigen Aufbauten. Sofern die Durchschnittstemperaturen ausreichend für eine vollständige Imprägnierung des Bauteils sind, lässt sich durch den Lagenaufbau zusätzlich Energie einsparen.

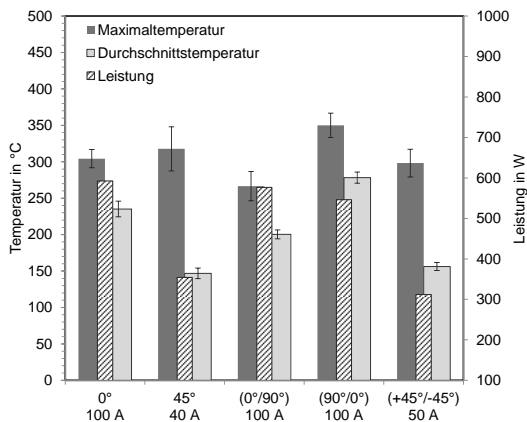
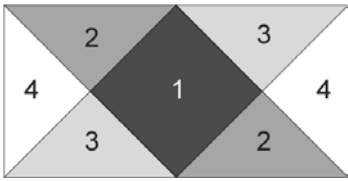


Bild 8: Maximaltemperatur und Durchschnittstemperatur sowie Heizleistung im Aufheizprüfstand bei ein- und zweilagigen Aufbauten [1]

Eine thermografische Analyse der Widerstandserwärmung direkt im Spritzgusswerkzeug ist nicht möglich, so dass die Temperaturverteilung unterschiedlicher Lagenaufbauten anhand eines Simulationsmodells in ABAQUS® abgebildet wurde. Tabelle 1 zeigt eine Gegenüberstellung der simulierten Temperatur eines Lagenaufbaus +45°/-45°. Analog zu den Aufheizversuchen zeichnet sich auf der Oberfläche der oberen -45° Lage ebenfalls die untere +45° Lage ab, so dass vier unterschiedliche Temperaturbereiche entstehen. Das entwickelte Simulationsmodell zeigt bereits eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchen und lässt sich somit auch für die Vorhersage zur Temperaturverteilung von komplexeren Lagenaufbauten heranziehen. [1]

Tabelle 1: Vergleich der einzelnen Temperaturen der Variante +45°/-45° (drucklos) [1]

				
	Bereich 1 in °C	Bereich 2 in °C	Bereich 3 in °C	Bereich 4 in °C
<b>Versuch</b>	267 – 317	207 – 247	127 – 147	42 – 67
<b>Simulation</b>	287 – 309	232 – 284	157 – 192	40 – 67

### 3. Zusammenfassung

Die Grundlagenuntersuchungen zur In-Mould-Impregnation haben gezeigt, dass eine Zusammenfassung der Prozessschritte Aufheizen, Umformen und Imprägnieren in einem Werkzeug auf einer konventionellen Spritzgussmaschine möglich ist. Bereits die Einsparung des Zwischenprozesses der Halbzeugherstellung reduziert den Energieeinsatz deutlich. Darüber hinaus ist die elektrische Widerstandserwärmung im Vergleich zu den konventionellen Aufheizverfahren ein Aufheizverfahren mit sehr geringen Verlusten und einem Wirkungsgrad von nahezu 99 % [1]. Die Wärme kann durch die intrinsische Aufheizmethode direkt dort eingebracht werden, wo sie benötigt wird. Erste Simulationsmodelle bieten für das In-Mould-Impregnation-Verfahren die Möglichkeit, anhand der Temperaturverteilung eine Aussage über die Imprägnierqualität im fertigen Bauteil zu geben.

Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Verbundvorhabens „TC-Fast: Energieeffiziente Schnellverarbeitung von carbonfaser-verstärkten Thermoplasten“ mit einer Laufzeit vom 01.07.2016 bis zum 30.06.2019 werden weiterführende Untersuchungen zum In-Mould-Impregnation-Verfahren mit dem Ziel einer weiteren Prozessoptimierung durchgeführt. Bei entsprechender Reife des Prozesses lässt sich die tatsächliche Energieeinsparung dann beispielsweise direkt mit der konventionellen Organoblechherstellung abgleichen. Neben den Vorteilen hinsichtlich der Energieeffizienz ist außerdem noch die erhöhte Gestaltungsfreiheit durch die trockene Drapierung der Kohlenstofffasern mit zu berücksichtigen. Dazu werden im Rahmen des Verbundvorhabens noch weitere Geometrien und Demonstratoren untersucht.

#### Quellen:

- [1] Reddemann, J: Beitrag zum energieeffizienten Einsatz von Thermoplast-CFK im Automobilbau, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg 2016
- [2] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 2. Auflage. Carl Hanser Verlag, München 2014
- [3] Lässig, R.; Eisenhut, M.; Mathias, A.; Schulte, R, et al.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen: Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Roland Berger Strategy Consultants 2012,  
[http://lightweight.vdma.org/documents/266675/2307595/Roland-Berger-Studie\\_CT\\_2012](http://lightweight.vdma.org/documents/266675/2307595/Roland-Berger-Studie_CT_2012) (20.11.2016)
- [4] Holschuh, R.; Becker, D.; Mitschang, P.: Verfahrenskombination für mehr Wirtschaftlichkeit des FVK-Einsatzes im Automobilbau, lightweightdesign (2012), 04, S. 14–19.
- [5] Heil, U.: LCA - Eine Methode zur nachhaltigen Produktentwicklung, VDI Kunststoffe im Automobilbau (2015), S. 221–232.
- [6] Müller, T.; Drummer, D.; Linn, C.; Hoffmann, L.: Ein energieeffizientes Verfahren für den Leichtbau, Kunststoffe 102 (2012), 6, S. 70–73.
- [7] Linn, C.; Hoffmann, L.; Müller, T.; Drummer, D.: Herstellung von CFK-Bauteilen durch Direktimprägnierung mit Thermoplasten in der Spritzgießmaschine, lightweightdesign (2012), 3, S. 56–61.

# 3-D Direktablage von Verstärkungsfasern im Faserblasverfahren

## Stand der Technik bei der Naturfaserverarbeitung

**R. Korn**, M.Sc., BMW AG (über Fa. AlphaKraft GmbH), München:  
**Dr.-Ing. T. Reußmann**, Textil- u. Werkstoff-Forschung, TITK e.V.,  
Rudolstadt

Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) sind interessante Leichtbauwerkstoffe und kommen vor allem in der Automobilindustrie bei der Herstellung von Innenverkleidungsteilen (Instrumententafelträger, Türträger, Seitenverkleidungen) zum Einsatz. Die Bauteilfertigung erfolgt in einem mehrstufigen Prozess:

1. Halbzeugherstellung (Erzeugung von Fasermatten)
2. Bauteilherstellung (Formpressen von Faserverbunden)

Bei der Halbzeugherstellung in der Textilindustrie werden die Naturfasern aufgeschlossen, gemischt und über aerodynamische Vlieslegung oder durch Krempeln zu Fasermatten verarbeitet. Die Naturfasermatten können beim Vlieshersteller zugeschnitten und als fertige Platten geliefert werden.

Die Bauteilherstellung ist in der Kunststoffindustrie angesiedelt und findet meist im Formpressverfahren statt. Dabei wird je nach eingesetztem Matrixmaterial zwischen duroplastischen und thermoplastischen Naturfaserverbunden unterschieden. Im Vergleich zu anderen Technologien wie z.B. dem Spritzgießverfahren hat das Formpressverfahren einige Nachteile:

- keine variablen Bauteildicken darstellbar
- keine Verstärkungsrippen möglich
- begrenztes Umformverhalten der Fasermatten
- 10-20% Stanzabfall bei der Bauteilherstellung
- lastgerechte Dimensionierung nur bedingt möglich
- geringe Flexibilität bei der Mattenherstellung.

Der internationale Wettbewerb zwingt die Hersteller zur weiteren Rationalisierung von Prozessen, Reduzierung des Bauteilgewichtes, Integration von Verstärkungselementen und Anbauteilen sowie Einsparung von Materialkosten bei gleichzeitig globaler Verfügbarkeit. Das trifft auch auf die Herstellung von naturfaserverstärkten Kunststoffbauteilen zu. Mit der konventionellen Mattentechnologie sind hierbei Grenzen gesetzt.

## Faserblasen von 3D-Konturen

Das Faserblasen ist eine neuartige Technologie aus dem Bereich der Textiltechnik, um endlich lange Fasern vom Kurzschnitt bis zur mittleren Faserlänge von 80 – 100 mm direkt zu verarbeiten. Das Fasermaterial wird mittels Luftstrom transportiert und in eine luftdurchlässige Form (Einblaswerkzeug) formfüllend eingeblasen. Bei Zumischung von thermoplastischen Binfasern kann das Fasergelege nachfolgend thermisch verfestigt werden. Somit entsteht ein konturgenauer 3D-Vorformling, der händelbar ist und für den weiteren Einsatz zur Verfü- gung steht. Die wesentlichen Vorteile dieses Verfahren sind:

- Einsparung von Prozessschritten
- Darstellung dreidimensionaler Bauteilformen möglich
- Anforderungsspezifische Bauteilquerschnitte
- Reduzierung von Produktionsabfall

Das Verfahren hat nur wenige Prozessschritte und bietet viele Freiheitsgrade bezüglich des Faserstoffeinsatzes und der herstellbaren Formkörpergeometrie. Je nach geplanter Anwen- dung und erforderlicher Bauteilstückzahl können

- Schiebetischanlagen (für Kleinserien und Technikumsbetrieb)
- Drehkreisanlagen (für Serienanwendungen)

zum Einsatz kommen. Das Verfahrensprinzip verdeutlicht die nachstehende Abbildung 1.

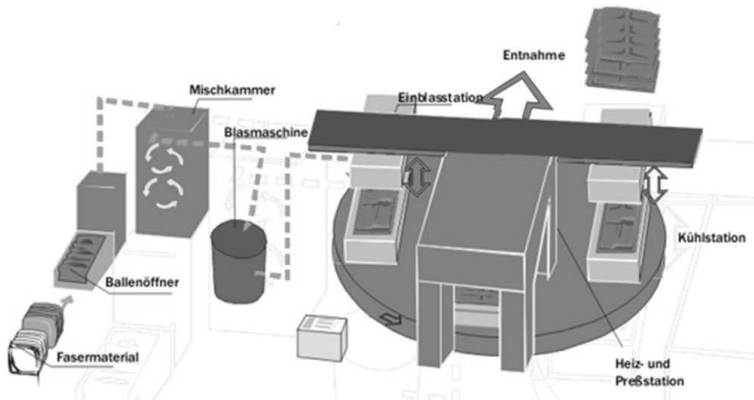


Bild 1: Fasereinblasanlage nach dem Drehkreisprinzip [1]

Die Fasern werden zunächst geöffnet, gemischt und den Faserspeisern zugeführt. Aus den Speisern wird die Fasermischung über einen SPS gesteuerten Programmablauf der Blasma- schine zugeführt und pneumatisch in eine Zirkulationsringleitung zum Einblaswerkzeug ge- fördert. Über den Hub der Einblasstation lassen sich an dem Einblaswerkzeug unterschiedli-

che Höhen einstellen. Das Einblasen des Fasermaterials erfolgt mit programmgesteuerten Blasdüsen. Überschüssige Fasern (z.B. im Augenblick der kompletten Füllung im Werkzeug) werden über eine Ringleitung zurück in den Vorratsspeicher gefördert und stehen dort für den nächsten Füllvorgang bereit.

Im anschließenden thermischen Verfestigungsprozess wird der im Einblaswerkzeug erzeugte Faserkuchen in die Heiz- und Pressstation gefahren, dort verdichtet, mit Heißluft durchströmt und nachfolgend kühlend verpresst. Dabei kann der Verdichtungsgrad je nach Erfordernis eingestellt werden. Nach der Kühlung wird die Form geöffnet und der 3D-Faserforming entnommen.

## Anwendung des Faserblasverfahrens für die Verbundherstellung

Ausgehend von den Vorteilen des Faserblasverfahrens erscheint diese Technologie auch für die Herstellung von hoch verdichteten Verbundbauteilen interessant. Im Vergleich zur Mat-  
tentechnologie kann mit dem 3D-Faserblasen die Prozesskette durch die Einsparung der Halbzeu-  
gerherstellung deutlich verkürzt werden, indem Fasermaterial direkt in ein temperiertes, kontu-  
riertes 3-dimensionales Werkzeug eingeblasen und anschließend mit hohem Druck verpresst wird (siehe Abbildung 2).

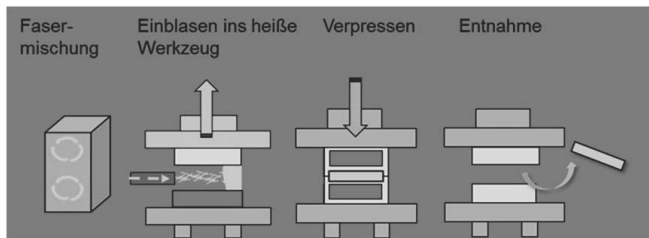


Bild 2: Schematischer Verfahrensablauf bei der Verbundherstellung [2]

Um das Potenzial der Verfahrenstechnik bestimmen zu können, liefen im TITK gemeinsam mit den Industriepartnern Yanfeng Automotive Interiors, SGL Automotive Carbon Fibers GmbH & Co. KG und der BMW-Group grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffbauteilen im 3D-Faserblasverfahren. Folgende Herausforderungen waren zu lösen:

- Optimierung der Materialzusammensetzung
- Werkzeug- und Formenbau
- konturgenaue 3D-Ablage in der Einblasstation
- schneller Transfer in die Presse
- Realisierung kurzer Zykluszeiten bei geringem Energiebedarf

Neben der Entwicklung und Qualifizierung des 3D-Faserblasverfahrens für die direkte Herstellung von Verbundbauteilen waren weitere Ziele des Projektes im Zusammenhang mit der Forderung nach Leichtbaulösungen in der Automobilindustrie:

1. Reduzierung des Bauteilgewichtes
2. Optimierung des mechanischen Eigenschaftsniveaus durch Zumischung von Sekundär-Carbonfasern (sCF)

### Anlagentechnik und Versuchsmaterialien

Für das 3D-Faserblasen steht im TITK eine Pilotanlage von der Firma Robert Bürkle GmbH zur Verfügung. Die Anlage hat eine Tischgröße von 2,20 x 1,50 bei einer maximalen Presskraft von 2.000 kN und ist sowohl zur Herstellung von niedrig verdichteten Dämmteilen als auch harten Verbundbauteilen geeignet (Abbildungen 3 und 4).

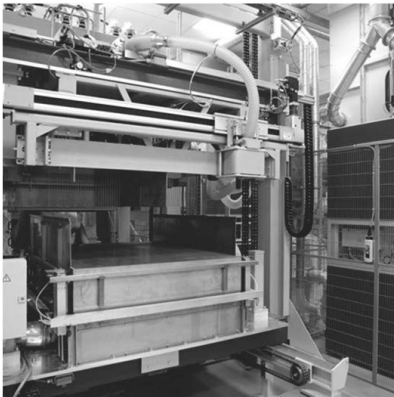


Bild 3: Einblasstation mit Einblaswerkzeug

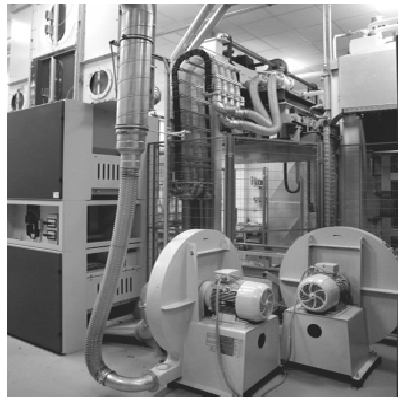


Bild 4: Faserspeicher und Einblasmaschine

Als Ausgangsmaterial für die Untersuchungen zur Herstellung von Naturfaserverbundbauteilen wurden mit Acrodur bedinderte Holzfasern verwendet. Dieses Fasermaterial wird bei der Firma Yanfeng Automotive Interiors zur Herstellung von Holzfasermatten eingesetzt und ist bei verschiedenen Automobilherstellern in der Serienanwendung. Zur thermischen Verfestigung der Faserlegele sowie zur Optimierung des Umformverhaltens wurden außerdem thermoplastische Binfasern wie z.B. PES-Fasern und PES-Bikofasern in unterschiedlichen Konzentrationen und verschiedenen Faserlängen zugemischt.

## Werkzeug- und Prozessoptimierung

Für die Einblasversuche mit 3D-Kontur wurde von der Firma Yanfeng Automotive Interiors ein BMW-Türverkleidungswerkzeug zur Verfügung gestellt. Die Form musste zunächst mit einer luftdurchlässigen Einblasoberschale ausgestattet werden. Diese wurde im TITK aus glasfaserverstärktem Kunststoff gefertigt und mit zwei programmierbaren Einblasdüsen bestückt. Die Werkzeugfläche ist in der Einblasoberschale in zwei Bereiche unterteilt, die durch einen einstellbaren Kamm gegeneinander abgegrenzt sind. Somit kann jeder Teilbereich separat gefüllt werden. Die Kontur der Oberschale und die Position der Einblasdüsen wurden in mehreren Optimierungsschritten angepasst.

In einem nächsten Schritt musste die kontinuierliche Dosierung des Fasermaterials aus den Faserspeisern sichergestellt werden. Die industriell verfügbaren Füllschächte sind für textile Stapelfasern ausgelegt und können nicht ohne entsprechende Einstellung für die Dosierung von kurzen Holzfasern eingesetzt werden. Es waren sowohl Optimierungen der Walzenabstände und -Drehzahlen als auch Versuche mit unterschiedlichen Fasermischungen aus kurzen Holzfasern und längeren Synthesefasern notwendig. Die Langfaseranteile verbessern einerseits das Förderverhalten, dienen aber andererseits später zur Unterstützung des Umformverhaltens sowie zur thermischen Verfestigung des Fasergeleges.

Im Anschluss an die Einstellung der Füllschächte folgte die Programmierung des Einblasvorgangs mit den einstellbaren Schwenkdüsen. Es können verschiedene Parameter variiert werden:

- Luftgeschwindigkeit
- mit dem Luftstrom zugeführte Fasermenge
- Blasdauer
- Schwenkbereich der Düse
- Schwenkgeschwindigkeit

Als geeignetste Variante erwies sich die Füllung des 3D-Werkzeuges in mehreren Schritten. Zuerst wurde die Teilfläche 1 (Kartentasche) des Werkzeuges mit Düse 1 gefüllt (Abbildung 5). Die Anblasung der düsenfernen Bereiche erfolgte mit hoher Luftgeschwindigkeit. Zur Verringerung von Luftverwirbelungen in der Form muss die eingeblasene Luft durch die perforierte Oberschale und den luftdurchlässigen Rand abgeführt und die Luftgeschwindigkeit dem Füllstand der Form angepasst werden.

Anschließend erfolgte das Füllen der Teilfläche 2 (Mittelteil und Brüstung) über Düse 2 (Abbildung 5). Auch hier wurden drei Schritte programmiert, um eine optimale Faserverteilung zu erreichen. Nach vollständiger Werkzeugfüllung wurde dann noch ein Presshub mit der Einblasoberschale eingefügt, um eine höhere Vorverdichtung des Fasergeleges zu erreichen. Die abgebildete Füllstudie zeigt das stufenweise Befüllen einer Türverkleidungsgeometrie.

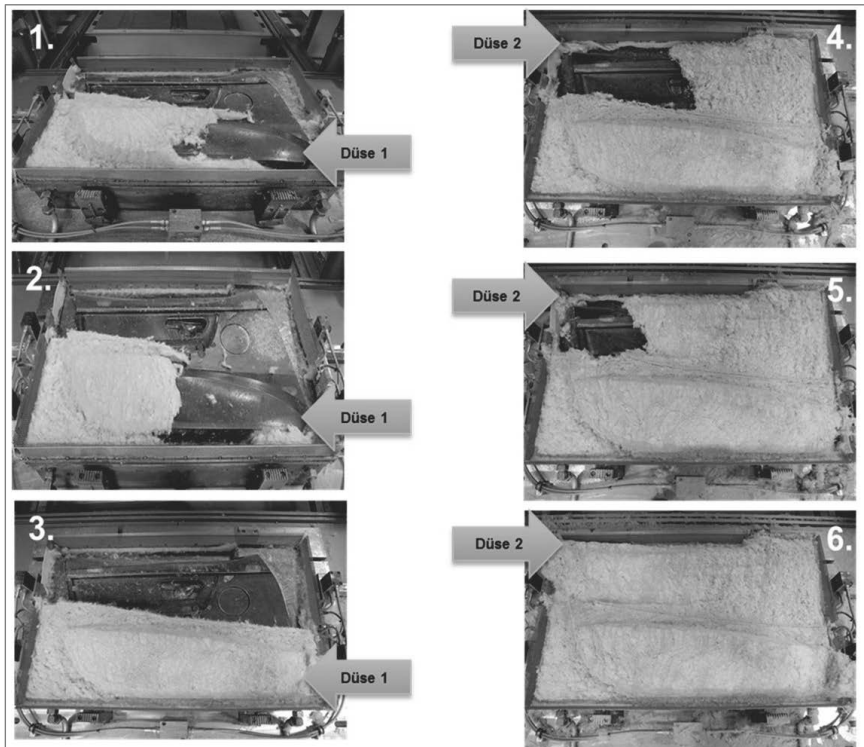


Bild 5: Befüllung der Teilbereiche

Nach der Füllung der Form und Vorverdichtung des Fasermaterials in der Einblasstation hebt die Einblas-Oberschale ab und der Schiebetisch fährt in die Pressstation ein, wo das Fasergelege unter Druck zum fertigen Bauteil konsolidiert wird. Wichtig für eine optimale Verdichtung des Materials ist hierbei eine genaue Abstimmung zwischen der Flächenmasse des Fasergeleges und dem eingestellten Werkzeugspalt.

Die Genauigkeit der Faserdosierung wurde in einer Reihe von Füllversuchen geprüft und liegt in einer Schwankungsbreite von ca. 5%. Bei optimaler Füllung der Form und Vorverdichtung des Fasergeleges konnten somit komplette 3D-Bauteile hergestellt werden.

### Bauteilqualität und mechanische Eigenschaften

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der im 3D-Faserblasverfahren hergestellten Naturfaserbauteile mit sCF-Anteilen wurden aus verschiedenen Bereichen der Türverkleidung Proben für die mechanische Prüfung entnommen (siehe Abbildung 6).

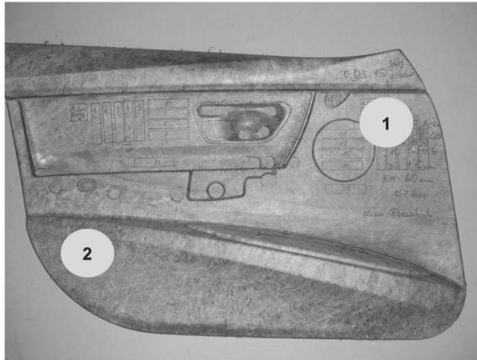


Bild 6: Probenentnahme aus 3D-Bauteil

An den Prüfkörpern aus den unterschiedlichen Entnahmebereichen wurden Prüfungen der Flächenmasse, Bauteildicke, Verbunddicke und der mechanischen Kennwerte im Biegeversuch durchgeführt. Die Bewertung der Verbundeigenschaften erfolgte vergleichend zu Bauteilen, die im Fibrowood-Verfahren aus genadelten Holzfasermatten mit Acrylharzbinder hergestellt wurden (Zusammensetzung 78% Holzfasern und 22% Synthefasern). Tabelle 1 zeigt die Flächenmassen und Verbunddichten aus den zwei Entnahmebereichen.

Tabelle 1: Verbundeigenschaften in unterschiedlichen Entnahmebereichen

	Bereich	<b>Fasermatte (Referenz)</b> 78% Holz / 22% Synthefasern	<b>Faserblasen (Acrodur)</b> 80% Holz / 10% PES-Bikofaser / 10% sCF
Dichte [g/cm³]	1	0,867	0,852
	2	0,825	0,787
Flächenmasse [g/m²]	1	1.700	1.750
	2	1.670	1.750
Fasergehalt [%]	1	/	7,8
	2	/	9,6

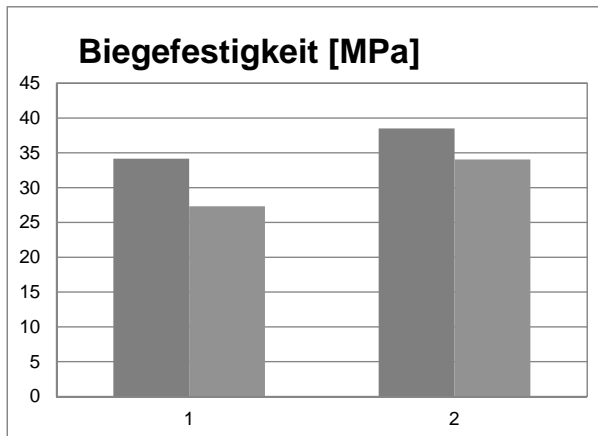
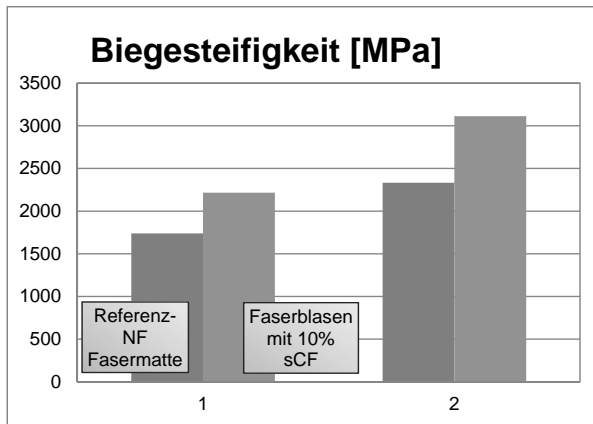


Bild 7: Vergleich der Biegeeigenschaften

Eine Gegenüberstellung der Prüfwerte aus dem 3-Punkt Biegeversuch zeigt Abbildung 7. Es wird deutlich, dass bei Zumischung von 10% sCF das Steifigkeitsniveau ansteigt. Weiterhin wird ersichtlich, dass Dichte und Fasergehalte stark mit der Biegesteifigkeit korrelieren, wie im Bereich 2 ersichtlich wird. Der hohe Zug E-Modul der zugemischten Carbonfasern drückt sich auch in den erhöhten E-Modul Werten des Verbundes aus. Entscheidend für die Ausnutzung der Fasereigenschaften der sCF ist die Kraftübertragung über die Matrix. Eine ausreichende Faser-Matrixhaftung ist essentiell.

### Gewichtsreduzierung

Entsprechend der Zielstellung des Projektes konnte das Bauteilgewicht durch den Einsatz von sCF um rund 10% reduziert (siehe Abbildung 8) und die mechanischen Eigenschaften

bei guter Faser-Matrix Haftung erhöht werden. Die Morphologie der einzelnen Fasermaterialien und das dabei resultierende Ablageverhalten in der Werkzeugform haben dabei einen entscheidenden Einfluss.

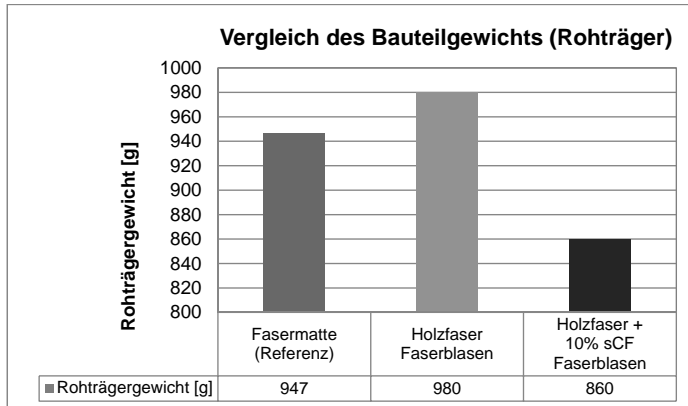


Bild 8: Vergleich des Bauteilgewichtes (Rohträger)

## Zusammenfassung und Ausblick

Das Faserblasverfahren ist ein neues und innovatives Verfahren zur Herstellung von faserverstärkten Formteilen. Im TITK wurde diese Technologie weiterentwickelt und erstmals zur Herstellung von hoch verdichteten Verbundbauteilen angewendet.

Anhand eines Demonstrationsbauteils konnte das Potenzial des Verfahrens aufgezeigt werden. Die gesamte Prozesskette ist mit marktverfügbarer Technik realisierbar und lässt sich mit überschaubarem Entwicklungsaufwand in die Praxis überführen. Aufgrund der endkonturnahen Faserdirektablage und dem Wegfall von Zuschnitt- und Verschnittprozessen sowie der Möglichkeit zur Verwendung von Recyclingfasern ist das Faserblasen ein ressourcenschonendes und umweltfreundliches Verfahren mit hohem Innovationspotenzial.

## Literatur

- [1] NN.:  
Anlagenlayout  
Robert Bürkle GmbH 2014
  
- [2] Galan, J.:  
Interne Firmenpräsentation  
Yanfeng Automotive Interiors

# Grüner wird's nicht!

## Nachhaltig, ökonomisch, sicher: Technische Rezyklate für die Automobilindustrie

Dipl.-Ing. **Ansgar Hoffmann**,

Technische Kunststoffe, Hoffmann + Voss GmbH, Viersen

### Kurzfassung

Das Bestreben Kraftstoffe einzusparen hat den leichtgewichtigen Kunststoffen in vielen automobilen Anwendungen den Weg geebnet. Wenn man diesen grünen Gedanken konsequent weiterverfolgt, kann man in vielen Fällen Neuware durch Recompounds ersetzen. Dies bringt in vielerlei Hinsicht Vorteile mit sich: Recompounds sind in der Regel preiswerter als Neuwaren, man spart wertvolle Ressourcen, man vermeidet Abfall und man verbessert seine CO<sub>2</sub> Bilanz. Auch die Altfahrzeugverordnung schreibt vor, dass im Sinne der Abfallvermeidung verstärkt auf Recyclingmaterial gesetzt werden soll. Bei der Qualität müssen sich die Recompounds nicht hinter den Neuwaren verbergen: aufwändige Wareneingangsprüfungen, Verarbeitung auf Extrudern neuester Bauart und produktionsbegleitende Laborprüfungen garantieren ein qualitativ hochwertiges Recompound mit definierten mechanischen Eigenschaften, das auch in hohen Mengen über die komplette Laufzeit eines Automobils verfügbar ist.

### 1. Anwendungsgebiete und Grenzen

Es gibt bei dem Einsatz von Recompounds aus Industrieabfällen immer wieder Ressentiments. Natürlich werden Recompounds nicht in alle Bereiche vorstoßen, die von Neuwarencompounds besetzt sind. So denken wir, dass in der Medizintechnik und in der Nahrungsmittelindustrie keine Recompounds Einsatz finden sollten. Auch ist ein Einsatz von Recompounds in „sicherheitsrelevanten Teilen“ mit Vorsicht zu bewerten.

Ansonsten sind bei den Recompounds alle Möglichkeiten gegeben, die auch die Neuwaren bieten. Kohlefaser, Glasfaser, Mineralfaser dienen als Verstärkungsstoffe; Flammschutz, Lichtschutzstabilisatoren oder Hitzeschutz, Glashohlkugeln und viele weitere Additive kommen in unseren Recompounds zum Einsatz.

Außerdem bieten mittelständische Unternehmen die Möglichkeit, Eigenschaften jenseits der Neuwaren einzustellen, wie zum Beispiel ein ABS GF 13 oder ein PC-ABS HF mit hohem MVR und hohem Vicat. Auch farbige Recompounds sind möglich! So wurden in den letzten Jahren hellgraue, weiße und orange Einstellungen für unterschiedliche Anwendungen, wie Elektronikboxen, Dachbedieneinheiten und Gehäuse für Stromwandler in den Markt gebracht.

## 2. Neuester Stand der Technik

Recompounds können mehr! Ein enger Kontakt zwischen Rohstofflieferant, Spritzgießer und dem OEM ermöglicht in vielen Fällen den Einsatz von hochwertigen, laborgeprüften Recompounds, um Ressourcen zu schonen und den Einsatz von Neuware zu minimieren.

Man muss Einkäufern und Entwicklern nicht mehr erklären, was Recompounds oder Rezyklate sind: mittlerweile gibt es viele Anwendungen, bei denen Neuwaren durch diese ersetzt wurden. Allerdings stecken hinter diesem „RE“ oft unterschiedliche Qualitätsverständnisse. So kann es für einen Verarbeiter ausreichend sein, ein Mahlgut in eine Granulatform zu überführen. Ein Anderer möchte seinen Kunden aber mit definierten und individuellen Recompounds beliefern. Die Grenze zwischen billigem Regranulat und hochwertigem Recompound ist fließend.

Waren es zuvor preisgetriebene Entscheidungen, die ein Spritzgießunternehmen zu einem Recompound bewogen hat, wird heute mehr und mehr auch auf „grüne Produkte“ geachtet. Recompounds verbessern die CO<sub>2</sub> Bilanz und helfen, quasi nebenbei, die Abfallmengen zu reduzieren.

Die DY-Recompounds von Hoffmann + Voss müssen dabei nicht hinter den Neuwaren zurückstehen. Eigenschaften werden mit dem Kunden definiert und produktionsbegleitend geprüft. Abnahmeprüfzeugnisse nach DIN EN 10204 3.1 sind selbstverständlich und gerade in der automobilen Welt eine Liefervoraussetzung. Wir produzieren auf modernsten Anlagen, die es ermöglichen, hohe Drehmomente zu übertragen und somit das Polymer so wenig wie möglich zu beschädigen. Unser Labor mit seinen Spritzgussmaschinen zur Probekörperherstellung wird permanent den Kundenanforderungen und den Normen angepasst. So haben wir in den letzten zwei Jahren in ein MVR -Messgerät (nach ISO 1133 1/2), ein Vicat/HDT Gerät, eine GWI Gerät, und ein Tetraohmmeter investiert. Außerdem haben wir im Haus die Möglichkeit nach VDA 278 die FOG und die VOC Werte an unseren Recompounds zu messen. Hier sind wir der einzige Recompound-Anbieter, der die Emissionen chargenbegleitend auf dem Prüfzeugnis testieren kann. Daneben werden in unserem Labor noch der Schlag und Kerbschlag nach IZOD und Charpy, die Zugspannung, die Biegespannung, der Glührückstand, das Brandverhalten nach UL 94 V und HB, die Dichte, und die Farbe nach LAB ermittelt.

## 3. Wie sind die Kundenanforderungen? Welche Informationen benötigt der Rezyklatlieferant?

So haben unsere Recompounds ihren Weg ins Automobil und in luftführende Teile geschafft. Außerdem werden Recompounds in der Bau- und Elektroindustrie eingesetzt. Hier gibt es natürlich andere Anforderungen: im Bau wird häufig auf eine gute Witterungsbeständigkeit Wert gelegt. Hier haben wir mit unseren Kunden spezielle UV- oder hydrolysebeständige

Recompounds entwickelt.

In der Elektroindustrie geht es vornehmlich um das Brandverhalten der Bauteile. Bauteile müssen „UL-gelistet“ werden und somit muss der Kunststoff ganz spezielle Eigenschaften in Bezug auf sein Entzünden bzw. auf das Selbstverlöschen haben. Wir haben dazu unsere Polycarbonat Recompound-Reihe DYFENCE entwickelt. Hierfür besitzen wir für die Typen DYFENCE eine „Yellow-Card“, das heißt, dass sie nach einer Beflammung nach UL94 V0 selbst verlöschend sind.

Eine wichtige Kundenanforderung ist die Mengensicherheit. Der prozentuale Anteil an Produktionsausschuss wird immer geringer und das, was noch verfügbar ist, hat eine immer schlechtere Qualität. Es müssen noch größere Anstrengungen unternommen werden, um aus einem Reststoff ein hochwertiges Recompound zu gewinnen. Hierzu zählen neben umfangreichen Produktionsprüfungen auch aufwändige Wareneingangsprüfungen. Aber auch der OEM kann dem Compoundeur helfen, seine Produktion auf eine gesicherte breite Material (Mahlgut) Basis zu stellen. So kann man zum Beispiel für Teile im nicht sichtbaren Bereich die Farbvorgaben breiter definieren, mechanische Eigenschaften, wie den Kerbschlag, nach oben hin nicht begrenzen oder eine größere MVR Toleranz akzeptieren. Das führt dazu, dass man auf mehr und größere Rohstoffquellen zurückgreifen kann. Somit steigen die verfügbaren Mengen. Neben den mechanischen Eigenschaften des zu liefernden Recompounds ist die Frage nach der erwarteten Menge über die Laufzeit die wichtigste Frage vor Angebotsabgabe. Wir denken, dass ein intensiver und vor allem ehrlicher Austausch zwischen Lieferant und OEM oder TIER1 wichtig ist um so einen erfolgreichen SOP zu realisieren.

Aber auch wenn Recompounds Produkte sind, die beratungsintensiver sind als Neuwaren, so gibt es doch viele Anwendungen, bei denen im Sinne von Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung ein hochwertiges, laborgeprüftes rezykliertes Material zum Einsatz kommen kann!

#### **4. Über die Hoffmann + Voss GmbH**

Die HOFFMANN + VOSS GmbH ist ein seit fast 55 Jahren aktives und kompetentes Unternehmen in allen Bereichen der Kunststoff-Rohstoffversorgung.

Unsere Aufbereitungsmöglichkeiten haben sich im Laufe dieser Jahre genauso gewandelt wie das Bild des Compoundings und Recyclings in der Öffentlichkeit und den Anforderungen der Anwender generell. Mit wachsendem Interesse für Rohstoffkreisläufe und zunehmenden Einsatzmöglichkeiten für Recompounds wuchsen auch unsere Aktivitäten und unser Engagement in der Produktion hochwertiger Compounds und Recompounds, die den Kundenanforderungen entsprechend eingefärbt, verstärkt und eingestellt werden. Durch die Herstellung und den Einsatz von Recompounds werden Ressourcen geschont.

Unsere Kunststoffe werden in der Bau-, Elektro- und Automobilindustrie eingesetzt. Hierfür Entwickeln wir mit unseren Kunden spezielle Rezepturen um den Kunststoffen die gewünschten Eigenschaften zu geben. Außerdem Entwickeln wir für unsere Kunden Konzepte um Produktionsabfälle wiederzuverwenden ("Close the Loop").

# **Tinuvin® 880 – novel light stabilizer for automotive interior applications**

## **Introduction of a new light stabilizer for PP/TPO for automotive interior applications, enabling improved secondary properties such as no blooming and no stickiness**

Dipl.-Ing. **G. Huber**, BASF, Basel, Switzerland

### **1. Market trends**

Nowadays consumers are looking for more functionality, greater comfort and overall higher quality in their automotive cockpit. OEMs have reacted to this trend through stronger differentiation and more stringent specifications in regard to plastic parts. This includes more stringent supply conditions, for example, in visual surface aesthetics (gloss, anti-scratch performance), haptics (no sweat-out, no stickiness) and emissions/organoleptics.

### **2. The rôle of migration in automotive polymer grades**

To meet the ever-increasing standards for automotive PP/TPOs (the materials of choice in today's car), the selection of the appropriate light stabilizer package for interior applications has to provide both properties:

- Primary properties: light stability (LS) and long-term thermal stability (LTTS)
- Secondary properties: such as no stickiness, low/no emissions and low/no odor

To improve the perceived quality of automotive interiors, the loading level of anti-scratch additives (preferably cost-attractive migratory systems) has increased over the recent years. This ever higher level of migratory anti-scratch additives in combination with faster processing conditions (resulting in different polymer morphologies) and the use of high-flow polymers (high MFI grades) can lead under unfavorable circumstances to increased migration inside the polymer. Higher migration rates can potentially lead to a blooming/sweating-out of additives onto the surface of the polymer. As polymer parts in cars are very often exposed to direct or indirect sunlight, the UV radiation of the sunlight can break down these migration

products and sticky compounds can be created. In this way a sticky surface layer can occur (Figure 1).

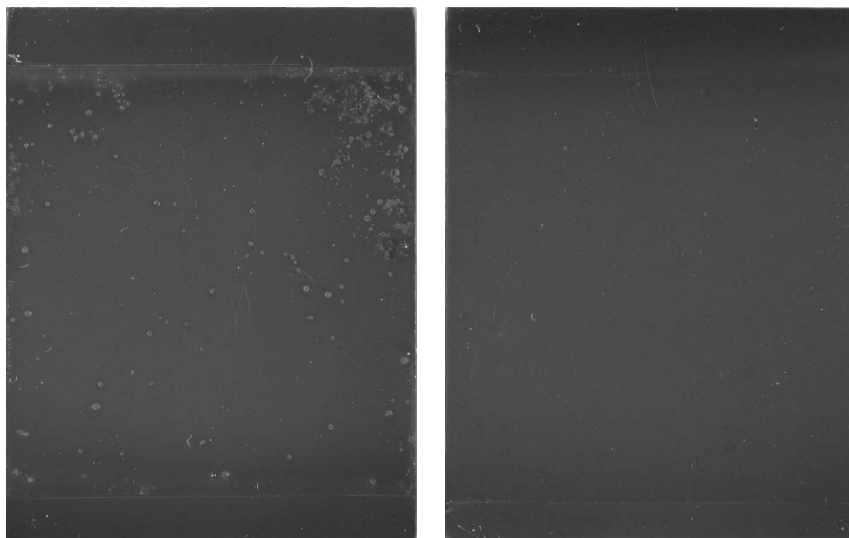


Fig. 1: Plaques made of a typical automotive PP/TPO for use in interior applications. The left-hand material is stabilized with a typical ester HALS as light stabilizer, whereas the right-hand plaque uses the new Tinuvin® 880. It can be clearly seen that after about half a year of aging the left-hand material exhibits a surface layer which is very sticky to the touch whereas the surface of the material on the right-hand side is without any surface defects and has no stickiness.

### 3. Novel light stabilizer to overcome the problem of sticky surfaces: Tinuvin® 880

As major additive supplier to the polymer industry, BASF started several years ago with R&D work to investigate the sticky-surface-layer effect. As result of this work a new light stabilizer has been launched: Tinuvin® 880.

Tinuvin® 880 is a unique light-stabilizer molecule, specifically designed to comply with the most demanding automotive industry requirements for PP/TPO-based parts in the interior and exterior. It delivers outstanding PP/TPO stabilization performance with regard to UV deg-

radiation, even at low concentrations, with no blooming/stickiness on TPO surface parts. As a 100% pure solution (no master batch), formulators have the ability to make unlimited formulations to meet the best cost-performance requirements.

Tinuvin® 880 provides superior light stability at much extended light exposure times and a superior thermal stability at very high temperatures, maintaining excellent mechanical properties (Figures 2, 3 and 4).

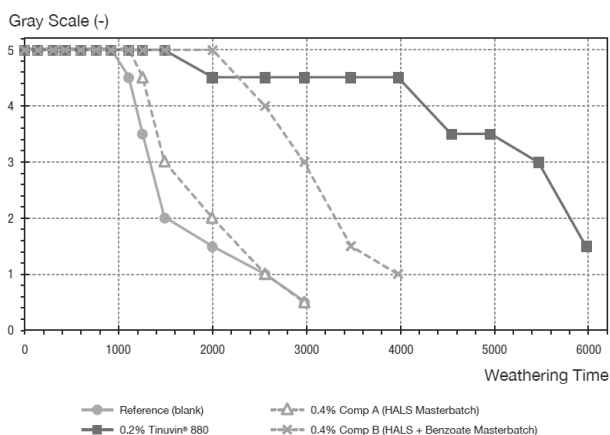


Fig. 2: Performance of different formulations weathered according to VW PV 1303. The chart shows the change in visual impression expressed on the gray scale over time. The superior light stability of Tinuvin® 880 can be clearly seen (for example, at gray scale '4' → approximately doubling the lifetime).

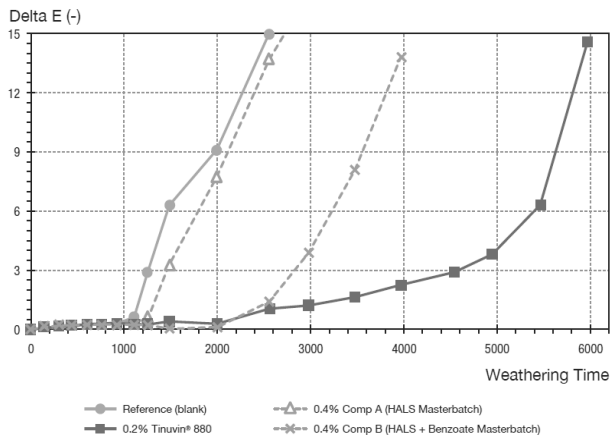


Fig. 3: Performance of different formulations weathered according to VW PV 1303. The chart shows changes in Delta E over time. The superior light stability of Tinuvin® 880 can be clearly seen (for example, at Delta E '3' → approximately. doubling the life-time).

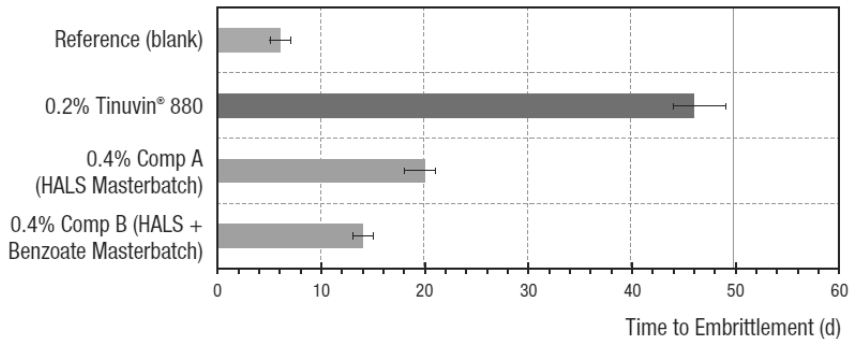


Fig. 4: Performance of different formulations in regard to long-term thermal stability (LTTS) at 150 °C. Failure criterion: 'embrittlement'

The durable dust-free product form of Tinuvin® 880 provides easy storage and handling, lowers downtimes and increases productivity for compounds and masterbatchers.

# Characterization of microcellular plastics for weight reduction in automotive interior parts

Dr. **J. Gómez-Monterde**, SEAT SA, Martorell, Spain;

Dipl.-Ing. **J. Hain**, Volkswagen AG, Wolfsburg;

Prof. Dr. **M. Ll. Maspoch**, Centre Català del Plàstic / Universitat

Politécnica de Catalunya-BarcelonaTech, Terrassa, Barcelona, Spain

## Abstract

The present work deals with foaming plastic materials in order to reduce weight, cost and carbon footprint in automotive parts. Glass-fiber-reinforced polypropylene (PP GF) was injection-molded in the solid and foamed states by means of the already known MuCell® process and a newly emerged technology, IQ Foam®, developed by Volkswagen AG. Both processes were combined with the complementary tool technology of core-back expansion molding. By increasing the thickness of the part, the apparent density decreased but the flexural stiffness was greatly enhanced. The new IQ Foam® technology is able to produce foamed parts with properties comparable to that of the MuCell® process, offering additional benefits such as cost-effectiveness, ease of use and machine-independence.

## 1. Introduction

Regulatory constraints and the increase in environmental awareness force the automotive industry to take different strategies to reduce greenhouse gas emissions and air pollutants. For example, electric and hybrid-drive technologies, efficiency improvements in conventional internal combustion engines, alternative fuels and lightweight construction.

It has been estimated that saving 100 kg in the bodywork cuts CO<sub>2</sub> emissions by 10 g CO<sub>2</sub>/km [1], so current trends focus on replacing conventional materials with lighter ones. Nowadays, plastic materials represent around 18% of the overall vehicle weight and its use in automotive is expected only to grow [2]. For this reason, foaming injection-molding techniques emerge as a promising method of reducing weight in plastic components.

The present contribution deals with the characterization of microcellular thermoplastic foams obtained by injection molding, as a preliminary approach towards lighter, cheaper and more environmentally friendly automotive interior parts. The effect of mold cavity expansion through the core-back tool technology on foaming behavior was studied. Moreover, a comparison between MuCell® and IQ Foam® foaming injection-molding technologies is presented, in terms of morphology and the tensile, flexural and impact properties of microcellular parts produced by both processes.

## 2. Foaming injection-molding technologies

Of the different technologies developed for foaming through injection molding, this study focuses on the MuCell® and IQ Foam® processes, whose operating principles are as follows:

- *MuCell®*. The microcellular injection-molding MuCell® process was developed by the *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* in the 1990s and since then it has been licensed and commercialized by *Trexel Inc. (USA)* [3]. The fundamentals of MuCell® technology consist basically of dissolving the blowing agent under supercritical conditions (SCF) in the molten polymer at the plasticizing unit, forming a single-phase solution. The pressure drops inducing cell nucleation and growth occur at the entrance of the mold, so foaming takes place inside the mold cavity.

The advantages offered by MuCell® include weight reduction, improved dimensional stability, energy and clamping-force decrease and cycle-time reduction [4]. However, there are a few limitations, such as lower surface quality and deterioration of mechanical properties. Additionally, as illustrated in Figure 1(a), using MuCell® involves new equipment and modifications in comparison with conventional injection molding. Specifically, an SCF metering unit, a special and longer reciprocating screw as well as back and front check valves are required. Regarding control of the process, additional variables, such as the *microcellular plasticizing pressure (MPP)* and the opening and closing of the gas injectors, must be regulated.

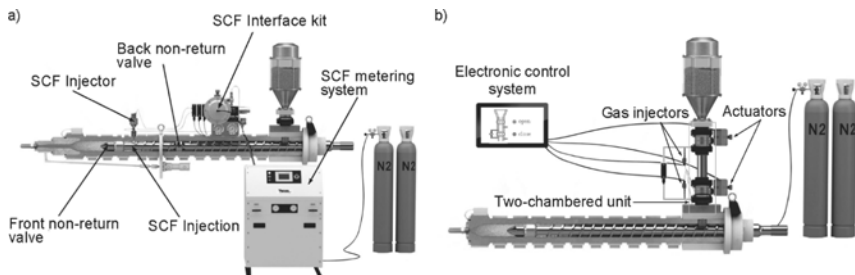


Fig. 1: Plant concept for (a) MuCell®; (b) IQ Foam® foaming technologies. Modified from [5].

- *IQ Foam®*. IQ Foam® has been developed recently and is expected to be integrated into industrial production in forthcoming years. It was conceived by *Volkswagen AG (Germany)* with the aim of reducing complexity and cost as compared with other available processes. The main equipment consists of a two-chambered unit installed between the hopper and the feed of any conventional injection-molding machine (Figure 1(b)), where polymer is impregnated with gas before melting. This unit was patented in 2014 [6] and contains two gas inject-

tors to introduce the physical blowing agent, valves to regulate the flow of gas and two actuators to allow polymer pellets to pass through the unit and to lock each chamber. IQ Foam® incorporates the gas in the feed area of the plasticizing unit together with the polymer in pellet form. It is worth pointing out that gas is supplied under moderately low pressure [7] directly from the gas cylinder, without the need for gas-metering equipment. The only important modification of the injection machine is sealing the back of the screw to prevent gas escaping.

On the other hand, the foaming process can be controlled only by the gas pressure. It can, accordingly, be easily automated and driven by an electronic system managing the actuators and gas injectors regardless of the original software control of the injection-molding machine. Consequently, IQ Foam® emerges as a potentially cost-effective and machine-independent process, easy to start up and reducing both the weight and cost of plastic products significantly.

- *Core back.* Core-back expansion molding is a complementary tool technology able to improve surface quality, but also increase density reduction, the stiffness-to-weight ratio and save weight in foamed thermoplastic parts. Firstly, the cavity is volumetrically filled close to solid weight by a polymer/gas mixture. The cavity is filled at high injection speed so as to prevent pressure drop and foaming. After a delay time within which a solid skin forms, the cavity is expanded and the increase in volume induces a sudden pressure drop, promoting foam generation inside the part [8]. As thickness increases, lower densities are reached. The entire cavity can be expanded, or only partially in defined areas of interest.

### 3. Materials and methods

- *Material.* A 20% chemically-coupled high-performance glass-fiber-reinforced polypropylene compound (PP 20GF *Fibremod™ GE277A*) supplied by *Borealis AG* (Germany) was used. It has been specially developed for demanding applications in the automotive industry, with a density of 1.04 g/cm<sup>3</sup> (ISO 1183) and a melt flow index of 12 g/10 min (ISO 1133).

- *Injection molding.* The PP 20GF compound was pre-dried at 80 °C for a minimum of 3 hours, as recommended by the supplier. Rectangular plates of 400 x 130 mm<sup>2</sup> (Figure 2) and variable thickness were injection-molded with the MuCell® and IQ Foam® processes, combined with the core-back technology. Firstly, solid and foamed plates 3 mm thick were obtained, reducing the weight by 10% as compared with the unfoamed part. Then, two series of foamed samples combined with the core-back technology were injection-molded, with an enlargement of the cavity from a basic wall thickness of 3 mm up to 3.3 mm and 3.7 mm.

The solid and MuCell® foamed plates were produced in an *Arburg 570C Allrounder 2000-675* injection machine with a clamping force of 2000 kN (*Arburg GmbH*, Germany), whereas the IQ Foam® foamed plates were injection-molded using a *KraussMaffei 200-1000/390/CZ Multinject* injection-molding machine (*KraussMaffei Group GmbH*, Germany) with 2000 kN of clamping force and equipped with the IQ Foam® foaming devices. The same injection-molding parameters were employed to produce the samples: a melt temperature profile of 40-210-230-240 °C from hopper to nozzle, an injection speed of 100 cm<sup>3</sup>/s, a mold temperature of 30 °C and a cooling time of 45 s. The shot volume for solid plates was 190 cm<sup>3</sup>, with a holding pressure of 300 bar applied for 10 s, whereas foamed samples were injected with 165 cm<sup>3</sup> of shot volume, and using nitrogen as blowing agent. A 0.5% content of gas was introduced at 34 bar of pressure during MuCell® processing. As the IQ Foam® equipment is only controlled by the gas pressure, which was 25 bar, the rest of foaming parameters were not measured.

- *Morphology and apparent density.* After the injection procedure, the apparent density of the plates was calculated by weighing and measuring their volume. The morphology of the foamed specimens was analyzed with cross-sections 10 mm wide taken midway from the injection gate both in a parallel (MD) and in a transversal direction (TD) (Figure 2(a)).

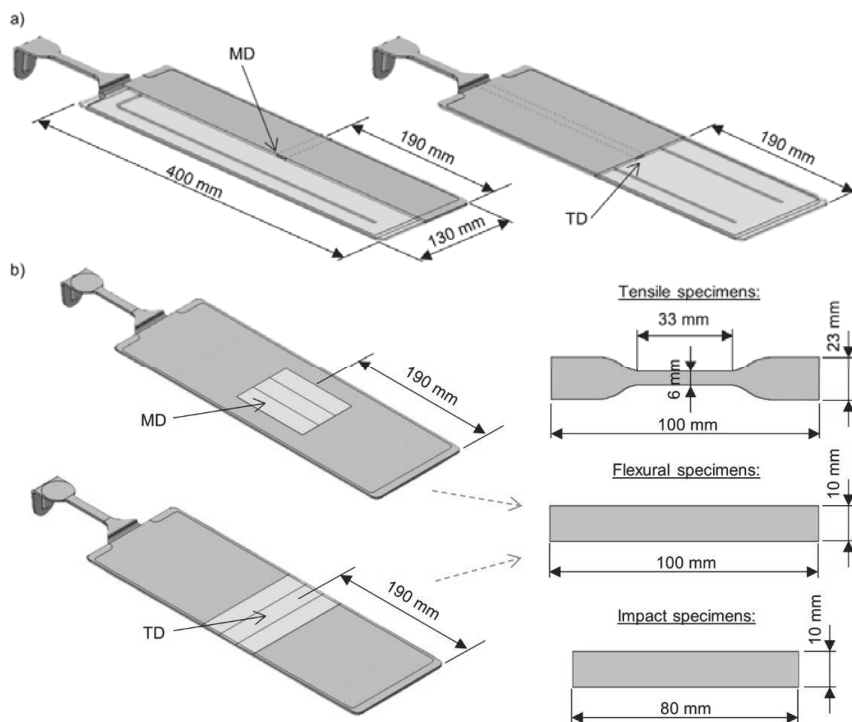


Fig. 2: Schematic representation of injection-molded plates and samples extracted for (a) morphological analysis; (b) mechanical testing.

Fracture surfaces resulting from cryogenic fracture were examined by scanning electron microscopy (SEM) using a JEOL JSM-560 microscope (Jeol Ltd., Japan). Micrographs were adjusted for an appropriate level of contrast and morphological parameters, such as cell size, cell density and skin thickness, were determined with the aid of Igor Pro® (Wavemetrics Inc., USA) and Matlab® (The MathWorks Inc., USA) software.

The glass-fiber-reinforcement content was obtained by determining the ash by the direct calcination method, following the guidelines set by the ISO 3451-1 standard.

- *Mechanical properties.* The specimens for mechanical tests were machined out of the rectangular plates according to the schemes shown in Figure 2(b). At least five samples of solid and foamed materials were tested at room temperature.

Tensile tests were carried out on a universal testing machine – *Zwick/Roell Z010* (*Zwick GmbH & Co. KG*, Germany) – using a 10 kN load cell, at a crosshead speed of 50 mm/min and an initial distance between clamps of 72 mm, as indicated in the ISO 527 standard.

Flexural tests were conducted following the ISO 178 standard, on a *Galdabini Sun 2500* (*Galdabini SPA*, Italy) testing machine equipped with a 5 kN load cell, at a crosshead speed of 10 mm/min and a span length of 80 mm.

Charpy impact tests were made on unnotched samples in a flatwise configuration, using an instrumented *Ceast Resil* impactor (*Instron Ltd.*, UK) equipped with a 15J hammer. The pendulum had a length of 0.374 m and a reduced mass of 3.654 kg. It was impacted at an angle of 99°, resulting in an impact rate of 2.91 m/s. The span length was 62 mm, and tests were performed according to the recommendations given by the ISO 179-2 standard.

#### 4. Results and discussion

- *Morphology and apparent density.* SEM micrographs taken from MuCell® and IQ Foam® microcellular samples are plotted in Figure 3. All samples exhibited a material structure consisting of a solid external layer and a foamed core, which is inherent in the injection-molding process. It has been reported that foaming PP is very difficult because of its low melt strength and crystalline regions [9]. However, SEM images exhibit a uniform cell structure. It is therefore clear that the governing mechanism for cell nucleation was heterogeneous nucleation induced by glass fiber. According to the cClassical nucleation theory [10], undissolved gas trapped at the filled/polymer interface promotes the creation of a multitude of sites for cell formation requiring much lower activation energy for bubble nucleation, accelerating cell nucleation and the development of a large number of cells with a small cell size. Moreover, the added fillers increase the melt strength of the material [11], contributing to prevent cell coalescence and improving its foaming behavior.

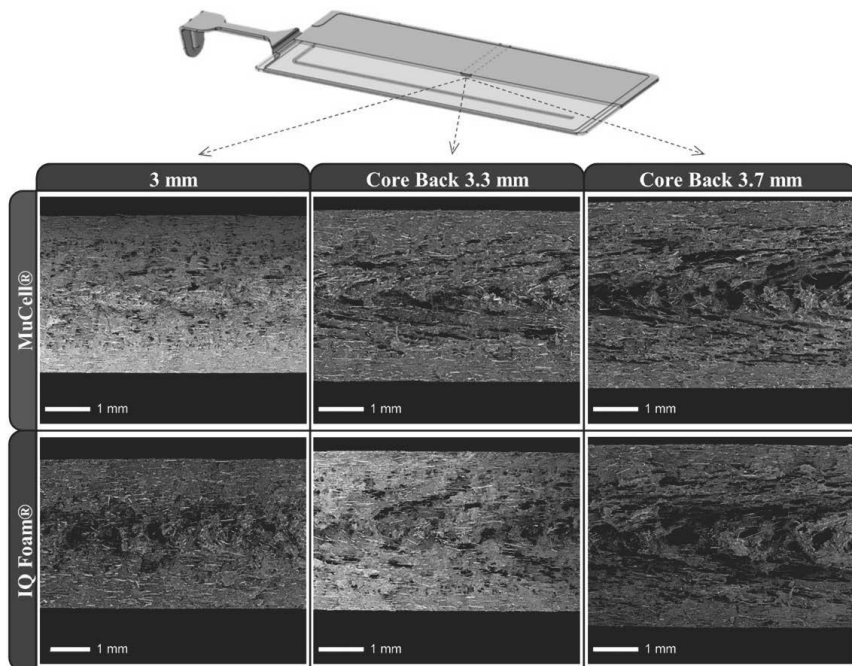


Fig. 3: SEM micrographs of MuCell® and IQ Foam® foamed plates taken in the MD direction.

The morphological parameters and apparent density results are shown in Table 1. The apparent density of the solid plates ranged around  $1.04 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ . By foaming, it was decreased by 10% without the use of core-back technology. As the final thickness and overall volume increased by mold opening, the apparent density decreased by up to 14% and 21% for the final thickness of 3.3 mm and 3.7 mm respectively.

Mostly spherical cells can be observed at the starting thickness of 3 mm without enlargement of the cavity thickness. In the core-back method, the cavity was volumetrically filled with the polymer/gas system, after which the thickness of the mold cavity was quickly increased up to 3.3 mm and 3.7 mm thereby reducing the pressure and thus enhancing cell nucleation [8]. Stretching forces caused by the mold opening could bring about cell elongation and distortion, also accompanied by shrinkage of cell walls during polymer cooling, resulting in higher diameters [12]. As the thickness increased, the core region remained at the molten state for a longer time, leading to thinner solid skin layers.

Table 1: Morphological parameters of MuCell® and IQ Foam® foamed PP 20GF plates.

Condition	Section	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Skin thickness (mm)	Cell density (cells/cm <sup>3</sup> )	Cell size (μm)
MuCell® 3 mm	MD	0.94 ± 0.01	0.41	7.1·10 <sup>5</sup>	9 - 165
	TD	0.94 ± 0.01	0.42	8.5·10 <sup>5</sup>	9 - 125
MuCell® / core back 3.3 mm	MD	0.90 ± 0.01	0.46	8.4·10 <sup>5</sup>	9 - 263
	TD	0.90 ± 0.01	0.38	8.2·10 <sup>5</sup>	9 - 223
MuCell® / core back 3.7 mm	MD	0.82 ± 0.01	0.41	6.1·10 <sup>5</sup>	4 - 286
	TD	0.82 ± 0.01	0.31	6.8·10 <sup>5</sup>	3 - 280
IQ Foam® 3 mm	MD	0.94 ± 0.01	0.70	4.4·10 <sup>5</sup>	6 - 195
	TD	0.94 ± 0.01	0.67	4.3·10 <sup>5</sup>	9 - 128
IQ Foam® / core back 3.3 mm	MD	0.90 ± 0.01	0.41	4.5·10 <sup>5</sup>	4 - 234
	TD	0.90 ± 0.01	0.42	5.8·10 <sup>5</sup>	7 - 222
IQ Foam® / core back 3.7 mm	MD	0.82 ± 0.01	0.40	5.5·10 <sup>5</sup>	3 - 276
	TD	0.82 ± 0.01	0.32	6.8·10 <sup>5</sup>	3 - 288

Regarding the comparison between parts produced by MuCell® and IQ Foam®, well-defined and uniform cell structures can be observed in the micrographs in Figure 3, which indicate that microcellular reinforced thermoplastics can be successfully developed by either foaming technology. Slightly thicker solid skins of IQ Foam® without core-back expansion were determined from Table 1. Despite the cell density measured in all samples being in the order of 10<sup>5</sup> cells/cm<sup>3</sup>, those samples obtained by the IQ Foam® process were slightly lower. Since the same injection-molding parameters were employed for processing with both methods, differences in the amount of blowing agent used for each foaming process emerges as the main reason for these morphological differences. In contrast to the MuCell® technology, the gas in the IQ Foam® process was incorporated into the polymer in pellet form. The key parameter controlling the process was the gas pressure, so the gas content injected into the polymer was not measured and cannot be directly compared. Nevertheless, a smaller amount of blowing agent in the IQ Foam® molded parts is expected due to the low solubility of the gas in the solid pellets, which would explain the increased solid layer determined in the 3 mm-thick specimens, as well as the decrease in cell density. However, no differences in cell size between the two processing technologies were reported.

Of particular interest could be the analysis of fiber length from the comparison of the two foaming technologies. As described above, MuCell® equipment requires a special design of

the screw for optimizing the polymer/gas mixture. Increased shear stresses in this zone could result in higher fiber breakage. On the other hand, the blowing agent in the IQ Foam® process is introduced in the feed region of a conventional injection machine, which means that fibers are no longer subject to additional shearing forces. Nevertheless, measurements of fiber length provided values falling within the range of  $748 \pm 174 \mu\text{m}$  for all solid, MuCell®- and IQ Foam®-derived samples, which suggests that the special machinery designed for MuCell® did not affect fiber length in case of short-fiber-reinforced thermoplastics. Fiber content remained in all specimens within the range of  $20.1 \pm 0.2 \%$ .

- *Mechanical properties.* The elastic moduli obtained in tensile tests are plotted in Figure 4. All specimens experienced brittle fracture before reaching the yielding point and without necking. This behavior is due to the presence of the glass fiber. On one hand, fibers restrict matrix movement and deformation [13] and, on the other hand, stress concentrates at the fiber ends and the matrix cannot support the increased local load [14]. Figure 5 shows the flexural modulus resulting from bending tests of solid and foamed samples.

In Figures 4 and 5, it is clear that foamed samples have a lower tensile and flexural modulus than their solid counterparts. This is because cells in the core effectively led to a decrease in density and in the effective cross-sectional area. With increasing density reduction by core-back expansion, the reduction of both the tensile and flexural modulus was nearly linear, as indicated by the closeness of specific values to those of solid specimens.

Fiber-filled composites are characterized by an observed anisotropy in their mechanical properties. In all unfoamed and foamed samples from the MuCell® and IQ Foam® processes, the mean values of the tensile modulus obtained in the MD direction were about 30% higher than in the TD direction, which suggests a preferential orientation of fibers in the filling direction. In the case of flexural properties, these differences between the two directions were about 45%, highlighting the more effective reinforcing effect of glass fiber under bending loads. However, no effect of foaming nor of core-back expansion in anisotropic behavior can be determined as compared with the conventional injection-molded solid plates.

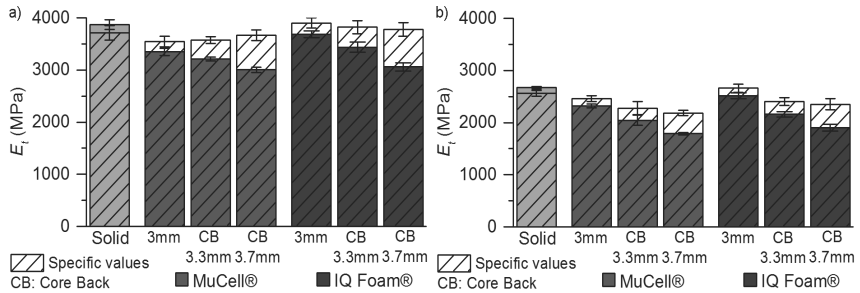


Fig. 4: Tensile modulus of solid and foamed samples obtained in the (a) MD; (b) TD directions.

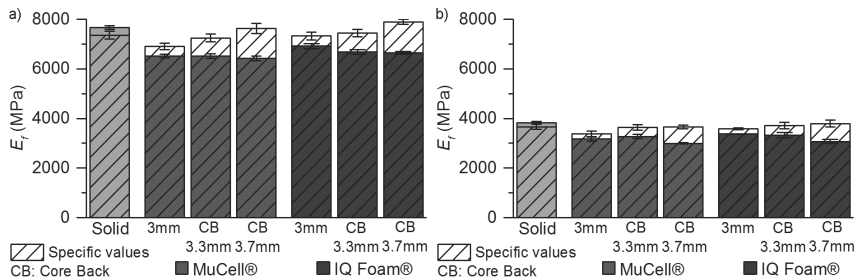


Fig. 5: Flexural modulus of solid and foamed samples obtained in the (a) MD; (b) TD directions.

As regards a comparison of the foaming technologies, the tensile and flexural moduli of samples obtained by the IQ Foam® process were higher and differed from the corresponding ones of the MuCell® process by approximately 10%. The thicker solid skins seem to be the most likely reason for this result. On the basis of the reduced amount of blowing agent incorporated in the IQ Foam® plates, the consequent reduction in cell density resulted in wider cell struts and a higher effective bearing area to withstand higher mechanical loads. These differences between foamed samples from the two processes were less marked when the core-back technology was applied and the volume cavity increased – this suggests that, as the part gets thicker, tensile and flexural properties became more dependent on apparent density and overall thickness than upon skin thickness and cell density.

Most of the literature dealing with the core-back expansion-molding process focuses on the flexural properties of the resulting foams [15]. This is due to the fact that, for engineering purposes, design criteria are based on the flexural stiffness rather than on the flexural modu-

lus. This parameter involves the geometry of the part via the moment of inertia. For flat panel geometries, the flexural stiffness ( $S_f$ ) is calculated as follows:

$$S_f = E_f I = E_f \frac{bh^3}{12} \quad (1)$$

Where  $I$  is the moment of inertia,  $E_f$  is the flexural modulus and  $b$  and  $h$  the part width and thickness respectively. Thus, flexural stiffness is significantly increased by the third power of the thickness. Figure 6 illustrates the evolution of the relative, specific flexural strength by foaming and increasing thickness by the core-back technology. It should be noted that despite the drop in the flexural modulus, stiffness was improved by up to 200% as compared with that of the solid counterpart by increasing the thickness to 3.7 mm.

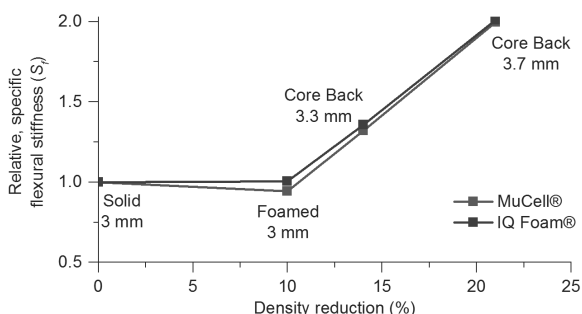


Fig. 6: Relative, specific flexural stiffness evolution with density and thickness.

The impact resistance calculated by the integral of the curves is shown in Figure 7. From these data it can be seen that impact resistance decreased by around 15% when foaming without core expansion, and by 22% and 35% while increasing the thickness to 3.3 mm and 3.7 mm respectively. In other words, foamed material is more sensitive to impact loads than to tension and bending. Since the testing method consists of an impact bending load, thickness of the solid skins played a crucial rôle in the performance of the part. By controlling a proper solid-skin thickness and fiber orientation, it would be possible to produce lightweight products without largely sacrificing the impact properties.

In addition, differences in the MD and TD values of solid samples were around 28%, but they were significantly reduced by foaming and expansion molding, reaching a difference between both directions of 5% when the thickness is raised to 3.7 mm. The impact resistance is also a property where smaller differences between the two foaming technologies were found. Due to the higher skin thickness, the impact resistance of the samples obtained by the IQ Foam®

process was around 7% higher than that of the MuCell®-foamed specimens. These differences decreased by increasing the thickness with the core-back process.

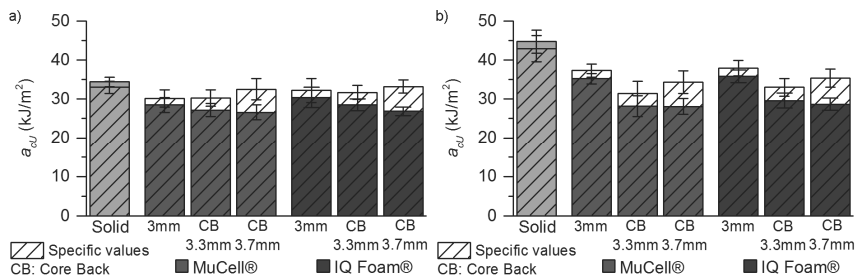


Fig. 7: Impact resistance of solid and foamed samples obtained in the (a) MD; (b) TD directions.

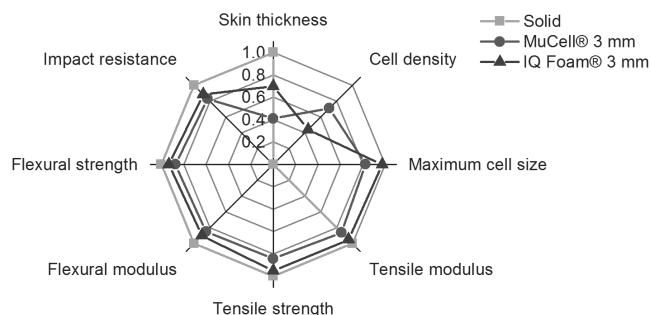


Fig. 8: Multivariable plot comparing the morphological characteristics and mechanical properties of MuCell®- and IQ Foam®-foamed samples.

## 5. Conclusions

In this paper the morphology and mechanical properties of PP 20GF foams obtained with different injection-molding techniques and combined with complementary tool technologies were analyzed. By pulling the core and increasing the final thickness of the part with the core-back tool process, apparent density decreased, solid skins became thinner but cells became bigger and distorted. Absolute mechanical properties decreased with apparent density but specific ones remained close to that of the solid material. Furthermore, design criteri-

on parameters such as bending stiffness were greatly enhanced due to the build-up in overall thickness.

On the other hand, a new foaming technology, called IQ Foam® and developed by Volkswagen AG, was examined in this paper and compared with the already well-known MuCell® process. By using a minimum amount of blowing agent, foamed plastic parts obtained by the IQ Foam® process exhibited thicker solid skins and lower cell densities but in consequence higher mechanical properties (Figure 8). Additional benefits such as cost-effectiveness, ease of operation and machine-independence enable the IQ Foam® process to produce lightweight parts with properties comparable to those of the MuCell® technology. Further research on foaming mechanisms and their effect on polymer properties will be essential in order to fully incorporate microcellular plastics into automotive parts.

## 6. Acknowledgements

The authors are grateful to the *Research Lab of Covestro AG* (Leverkusen, Germany) and the *Institut für Recycling* of the *Ostfalia Hochschule* (Wolfsburg, Germany) for their cooperation with injection-molding experiments in their facilities.

## 7. References

- [1] Automotive. *The world moves with plastics*, company publication, Plastics Europe, Brussels 2013.
- [2] Plastics. *The future for automakers and chemical companies*, company publication, A.T. Kearny Inc, Chicago 2012.
- [3] EU-P 0952908.
- [4] Xu, J.: *Microcellular Injection Molding*. Hoboken: John Wiley & Sons 2010.
- [5] <http://www.plasticportal.eu/en/thermoplastic-foam-injection-molding/c/2416>.
- [6] DE-P 102014212048.
- [7] Hain. J.: *Thermoplastschaum-Spritzguss - neue Möglichkeiten durch IQ-Foam*. Kunststofftrends im Automobil 2015.
- [8] Heim, H.P. and Tromm, M.: *General aspects of foam injection molding using local precision mold opening technology*. Polymer 56 (2015) 8 pp. 111-118.
- [9] Bledzki, A.K., Faruk, O., Kirschling, H., Kühn, J. and Jaszkwicz, A.: *Microcellular polymer and composites. Part II. Properties of different types of microcellular materials*. Polimery-W 52 (2007) 10 pp. 3-12.
- [10] Colton, J.S. and Suh, N.P.: *The nucleation of microcellular thermoplastic foam with additives: Part I: Theoretical considerations*. Polymer Engineering and Science 27 (1987) 8 pp. 485-492.
- [11] Mueller, J., Spoerrer, J. A. and Altstaedt, V.: *Foam injection moulding of a TPO/TPC-blend and the effect of different nucleating agents on the resulting foam structure*. AIP Conference Proceedings 1593 (2014) 7 pp. 367-373.
- [12] Heim, H.P. and Tromm, M.: *Injection molded components with functionally graded foam structures – Procedure and essential results*. Journal of Cellular Plastics 52 (2016) 21 pp. 299-319.
- [13] Kumar, K.S., Bhatnagar, N. and Ghosh, A.K.: *Development of long glass fiber reinforced polypropylene composites: mechanical and morphological characteristics*. Journal of Reinforced Plastics and Composites 26 (2007) 11 pp. 239-249.
- [14] Thomason, J.L., Vlug, M.A., Schipper, G. and Krikor, H.G.L.T.: *Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene: Part 3. Strength and strain at failure*. Composites Part A-Applied Science and Manufacturing 27 (1996) 10 pp. 1075-1084.
- [15] Spörrer, A.N.J. and Altstädt, V.: *Controlling morphology of injection molded structural foams by mold design and processing parameters*. Journal of Cellular Plastics 43 (2007) 18 pp. 313-330.

# **A demonstrator for the experimental assessment of the through-process modeling of injection-molded parts made of short-fiber-reinforced polymers**

**An example illustrating the greater reliability of results from structural calculations using an advanced design approach and correct anisotropic characterization of the materials**

**E. Spini**, RadiciGroup Performance Plastics,  
Chignolo d'Isola (Bergamo), Italy;  
**A. Bernasconi**, Politecnico di Milano, Milan, Italy

## **Abstract**

Through-process modeling of injection-molded parts is nowadays the industry standard approach to the structural analysis of parts made of short-fiber-reinforced polymers. The designer has to face challenging tasks, in order to conduct accurate and reliable analyses. Complex geometries, weld lines and multiple flows make it difficult to transfer the results of tests conducted on simple specimens to the assessment of the real parts. We have designed a mold for manufacturing a demonstrator, that is, a part of sufficiently complex shape, typical of injection-molded structural parts, permitting the creation of different conditions in terms of fiber orientation, presence of weld lines and multiple injection points. The part is designed to be tested under three- or four-point bending conditions. By simulating the test conditions, the designer can compare experimental results with numerical solutions, in order to better understand the potential of the software packages he is using.

## **Introduction**

The transportation sector is the driving force behind innovation leading to the design and development of new polymers with increasingly higher levels of performance. The need to reduce component weight requires materials which are capable of performing the same functions that only metals have been capable of achieving hitherto. In this field, polymers, and more specifically polyamide polymers, have played a very important role, especially for components operating at high temperatures and subjected to high stress. Novel nylon solutions have been introduced in keeping with the evolution towards smaller, more powerful and longer-lasting engines.

In the field of metal replacement (aluminum alloys, in particular), there are currently numerous mature applications where the replacement rate has reached 80% to 90%. Among these parts are radiator tanks, air intake manifolds, valve covers, fans and air conveyors.

However, there are other components that are still mostly made of metal, but are potential targets for metal substitution: engine mounts, hot side turbo air ducts, engine and transmission oil pans.

There are yet more applications which are being studied and for which hybrid solutions have been proposed: plastics with appropriately positioned metal inserts, or continuous-fiber-reinforced plastics. Examples of the latter are: brake pedals, suspension parts, front-end parts, car seat parts and dashboard supports.

In this context of change, producers of plastic materials for engineering uses have been investing sizable resources in the production of increasingly more reliable materials with better performance.

Another aspect, comparable in importance to the availability of suitable materials, is the access to data and more reliable design methodologies for more accurately defining the dimensions of plastic components. The traditional design criteria adopted for plastics, such as glass- or carbon-fiber-filled polymers considered as isotropic materials, are ones inherited from the metal world. Such an approach is likely to introduce severe design errors. In some cases parts may be oversized leading to unnecessary cost increases. In the opposite case, when part sizes are underestimated, additional costs will be incurred due to the need to re-design the components with a greater safety allowance.

As a result, it is necessary to change the approach to the design of engineering plastic components in order to increase the reliability of structural calculations. Such a change represents a very important step, particularly for components expected to operate in increasingly severe environmental conditions and/or plastic parts performing functions that could affect safety.

Plastics developed for metal replacement are generally glass- or fiber-filled polymers to be processed by injection-molding techniques. These materials, are, for all intents and purposes, anisotropic [1]. Fiber orientation and distribution determine the local characteristics at each point of the molded object and are dependent on the molding process.

This paper presents the results of a collaborative project by RadiciGroup Performance Plastics and the Politecnico di Milano university, in which a comparison is made between real and computed data for a plastic 'demonstrator'.

Computations were performed using a method known as Through-Process Modeling (TPM), which the local properties of the material at each point in a finite element model to be linked with the results of the injection process simulation. More specifically, the effect of the fiber orientation is taken into account through the use of appropriate software packages for the interface and the computation of properties as a function of the fiber orientation distribution. Examples of the application of the TPM method to fatigue strength assessment can be found in [2 - 4].

## Material characterization and advanced calculation approach

The material under consideration belongs to a PA66-GF50 speciality family featuring enhanced mechanical characteristics in comparison with standard products. In particular, the base formulation was modified to enhance the tensile strength and deformation at break, especially when weld lines were present. The weld lines are often the weakest place in the molded part. These improved characteristics are summarized in the graphs in Fig. 1.

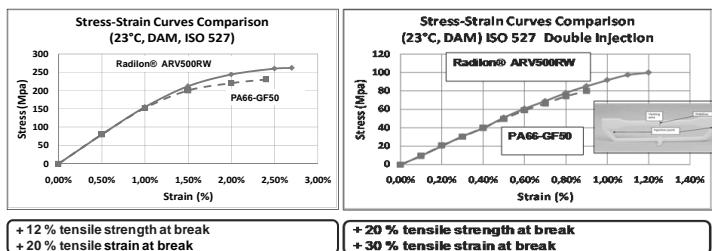


Fig. 1: Stress-strain curves of Radilon ARV500RW

In order to perform the advanced structural calculations, measurements of the characteristics of the base polymer material and the short-glass-fiber reinforcement were performed, as well as the characteristics of the samples cut out of rectangular plates at different angles with respect to the direction of melt flow. Special care was paid to the quality of the cut and the sample position, which could have a great effect on the results of measurements, based on the numerous tests performed. Material characterization was done taking into consideration the stress-strain curves at four cutting angles: 0°, 30°, 45° and 90°. Fig. 2 shows a chart of the approach used, consisting of the following sequence of steps:

Step 1: Simulation of the molding process (using appropriate software packages), which provides, among other things, the glass-fiber orientation tensor at each point and the position of the weld lines.

Step 2: Generation of a micro-mechanical model of the material with calibration of the model using the experimental results obtained for samples cut from plates at different angles.

Step 3: Mapping of the local properties of the material, using appropriate software packages, taking into account the morphology induced by the simulated molding process. Mapping is performed for each point of the mesh that will be used later on for the non-linear structural calculations.

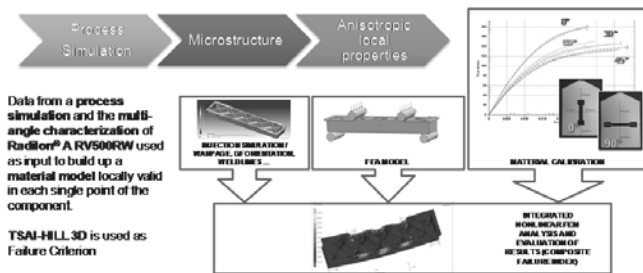


Fig. 2: Flow chart illustrating the material characterization for TPM

### Description of the component

The component studied in this work is a beam having an open C section and a pattern of internal reinforcing ribs. The part is shown in Figure 3.

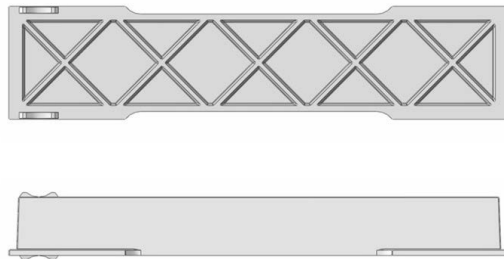


Fig. 3: Shape of the component

The component is manufactured by injection molding and the mold is designed to use different and multiple injection gates, as shown in Figure 4.

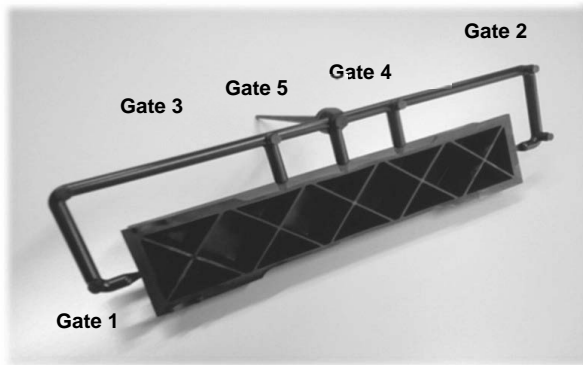


Fig. 4: Configuration of the different possible injection channels and position of the gates

### Experimental tests

The part was designed to be subjected to bending tests. A four-point bending configuration was chosen for the first tests presented here. The set-up is shown in Figure 5. It comprises a four-point bending fixture and a deflectometer, which accurately measures the deflection of the part at the center point (readings of the crosshead displacement transducer would be affected by the compliance of the rig). The fixture is mounted on a MTS RF150 testing machine, equipped with a 150 kN load cell.

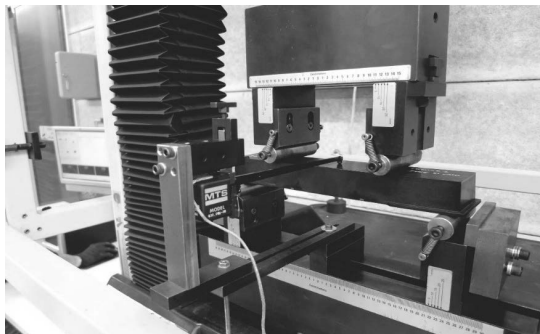


Fig. 5: Four-point bending set-up

The test was conducted in displacement control mode at a speed of 5 mm/min up to failure. Failure load and mode were different for different injection configurations.

In this paper, the results of four configurations are presented:

- a) Longitudinal injection (Gate 2)
- b) Double longitudinal injection (Gates 1 and 2 simultaneously)
- c) Side injection (Gate 5)
- d) Double side injection (Gates 3 and 4 simultaneously)

### Results of the experimental tests

Three specimens for each injection configuration were tested. The results are presented in Figure 6 as superimposed load-displacement curves of one specimen for each configuration. It appears that, due to the different fiber orientation patterns, the stiffness is modified as the injection configuration changes and, additionally, the strength is affected, also because of the presence of weld lines.

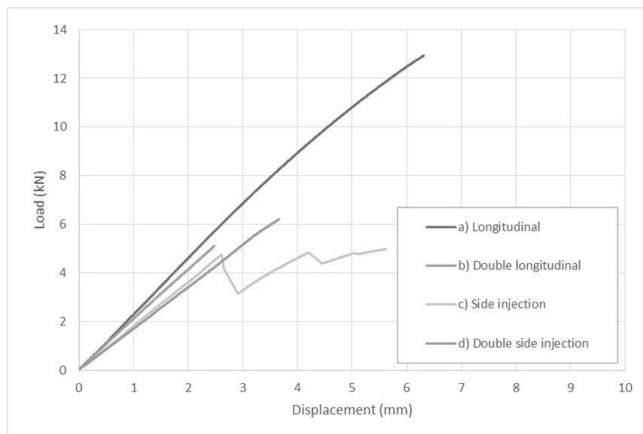


Fig. 6: Force-displacement curves

## FE models

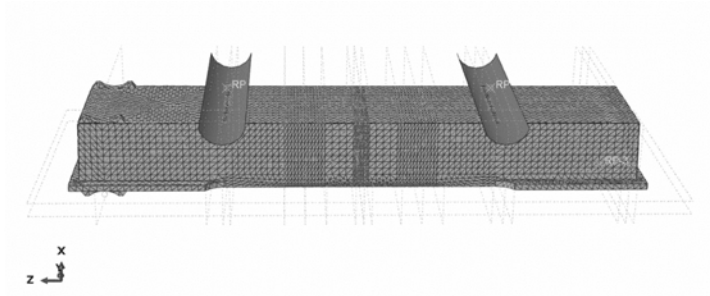


Fig. 7: Structural finite element model

The tests were simulated using Simulia Abaqus 6.14.3 Finite Element (FE) software. The FE model is shown in Figure 7. The elements are quadratic tetrahedra and the mesh size was varied in order to capture local stress fields accurately in the highly stressed regions, i.e., at the intersection of the inner ribs and the outer walls, as shown in Figure 8. Material properties were defined on the basis of process simulation analyses conducted using Moldex 3D software. Local material properties were evaluated using Digimat software, after mapping fiber orientation results from the process simulation mesh onto the structural mesh using the Digimat MAP package. The material properties were defined by the material characterization presented in the previous section and are available in the Digimat MX database. The material model is a non-linear model with plasticity, and the failure condition is defined by a strain-based Tsai-Hill criterion. A variable FI (Failure Index) is evaluated at each node. A value of FI equal to or greater than 1 indicates local failure.

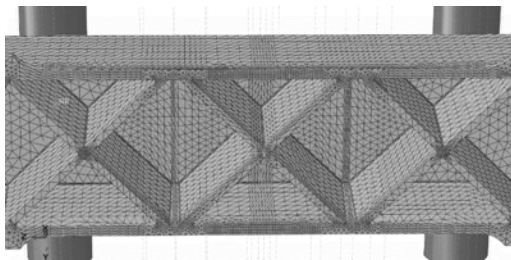


Fig. 8: Detail of the mesh refinement in the highly stressed regions

Incremental displacement of up to 8 mm with a maximum time increment of 0.05 was imposed on the rollers. The rollers were modelled as rigid surfaces, which were constrained to the model of the part through a contact interface. The presence of the lower rollers was simulated by constraining the vertical displacement of a reference point linked through a kinematic coupling to a surface corresponding approximately to the expected contact surface.

## Results of the FE analyses

Four different models were built corresponding to the four fiber orientation patterns, as obtained with the four different injection configurations. The results are presented in terms of load-displacement curves, where load is defined as the sum of the reaction forces of the upper rollers, and the displacement was recorded at the node corresponding to the contact point between the part and the arm of the deflectometer.

Loads and displacements are displayed up to the time of failure, defined as the time increment during which a value of the Failure Index of 1 is found at the highly stressed location. A typical map of the failure index is shown in Figure 9.

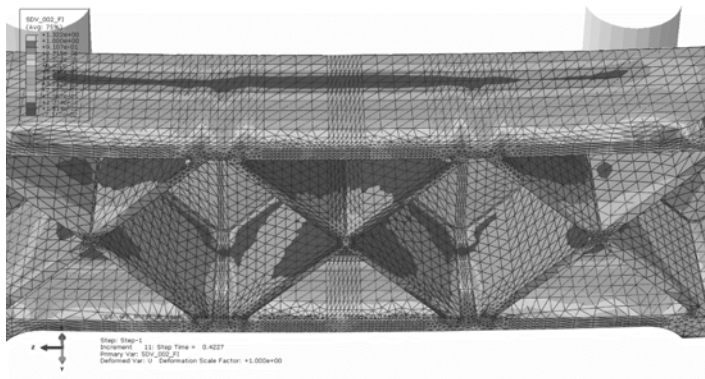


Fig. 9: Failure Index map

Load-displacement curves obtained with the four models are reported in Figure 10. The corresponding experimental load-displacement curves are superimposed on the results of the numerical simulation.

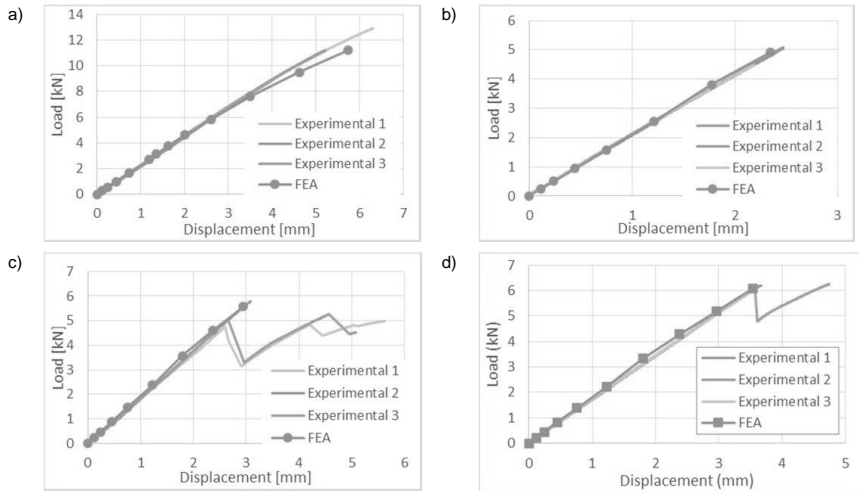


Fig. 10: Comparison of the simulated and the experimental load-displacement curves for all four cases: a) Longitudinal injection; b) Double longitudinal injection; c) Side injection; d) Double side injection

It appears that the FE models enable correct capture of the stiffness and the strength of the parts for all four injection configurations. It is interesting to compare the results obtained for the longitudinal configuration by TPM and the results that can be obtained by conducting FE analysis assuming an isotropic material with plasticity, as defined by tensile tests on standard ISO 527-2 specimens. This approach is often adopted for preliminary analysis. In this case, it is often customary to reduce the properties (elastic modulus and the plastic strain-yield stress curve) by a certain empirical reduction factor (by  $\frac{1}{3}$ , for example), as dictated by the experience of the designer, in order to introduce the effect of possible misalignment of the reinforcing fibers with respect to the principal stresses.

The load-displacement curves obtained by modeling the material as isotropic, with and without empirical reduction, are shown in Figure 11, where the experimental curve and the numerical one obtained by TPM are superimposed as well. The agreement of the TPM results with the experimental results is much better than that of the isotropic models in terms of both stiffness and strength. The isotropic model correctly captures the maximum load but overestimates the stiffness, while the isotropic model with empirical reduction fails to estimate accurately both the stiffness and the strength. By assuming an orthotropic material whose proper-

ties are related to the fiber orientation distribution in the part, the stiffness and the strength of the component are better evaluated.

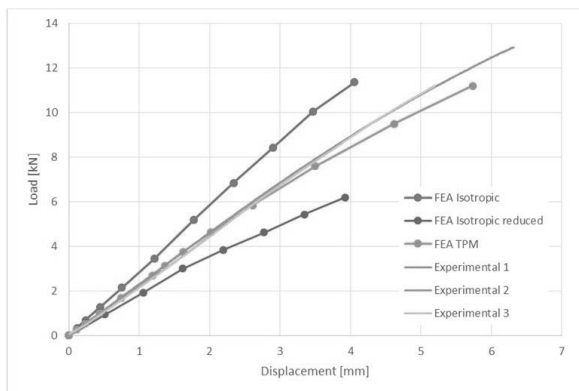


Fig. 11: Comparison of the experimental load-displacement curve for longitudinal injection with results obtained by FE with an isotropic material and FE with TPM

Comparison of isotropic and anisotropic models is not meaningful in the case of the other injection-molding configurations, since the isotropic models are insensitive to variations in the orientation patterns and to the presence of weld lines. In spite of the excellent agreement between TPM simulations and experimental results presented here, the analysis of injection-molded parts containing weld lines is still an open issue. In fact, for similar simulations conducted with other fiber-reinforced materials, we observed greater differences between the numerical and the experimental results. More investigation into the simulation of the mechanical behavior of weld lines, based on accurate observations of their microstructure as in [5], is needed. We believe that the component presented here could be used as a demonstrator for different possible solution techniques in the future.

## Conclusion

In this paper we presented the design of an injection-molded ribbed beam to be used as a demonstrator for different modeling techniques. The demonstrator is designed to be injection-molded using different combinations of injection channels and gates, thus enabling different fiber orientation patterns to be obtained and the position of weld lines to be varied.

The beam was tested under four-point bending and the tests were simulated by TPM, that is, by combining process simulation with structural analysis. The results of the simulations were in good agreement with experimental results and constitute an improvement over simplified modeling techniques, such as those assuming an isotropic material.

## Bibliographic references

- [1] Bernasconi A, Davoli P, Basile A, Filippi A. Effect of fibre orientation on the fatigue behaviour of a short glass fibre reinforced polyamide-6. *International Journal of Fatigue* 2007, 29: 199–208.
- [2] Castagnet S, Nadot-Martin C, Bernasconi A, Lainé E, Conrado E, Caton-Rose P. Through-Process Modeling for the fatigue life assessment of notched injection-molded specimens, 16th European Conference on Composite Materials (ECCM 16), Seville, Spain, (2014).
- [3] Moesenbacher A, Brunbauer J, Pichler P, Guster C, Pinter G. Modeling and validation of fatigue life calculation method for short-fiber-reinforced injection moulded parts. In: ECCM 16; 2014; Seville.
- [4] Guster C, Pinter G, Mösenbacher A, Eichlseder. Evaluation of a simulation process for fatigue life calculation of short-fiber-reinforced plastic components. *Procedia Eng* 2011;10:2104-2109.
- [5] Ayadi A, Nouri H, Guessasma S, Roger F. Large-scale x-ray microtomography analysis of fiber orientation in weld lines of short glass fiber reinforced thermoplastic and related elasticity behavior. *Macromol. Mater. Eng.* 2016, DOI: 10.1002/mame.201500463.



# Surface quality: improving the quality perception of molded parts

PhD candidate **P. Gamonal-Repiso**, Dr. **J.M. del-Mazo**,  
SEAT S.A, Martorell, Spain;

Prof. Dr. **M. Sánchez-Soto**, Centre Català del Plàstic/Universitat  
Politécnica de Catalunya-BarcelonaTech, Terrassa/Barcelona, Spain

## Abstract

A novel assessment method based on three-dimensions technology has been proposed for analyzing the surface quality of injection-molded parts. Starting from a mold having a leather texture engraved on it, the quality of replication on the surface of a polypropylene molded part has been studied as a function of the injection parameters. In order to establish a relationship between quality appearance and surface topography, amplitude parameters and functional parameters have been compared. A white light interferometer (WLI) was used to assess the surface and a scanning electron microscope (SEM) was employed to detect small features on the surface. The results indicated that, in terms of quality perception, functional parameters are more accurate than amplitude parameters for quantifying the mold replication on the polypropylene surface.

## 1. Introduction

Quality appearance is of great importance in the production of automotive interior parts, being strongly connected with quality perception. The uniformity and interior harmony are the main goals to be achieved since surface differences between adjacent components gives the customer an impression of low quality.

Nowadays, the method used for assessing the surface appearance is based on subjectivity and two-dimensional measurements [1]. However, this method does not provide enough surface information and requires several optimization loops in order to obtain optimal matching between components. A novel surface assessment method based on three dimensions (3D) is therefore necessary to adequately guarantee that the surface appearance of each component will meet requirements.

Achieving the aims of the new method requires standardization of surface assessment. A suitable setting of several parameters, such as sampling area ( $A$ ), sampling length ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) and number of data points ( $N$ ,  $M$ ), is required for each kind of texture. Several studies have been made relating to surface topography and surface appearance – for example, Ignell [2]

compared surface topographic features with gloss variations using a stereographic scanning electron microscope (SEM). In an earlier work, Ariño [3] characterized the surface of molded parts using alternative spatial parameters instead of traditional roughness parameters. Spatial parameters were a likely approach to relate surface appearance to surface topography. In the present study, the interferometry technique is used to characterize the surface. Interferometry is based on adding and cancelling amplitudes of different waves with the same frequency. With this technology a three-dimensional map of the surface can be built up.

## 2. Experimental

### Materials:

The material used was a polypropylene with 5% talc (PP-TD5). This is a commercial injection-molding grade for automotive interior applications produced by BASELL S.L (Tarragona, Spain) and denoted HC TKC 2007 N. The material had a density of  $0.93 \text{ g/cm}^3$  (ISO 1183-1/A) and a melt flow rate (230 °C, 2.16 kg) of 16 g/10 min (ISO 1133).

The mold cavity was a square with dimensions 100 x 100 x 3 mm (length x width x thickness) having a fan gate in one of the sides to minimize gating effects.

The cavity surface was engraved by Standex S.A (Barcelona, Spain) with a leather texture by means of a chemical process.

### Injection trials:

The samples were molded using an injection machine, the Engel Victory 110, with a clamping force of 1100 KN.

A design of experiments (DOE) was carried out to analyze the effect of injection parameters on surface appearance. A factorial design at three levels (low, intermediate, high) was carried out ( $3^2$ ) where the factors were the melt temperature ( $T_{\text{melt}}$ ) and mold temperature ( $T_{\text{mould}}$ ). Inside each temperature block, holding pressure was varied at two levels (400-600 bar) and injection speed was varied at three levels (100-300-500  $\text{cm}^3/\text{s}$ ). A total of 54 runs was made (Table 1). The injection parameters were selected according to the process window.

Table 1: Injection parameters and their levels

Block	T <sup>o</sup> melt (°C)	T <sup>o</sup> mold (°C)
Low temperatures	200	30-50-80
Intermediate temperatures	235	30-50-80
High temperatures	270	30-50-80

#### Standardization of sampling conditions:

Standardization of the sampling conditions was based on the Nyquist theorem, which provides the frequency limits (eq. 1, 2) (high frequency and low frequency).

$$f_h = \frac{1}{2\Delta x} = \frac{1}{2\Delta y} \quad (1)$$

$$f_L = \frac{1}{Nx\Delta x} = \frac{1}{My\Delta y} \quad (2)$$

Where  $f_h$  is the high frequency limit,  $f_L$  is the low frequency limit,  $N$  and  $M$  are the number of data points on the  $x$  and  $y$  axes.  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  are the sampling intervals on the  $x$  and  $y$  axes.

The sampling area was square, so the sampling parameters were set at  $N = M$  and  $\Delta x = \Delta y$ . The size of the sampling area and sampling length were normalized via the following strategy. The number of data points was set at 2048 since this provides the highest resolution ( $\Delta x = \Delta y = 0.001$  mm) for the 2.08 x 2.08 mm area. Moreover, as the fast Fourier transform (FFT) was applied, a data length of a power of two, that is,  $2^p$  (for the  $M \times N$  matrix,  $2^p \times 2^q$ ,  $p, q = 1, 2, \dots$ ) was preferable. The sampling length was varied from 0.001 mm to 0.02 mm (Table 2). Consequently the size of the area was obtained using Equation (3).

$$A = l_x \cdot l_y = (M - 1)\Delta x \cdot (N - 1)\Delta y \quad (3)$$

where  $A$  is the area and  $l_x$ ,  $l_y$  are the lengths on the  $x$  and  $y$  axes.

Once the sampling area was established, the same procedure was carried out to find the optimal sampling interval, as seen in Table 3.

The data were processed with the FFT, which transferred the data points from the space domain into the frequency domain. A Butterworth bandpass filter (Eq. 4) was then applied in order to discard the frequencies which were outside the frequency limits (high frequency and low frequency).

$$F(f) = 1 - \frac{1}{1 + \left( \frac{f - f_b}{f^2 - f_c^2} \right)^{2n}} \quad (4)$$

where  $f$  is the frequency,  $f_b$  is the bandwidth,  $f_c$  is the cut-off frequency and  $n$  is the filter order, which describes the steepness of the filter.

In the current study, the following considerations have been taken into account in order to filter data acquisition:

- The cut-off frequencies were the low-frequency and high-frequency limits.
- The filter order,  $n$ , was set at 1.

#### Surface characterization

Surface characterization in 3D has been carried out comparing height parameters and functional parameters:

The height parameters are the following: average roughness ( $S_a$ ) (Eq. 5), root mean square roughness ( $S_q$ ) (Eq. 6) and ten-point height ( $S_z$ ) (Eq. 7).

$$S_a = \frac{1}{A} \iint |z(x, y)| \, dx dy \quad (5)$$

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint Z^2(x, y) \, dx dy} \quad (6)$$

$$S_z = (\sum_{i=1}^5 |P_{i \max}| + \sum_{i=1}^5 |V_{i \max}|) / 5 \quad (7)$$

The functional parameters are the following: material ratio ( $mr$ ) and material volume ( $V_m$ ).

The material and volume ratios are the material forming the surface from the height corresponding to a threshold value to the highest surface peak (Figure 1). The threshold was set at  $120 \, \mu\text{m}$  in order to analyze the amount of material located above the threshold height.

The material ratio was calculated via the bearing area curve, and the material volume was calculated using the *Mark III* software program.

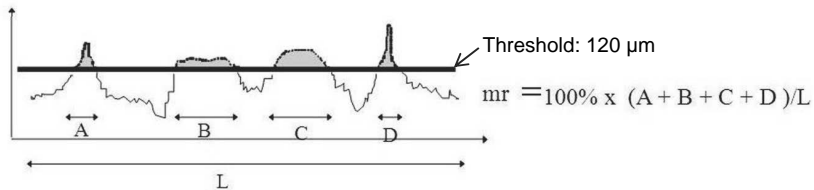


Fig. 1: Material ratio calculation. [5]

### 3. Results and discussion

#### Sampling conditions:

Figure 2 shows the influence of the sampling area on high parameters: Sa, Sq and Sz. Surface topographic information increases proportionally with the size of the sampling area from 4.16 to 419.02 mm<sup>2</sup>, at which point a plateau is reached. Further increments in the measurement area do not provide any additional information. From this point of view then, an area of 419.02 mm<sup>2</sup> (20.47 x 20.47 mm) is the optimal size for carrying out the analysis (Trial D in Table 2).

Table 2: Trials for determining the sampling area

Trial	Area (mm <sup>2</sup> )	Nx = My	$\Delta x = \Delta y$ (mm)	High frequency (mm <sup>-1</sup> )	Low frequency (mm <sup>-1</sup> )
A	4.16	2048	0.001	500	0.50
B	16.73	2048	0.002	250	0.25
C	104.65	2048	0.005	100	0.10
D	419.02	2048	0.01	50	0.05
E	1676.08	2048	0.02	25	0.025

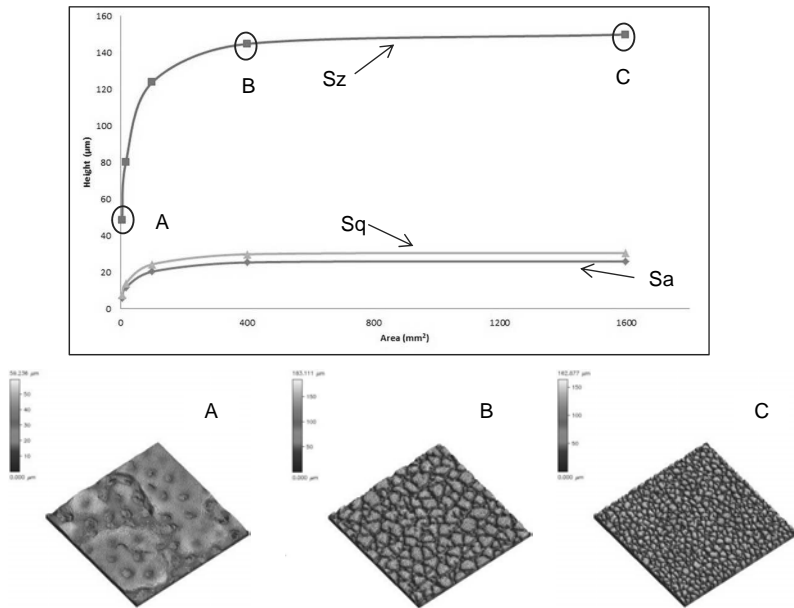


Fig. 2: Sampling area influence on high parameters: Sa, Sq and Sz.

The optimal size of the sampling area is 20.47 x 20.47 mm (Figure 2B), which provides the same information about the surface as does a larger area of 40.94 x 40.94 mm (Figure 2C). Moreover, it can be seen that Figure 2A fails to provide enough topographic information.

On the other hand, the optimal sampling length for assessing an area of 20.47 x 20.47 mm is 0.02 mm (Trial C in Table 3), as shown in Figure 3B. The same topographic information was obtained with less evaluation time than when a shorter sampling length was set (Figure 3C and Table 3). Using sampling intervals greater than 0.02 mm leads to the loss of topographic information (Figure 3A).

Table 3: Trials for determining the sampling interval.

Trial	Sampling interval $\Delta x, \Delta y$ (mm)	$N_x = M_y$	High frequency limit ( $\text{mm}^{-1}$ )	Low frequency limit ( $\text{mm}^{-1}$ )	Evaluation time (min)
A	0.005	4096	100	0.048	270
B	0.01	2048	50	0.048	75
C	0.02	1024	25	0.048	30
D	0.05	410	10	0.048	10
E	0.10	206	5	0.048	5
F	0.20	104	2.5	0.048	2
G	0.50	42	1	0.048	1

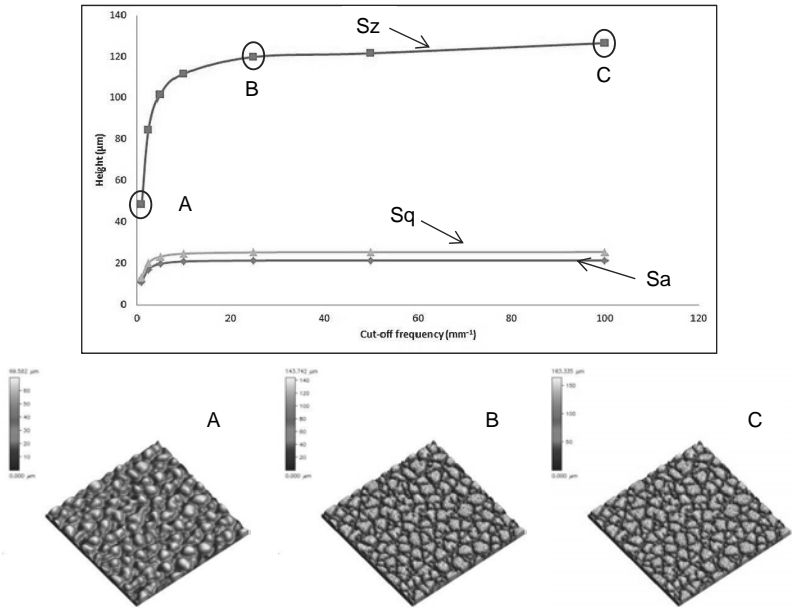


Fig. 3: Sampling interval influence on topographic information.

The optimal sampling conditions, from the point of view of automotive applications, are shown in Table 4.

Table 4: Optimal sampling conditions for leather grain.

Area (mm <sup>2</sup> )	Nx = My	$\Delta x = \Delta y$ (mm)	High frequency (mm <sup>-1</sup> )	Low frequency (mm <sup>-1</sup> )	Evaluation time (min)
419.02	1024	0.02	25	0.048	30

#### Relation between injection parameters and surface:

The surfaces have been evaluated while taking into account high parameters (Sa, Sq and Sz) and functional parameters (mr and Vm), as previously stated.

The results obtained did not show significance variations in the Sa and Sq parameters. In all analyzed surfaces the mean values for each parameter were very similar at  $25.5 \pm 0.1 \mu\text{m}$  and  $29.9 \pm 0.1 \mu\text{m}$  respectively.

On the other hand, small differences were detected for the Sz value, which, depending on injection parameters, varied from  $136 \mu\text{m}$  to  $150 \mu\text{m}$ . The most important injection parameters for obtaining the highest roughness value were melt temperature ( $T_{\text{melt}}$ ), mold temperature ( $T_{\text{mold}}$ ) and holding pressure ( $P_{\text{hold}}$ ). These injection parameters lead to a better replication of the mold surface by the polymer melt. However, mold reproduction on the plastic surface is difficult when working at low temperatures since the polymer melt freezes very quickly without having enough time to reproduce the mold texture. In addition, a low injection speed and holding pressure result in poor mold replication on the polymer surface.

Table 5: Injection parameters to achieve the highest and lowest Sz value.

Sz ( $\mu\text{m}$ )	Tmelt ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tmold ( $^{\circ}\text{C}$ )	Phold	V iny
150	270	80	600	100
136	200	30	400	100

Greater differences were found with the mr and Vm parameters. The material ratio difference was from 19.40% to 33.64%. Moreover, material volume changed from  $4.72 \times 10^9 \mu\text{m}^3$  to  $9.12 \times 10^9 \mu\text{m}^3$ . Variation in both the material and volume ratios represents a greater quantity of polymer above the  $120 \mu\text{m}$  threshold height, and thus more accurate mold replication was achieved by the polymer melt.

Figures 4 and 5 show the results for the maximal and minimal material ratio values, and the injection conditions that deliver that replication. The highest mr value was reached at the maximal level of mold temperature, holding pressure and injection speed as well as the minimum melt temperature. This latter factor was unexpected but can be explained by the high MFI ( $16 \text{ g}/10 \text{ min}$ ) of the polypropylene grade used. Selection of high melt temperatures

leads to the appearance of flashing around the sample, resulting in a final lower replication of the mold surface. On the other hand, low melt temperatures prevent polymer flashing and all the pressure exerted during injection is transferred to the melt material and to the mold's leather-textured surface.

Table 6: Injection parameters for achieving the highest and lowest mr values.

mr (%)	Tmelt (°C)	Tmold (°C)	Phold	V iny
33.64	200	80	600	500
19.40	200	30	400	100

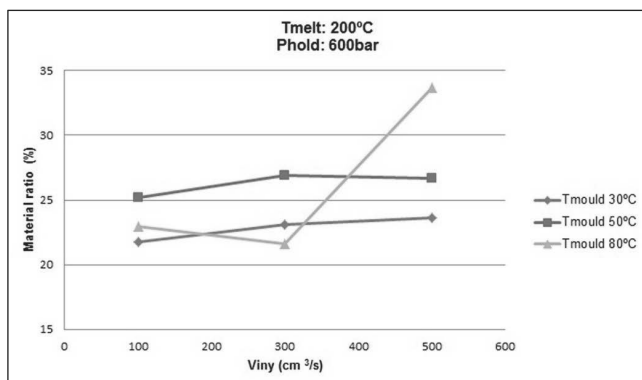


Fig. 4: Injection conditions to reach the highest mr value

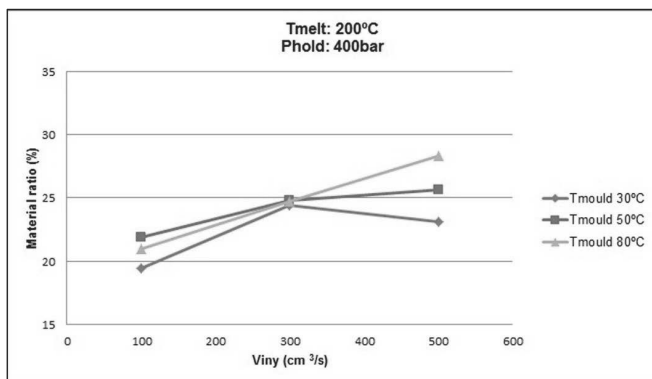


Fig. 5: Injection conditions for reaching the lowest mr value

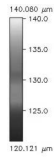


Fig.6:  $T_{\text{melt}}$ : 200°C;  $T_{\text{mold}}$ : 30°C;  
 $V_{\text{iny}}$ : 100cm<sup>3</sup>/s  $P_{\text{hold}}$ : 400bar  
 Sz: 136.601μm; mr: 19.4%;  
 $V_m$ :  $4.72 \times 10^9 \mu\text{m}^3$

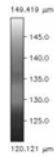


Fig.7:  $T_{\text{melt}}$ : 200°C;  $T_{\text{mold}}$ : 80°C;  
 $V_{\text{iny}}$ : 500cm<sup>3</sup>/s;  $P_{\text{hold}}$ : 600bar.  
 Sz: 144.731μm; mr: 33.64%;  
 $V_m$ :  $9.12 \times 10^9 \mu\text{m}^3$

Figures 6 and 7 represent the quantity of material above the 120 μm threshold height. A comparison reveals that the injection conditions in Figure 7 result in a proper filling of the micro-cavities of the leather texture. The material ratio and material volume indices exhibit significant differences.

The samples with highest mr and  $V_m$  values have the best accuracy of mold replication although not showing the greatest roughness (Sz). This means functional parameters are more adequate than amplitude parameters for assessing mold reproducibility by the polymer melt. Figure 8 represents the replication accuracy of the mold texture on the polymer surface.

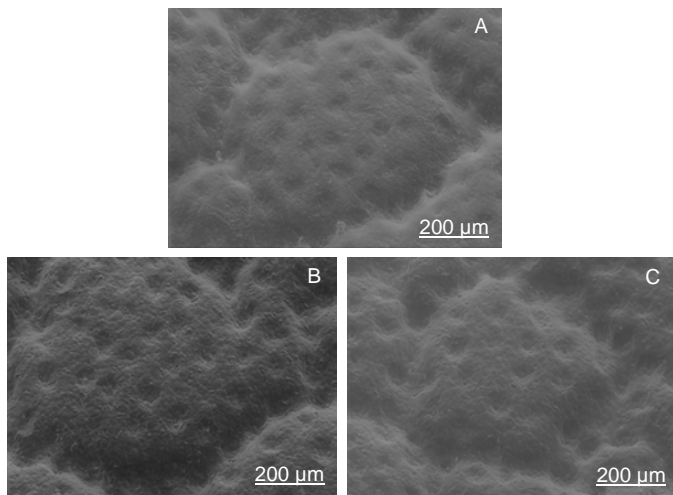


Fig. 8: Scanning electron micrographs of PP surface. Sample A: Sz: 136.601 $\mu\text{m}$ ; mr: 19.4%; Vm:  $4.72 \times 10^9 \mu\text{m}^3$ . Sample B: Sz: 144.731 $\mu\text{m}$ ; mr: 33.64%; Vm:  $9.12 \times 10^9 \mu\text{m}^3$ . Sample C: Sz: 150.517 $\mu\text{m}$ ; mr: 26.31%; Vm:  $7.27 \times 10^9 \mu\text{m}^3$

Although Figure 8B is not the sample with the highest roughness value (Sz), it does have the maximal mold surface replication, having surface microfeatures absent in samples A and C.

#### 4. Conclusions

The sampling conditions, sampling area and sampling interval have an important influence on topographic information.

Injection parameters can modify the mold reproducibility on the polymer surface.

In order to characterize the surface from the point of view of mold replication, functional parameters have been demonstrated to be more accurate than amplitude parameters.

This study demonstrates the need for a standardized procedure in the sampling conditions for textured surfaces in automotive applications.

## 5. Acknowledgments

The authors thank BASELL S.L (Tarragona, Spain) for supplying the material, and Standex S.A (Barcelona, Spain) for engraving the mold surface and for technical support.

## 6. References

- [1] DIN EN ISO 4287: 1998
- [2] Ignell, S.: Three-dimensional scanning electron microscopy characterization of the topography of textured polymeric surfaces. *Polymer engineering and science*, 50 (2010) 8pp. 1527-1534.
- [3] Ariño, I.: Surface texture characterization of injection-molded pigmented plastics. *Polymer engineering and science*, 44 (2004) 12 pp. 1615-1626.
- [4] Lehmann, P.: *Fundamental aspects of resolution and precision in vertical scanning white-light interferometry*. IOP Publishing, 4 (2016) .
- [5] Cohen, D. K. *Michigan metrology*. LLC, USA: 2014.
- [6] Stout, K. J, *Development of Methods for the Surface Characterization of Roughness in Three Dimensions*. Penton Press, London: 2000.
- [7] Muralikrishnan, B. and Raja, J. *Computational surface and roundness metrology*. Springer, USA: 2009.
- [8] Thomas, T. R. *Rough Surfaces*. Imperial College Press, London: 1999.
- [9] Whitehouse D. J. *Handbook of Surface Metrology*. Institute of Physics Publisher, Bristol and Philadelphia: 1994.

# Leichtbau bei Volkswagen

## Über die duroplastische Pultrusion zur großserienfähigen Herstellung faserverstärkter Kunststoffe für einen Lastpfad in der Türstruktur

Dr.-Ing. **P. Hörmann**, Dipl.-Ing. (FH) **K. Bornemann** ,  
Dr.-Ing. **F. Flueggen**, Dipl.-Ing. **H. Herten**,  
Dr.-Ing. **V. Hohm**, Dr.-Ing. **T. Ströhlein**,  
Volkswagen AG, Wolfsburg

### Kurzfassung

Dieser Beitrag thematisiert die Anwendung der duroplastischen Pultrusion für eine großserienfähige und wirtschaftliche Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen (FVK) im Mittelklasse-Fahrzeugsegment bei Volkswagen. Neben der duroplastischen Pultrusion als Prozess wird ein iteratives Vorgehen aus Bauteilauslegung, numerischer Absicherung und finaler experimenteller Erprobung für die Entwicklung eines sogenannten FVK-Türbrüstungsrohres aufgezeigt. Als bedeutendes Ergebnis ist das erfolgreiche Bestehen eines Small-Overlap-Crashtests zu nennen. Dieses qualifiziert das FVK-Türbrüstungsrohr für eine Serienanwendung.

### 1. Einleitung

Leichtbau wird durch die intelligente Kombination unterschiedlicher Materialien und deren Eigenschaften ermöglicht [1]. Die Vorteile und Nachteile der faserverstärkten Kunststoffe (FVK) sind im Kontext einer Anwendung im Automobilbau bekannt. Bezogen auf die niedrige Dichte besitzen faserverstärkte Kunststoffe in Faserrichtung überlegene Materialeigenschaften – Festigkeit und Steifigkeit. Trotzdem haben die faserverstärkten Kunststoffe den kommerziellen Durchbruch mit Blick auf eine automobilen Großserienanwendung noch nicht geschafft [2]. Zu schwer wiegen die Kostenintensität der Halbzeuge und der Mangel an robusten, vollautomatisierten Prozessen.

### 2. Duroplastische Pultrusion für den Automobilbau

Die duroplastische Pultrusion verbindet die werkstoffspezifischen Vorteile mit dem Alleinstellungsmerkmal eines robusten, kontinuierlichen und vollständig automatisierten Herstellungsprozesses. Sie erfüllt mit Prozessgeschwindigkeiten bis zu 3 m/min in Kombination mit wirtschaftlichen Halbzeugkonzepten die Anforderungen einer automobilen Großserie.

Der Titel dieses Artikels wirft folgende Fragestellungen auf:

1. Warum wird eine duroplastische anstatt einer thermoplastischen Matrix gewählt?
2. Warum wird die Pultrusionstechnologie als Herstellverfahren gewählt?
3. Die Technologie ist in anderen Branchen seit vielen Jahrzehnten etabliert und es werden TÜV-geprüfte Bauteile zum Beispiel für die Bauindustrie hergestellt.  
Worin besteht die Herausforderung, diese Technologie für automobiler Anwendungen zu nutzen?

Im Automobilbau sind für zukünftige Anwendungen hauptsächlich thermoplastische Matrixsysteme zur Herstellung von FVK-Bauteilen im Fokus [3, 4, 5]. Die Kosten für FVK-Bauteile korrelieren stark mit der Prozessgeschwindigkeit. Wird eine angestrebte Stückzahl pro Zeiteinheit mit einer Anlage nicht erreicht, so muss die Anlage inklusive ihrer Werkzeuge dupliziert werden.

Hohe Investitionskosten sowie eine starke Streuung der Bauteilqualität sind die direkten Folgen. Im Vergleich zu thermoplastischen Faserverbundstrukturen erlaubt der Einsatz duroplastischer Kunststoffe die Herstellung noch höher belastbarer Strukturbauteile. In Kombination mit der duroplastischen Pultrusion werden verglichen mit thermoplastischen Herstellungstechnologien gesteigerte Prozessgeschwindigkeiten erzielt.

Diese hohe Prozessgeschwindigkeit und die resultierenden geringen Herstellkosten beantworten die Frage, warum die Pultrusionstechnologie als Herstellverfahren gewählt wurde. Zudem sprechen die erreichbaren, hohen mechanischen Kennwerte auf begrenztem Bauraum sowie die geringen technologiebedingten Materialkosten für die Pultrusion. Eine detaillierte Prozessbeschreibung ist der Quelle [6] zu entnehmen. Die hohen mechanischen Kennwerte werden durch eine Maximierung des Faservolumengehalts auf Werte oberhalb 70% sowie einer ideal gestreckten Anordnung der am stärksten belasteten Fasern erreicht. Ein Großteil dieses stark belasteten Fasermaterials kann direkt von einer Spule als Roving in ein finales Bauteil überführt werden. Durch diese Direktverarbeitung wird das wirtschaftlich maximale Potenzial des kostenintensiven Fasermaterials ohne vorgeschaltete Verarbeitungsschritte im Bauteil genutzt. Zusätzliche Halbzeuge ermöglichen die kontinuierliche Verarbeitung zum Faserhybrid durch unterschiedliche Fasertypen und die Variation der Faserausrichtung.

Die Frage nach der Herausforderung für die automobiler Anwendung ist schwieriger zu beantworten. Die Pultrusionstechnologie ist bereits im Türen- und Fensterbau, für Betonbewehrungen, im Windenergiesektor sowie in Form von Strukturbauteilen in der Bauindustrie etabliert. Warum werden trotz ihres Potenzials bisher keine pultrudierten Bauteile im Automobilbereich eingesetzt?

Weniger bekannt sind jene Hürden, um eine neue Technologie wie die Pultrusion in der automobilen Großserie zu etablieren. Eine der offensichtlichen Herausforderungen liegt in den komplexen Bauteilgeometrien für eine automobiler Anwendung. Technologiebedingte „Design-Rules“

müssen in einer frühen Bauteilentwicklungsphase bekannt sein und berücksichtigt werden. Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit können hochbelastbare Profilstrukturen hergestellt werden. Eine Querschnittsänderung über die Länge ist jedoch nur mit starken Einbußen in der Prozessgeschwindigkeit und Erhöhung der Fertigungskomplexität umsetzbar.

Das zu verarbeitende Werkstoffsystem muss den Anforderungen einer kostengünstigen, voll-automatisierten, robusten und verschnittarmen Fertigung genügen. Definierte mechanische Lastfälle sind weltweit und im Kontext einer validierten, numerischen Auslegung voraussagbar zu erfüllen. Diese Anforderungen unterscheiden sich deutlich zu jenen der genannten Branchen, bei denen die Bauteile überwiegend ortsgebunden und stationär eingesetzt werden.

Bild 1 stellt vereinfacht die Korrelation zwischen den Jahresstückzahlen und den Stückkosten für die drei Fertigungstechnologien manuelle oder teilautomatisierte Prepreg-verarbeitung, Resin Transfer Moulding (RTM) und Pultrusion dar. Die Pultrusionstechnologie ermöglicht durch die vergleichsweise niedrigen Stückkosten eine großserienfähige und wirtschaftliche Herstellung von Faserverbundwerkstoffen für ein Mittelklasse-Fahrzeugsegment -- Jahresstückzahlen größer 100.000.

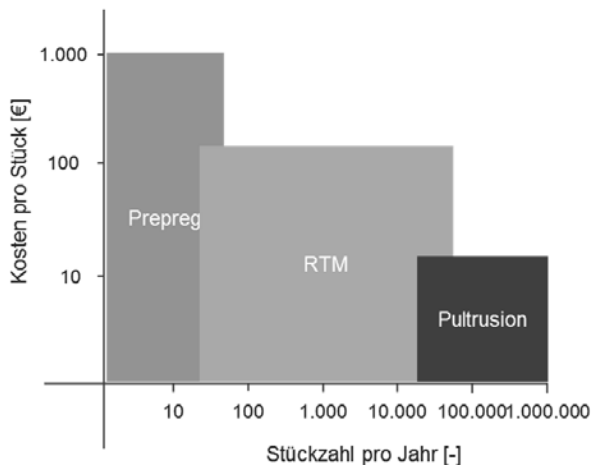


Bild 1: Vereinfachte Korrelation zwischen Stückkosten und Jahresstückzahlen von drei Fertigungstechnologien für Bauteile aus faserverstärktem Kunststoff

### 3. Türbrüstungsrohr aus faserverstärktem Kunststoff

Die duroplastische Pultrusion ermöglicht es erstmalig, ein konventionelles Stahl-Crashrohr als Lastpfad in der Türstruktur durch ein sogenanntes Türbrüstungsrohr aus faserverstärktem Kunststoff – FVK-TBR – zu ersetzen – siehe Bild 2. Volkswagen nutzt diesen Lastpfad, um für

den Kunden einen verbesserten Schutz in Front-Crash-Szenarien – zum Beispiel: Small-Overlap – zu schaffen.

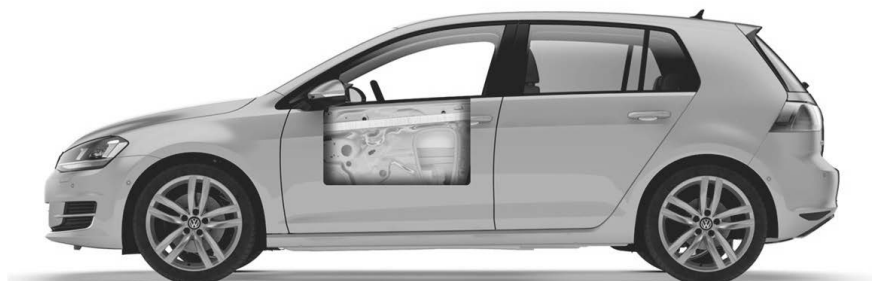


Bild 2: Golf 7 mit exemplarischer Darstellung eines sogenannten Türbrüstungsrohrs aus faserverstärktem Kunststoff als Türlastpfad

Das FVK-TBR ist ein Faserhybrid. Der Lagenaufbau ist durch den Querschnitt in Bild 3 dargestellt. Die 0°-Richtung ist die Herstellungsrichtung und im Fall eines Front-Crashes mit geringer Überdeckung die Hauptbelastungsrichtung. In diese sind die Kohlenstofffasern orientiert, um die auftretenden Drucklasten weiterzuleiten. In 90°-Richtung liegen quer dazu Glasfasern, um im Außenbereich des Querschnittes als Korsett gegen ein Ausknicken des Kohlenstoffstabes zu stützen und im Innenbereich gegen korrosive Einwirkungen im Nassraum des Fahrzeuges zu schützen. Mehr als 90% der auf Druck belasteten Kohlenstofffasern werden direkt von der Spule als Roving in das Bauteil überführt, ohne dass eine kostenerhöhende Zwischenstufe über Halbzeuge erforderlich ist. Die Glasfaser-Ummantelung erfolgt über Halbzeuge. Die duroplastische Pultrusion ermöglicht Taktzeiten von 20 Sekunden.

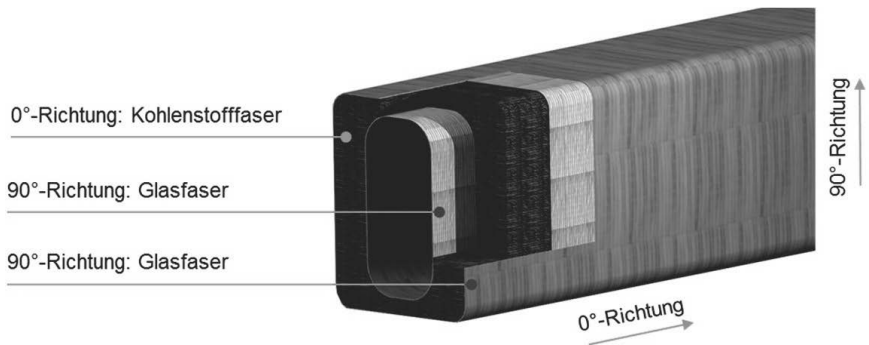


Bild 3: Laminataufbau eines sogenannten Türbrüstungsrohrs aus faserverstärktem Kunststoff

Das FVK-TBR ist ausgelegt für die Gewährleistung des Insassenschutzes in Front-Crash-Szenarien mit nur geringer Überdeckung der Karosserie zum Hindernis – Beispiel: Small-Overlap-Crash. Eine Herausforderung dabei ist, dass die Strukturen im Zentrum des Fahrzeuges nicht wirken können, um entstehende Kräfte zu absorbieren oder in den Hinterwagen weiterzuleiten – siehe Bild 4.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sieht Volkswagen einen dritten Lastpfad über die Tür vor. Als derzeitige Serienlösung überträgt ein Stahl-Crashrohr im Zusammenspiel mit Schweller- und Dachrahmenstruktur auftretende Kräfte von der A-Säule über die B-Säule in den Hinterwagen des Fahrzeuges. Zu betonen ist, dass die auftretenden Kräfte weitergeleitet und nicht abgebaut werden. Eine Energieabsorption wird nicht angestrebt.



Bild 4: Computer-Aided-Design Modell des Karosserie-Rohbaus eines Golf 7 mit exemplarischen Lastpfaden während eines Front-Crashes mit geringer Überdeckung – Englisch: Small-overlap front crash.

Ein Stahl-Crashrohr als Türlastpfad – siehe Bild 5-links – ermöglicht eine Gewichtseinsparung von circa 40 % im Vergleich zu Konzepten, die nur eine Ertüchtigung des Dachrahmens bzw. des Schwellers vorsehen.

Das FVK-TBR realisiert gegenüber dem Stahl-Crashrohr eine Gewichtersparung von 50% -- siehe Bild 5-rechts. Zur Ein- und Weiterleitung der auftretenden Kräfte in und durch das FVK-TBR sind sogenannte kunststoffumspritzte Aluminiumendstücke definiert – siehe gelbliche Einfärbung. Diese werden mittels Übermaßpassung kraftschlüssig in das FVK-Rohr eingepresst. Für die Auslegung des entstehenden Hybrid-Bauteils und seiner Subkomponenten besteht eine Herausforderung in der Abstimmung der unterschiedlichen Werkstoffe – Glas- und Kohlenstoff-faser, Matrixwerkstoff, Aluminium und Kunststoffumspritzung – hinsichtlich der Erfüllung mechanischer Lasten und deren Einleitung, Temperatúrausdehnung, Korrosion und Passungen. Alle Subkomponenten und der Zusammenbau sind durch robuste, großserientaugliche Prozesse gefertigt.

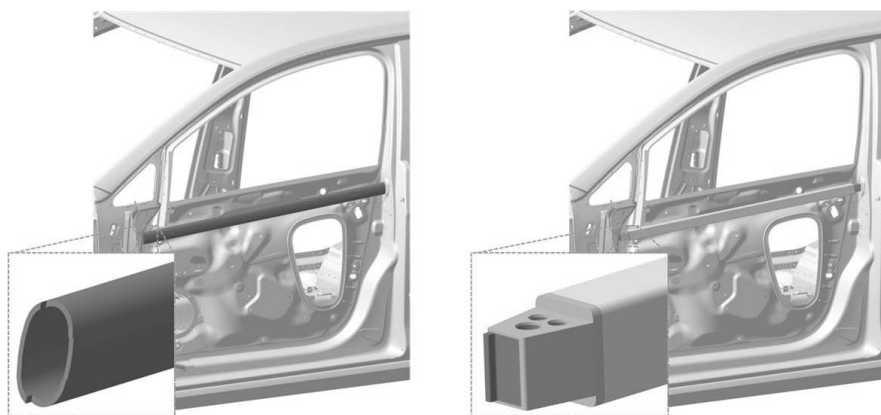


Bild 5: Computer-Aided-Design Modell des Türrohbaus eines Golf 7 mit Stahl-Crashrohr als Lastpfad (links) und Türbrüstungsrohr aus faserverstärktem Kunststoff (rechts)

#### 4. Absicherung

Die Absicherung der Bauteilauslegung erfolgte unter anderem numerisch durch Fahrzeug-Crashsimulation, experimentell durch dynamische Bauteilprüfung in einem Fallturmaufbau und einem realen Fahrzeug-Crash.

Zur numerischen Absicherung wurde der FVK-Werkstoff charakterisiert, um eine virtuelle Beschreibung des Werkstoffverhaltens durch geeignete Materialmodelle für die jeweilige Simulationssoftware zu ermöglichen.

Die erforderlichen Werkstoffprüfungen wurden getrennt für glas- und kohlenstoffaserverstärkte Prüfkörper durchgeführt. Die Materialcharakterisierung pultrudierter Prüfkörper stellte die Vergleichbarkeit hinsichtlich Faserausrichtung, Faservolumengehalt etc. sicher. Sie erfolgte für unterschiedliche Temperaturen.

Das Materialverhalten des Aluminiums und der Kunststoffumspritzung für die Endstücke wurde vorab im Rahmen anderer Projekte charakterisiert.

Aus den resultierenden Kraft-Weg- beziehungsweise Spannungs-Dehnungs-Verläufen wurden in Kooperation mit der AUDI AG entsprechende Inputdaten für die numerische Simulation erzeugt. Die Spannungs-Dehnungsdiagramme in Bild 6 zeigen die anschließende Validierung des numerischen Werkstoffverhaltens anhand experimenteller Daten für den glasfaser- und kohlenstoffaserverstärkten Kunststoff (GFK- und CFK). Der Vergleich zeigt exemplarisch eine sehr gute Korrelation.

Dieser Ansatz ermöglicht neben einem ganzheitlichen Werkstoffverständnis, eine kosteneffiziente und prototypenarme Absicherung durch eine realitätsnahe Bauteilauslegung.

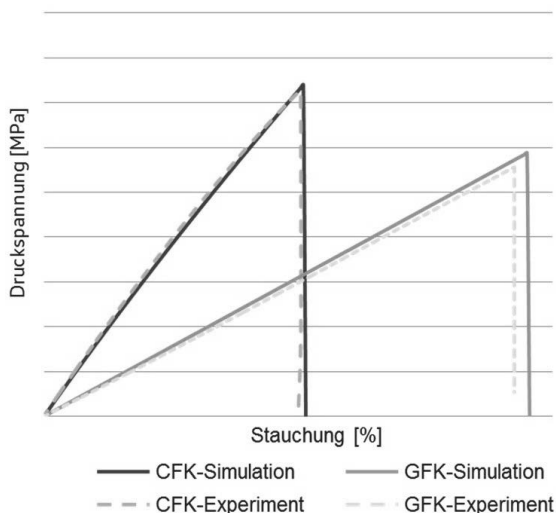


Bild 6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Druckbelastung – resultierend aus der experimentellen Materialcharakterisierung und der Simulation eines glasfaserverstärkten sowie eines kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffs

Zur experimentellen Absicherung wurde das FVK-TBR in einem Fallturmversuch dynamisch erprobt. Der Versuchsbau ist in Bild 7 dargestellt. Das FVK-TBR wurde dazu vertikal in einem Fallturm fixiert. An den jeweiligen Enden des FVK-TBRs wurden in geringem Abstand Blechpakete positioniert. Diese entsprachen hinsichtlich Materiallegierungen, Blechdickenkombination und Orientierung der Einbausituation an der A- und B-Säule im Fahrzeughbau.

Ein definiertes Gewicht fällt aus einer definierten Höhe auf das FVK-TBR und staucht dieses. Der Crashenergie-Eintrag und die Verformungsraten entsprachen jenen eines realen Fahrzeug-Small-Overlap-Crashes. Ziel war es, über eine definierte Zeit ein bestimmtes Kraftniveau äquivalent dem Stahl-Crashrohr von der A- in die B-Säule weiterzuleiten. Dieses wurde erfolgreich erfüllt und führte in einem finalen Schritt zum Bestehen eines realen Small-Overlap-Crashes in einem Golf 7.

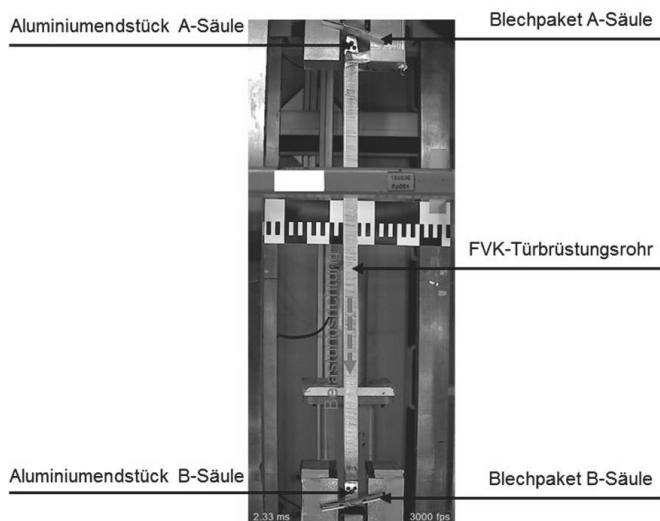


Bild 7: Darstellung eines Fallturmversuchs zur dynamischen Erprobung eines sogenannten Türbrüstungsrohr aus faserverstärktem Kunststoff

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel thematisiert die Anwendung der duroplastischen Pultrusion für eine großserienfähige und wirtschaftliche Herstellung von Faserverbundwerkstoffen im Mittelklasse-Fahrzeugsegment bei Volkswagen.

Ein sogenanntes Türbrüstungsrohr aus faserverstärktem Kunststoff ersetzt erstmalig ein konventionelles Stahl-Crashrohr als Lastpfad in der Türstruktur. Das FVK-TBR realisiert als duroplastisches Faserpultrudat im Vergleich zur Serienlösung eine Gewichtsersparnis um ~ 50% bei deutlich einstelligen Leichtbaukosten.

Es verbindet die werkstoffspezifischen Vorteile mit dem Alleinstellungsmerkmal eines robusten, kontinuierlichen und vollständig automatisierten Herstellungsprozesses – der duroplastischen Pultrusion. Prozessgeschwindigkeiten bis zu 3 m/min erfüllen in Kombination mit wirtschaftlichen Halbzeugkonzepten und einer gezielten Faserauswahl die Anforderungen einer automobilen Großserie.

Neben der duroplastischen Pultrusion als Herstellungsprozess wird ein iteratives Vorgehen aus Bauteilauslegung, numerischer Absicherung und finaler experimenteller Erprobung des FVK-TBR aufgezeigt. Als bedeutendes Ergebnis ist das erfolgreiche Bestehen eines Small-Overlap-Crashtests zu nennen. Dieses qualifiziert das FVK-TBR für eine Serienanwendung.

Ein Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten ist die numerische Beschreibung des dehnratenabhängigen Werkstoffverhaltens des Faserverbundwerkstoffs. Eine hochdynamische Belastung des faserverstärkten Kunststoffs führt zu einer deutlichen Steigerung der mechanischen Leistungsfähigkeit. Sowohl Festigkeit als auch Bruchdehnung steigen durch visko-elastische Effekte in der Kunststoffmatrix [7, 8] im Vergleich zu einer quasi-statischen Belastung.

Diese Performanceverbesserung wird zukünftig in der Auslegung des Bauteils und der anschließenden numerischen Absicherung berücksichtigt. Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit einer weiteren wirtschaftlichen Ertüchtigung durch eine noch präzisere, schlankere Auslegung des FVK-TBRs.

Weitere Arbeitspunkte bis zur finalen Integration in ein Serienfahrzeug sind die Qualifizierung eines großserienfähigen Fügekonzepts für die Integration in den Fahrzeug-Karosserierohbau, sowie eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit über die Kombination verschiedener Herstelltechnologien.

## 6. Bibliographie

- [1] VDI-Gesellschaft Material Engineering, Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung, 2014.
- [2] A. Knoch, "Herausforderung Großserie", Frankfurter Allgemeine Zeitung, vol. 31.10.2014, p. 0V1, 2014.
- [3] Carl Hanser Verlag (Hrsg): Spritzgießen oder Reaktionstechnik für Automobilteile? Zeitschrift: Kunststoffe 3/2013.
- [4] C. Gröschel, D. Drummer: Thermoplastische Faserverbundkunststoffe. München, 2013.
- [5] H. Eickenbusch, O. Krauss: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien. (VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 3) Berlin, 2013.
- [6] T. F. Starr, Ed., Pultrusion for Engineers. Crc Pr Inc., 2000.
- [7] P. Kuhn, M. Plöckl, H. Körber. Experimental investigation of the failure envelope of unidirectional carbon-epoxy composite under high strain rate transverse and off-axis tensile loading. 11th International DYMAT Conference, 2015.
- [8] H. Körber, J. Xavier, P. P. Camanho, Y. E. Essa, F. Martín de la Escalera. High strain rate behaviour of 5-harness-satin weave fabric carbon-epoxy composite under compression and combined compression-shear loading. International Journal of Solids and Structures, 2015.

# **Hohlprofile, Organobleche und LFT-Knoten – Hybridbauteile aus Faserkunststoffverbunden für die automobile Serienproduktion**

## **Hollow profiles, organo sheets and LFRT node structures – hybrid design parts made of fiber reinforced plastics for the automotive serial production**

Dipl.-Ing. **A. Liebsch**, Dr.-Ing. **R. Kupfer**,  
Prof. Dr.-Ing. habil. **M. Gude**,  
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik,  
Technische Universität Dresden;  
**P. Müller**, M.Sc., Dr.-Ing. **N. Andricevic**,  
Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach

### **Kurzfassung**

Die Kombination von geschlossenen Hohlprofilen aus Textil-Thermoplast-Verbundwerkstoffen mit Organoblechen und deren gemeinsame spritzgießtechnische Funktionalisierung bieten ein enormes Leichtbaupotential für hoch belastete Fahrzeugkomponenten. Eine wesentliche technologische Herausforderung liegt hierbei in den hohen Prozessdrücken beim Spritzgießen und der daraus resultierenden Beanspruchung der Hohlprofile. Um ein Kollabieren der Hohlprofile während der Füll- und Nachdruckphase zu vermeiden, müssen diese von innen durch fluide Stützmedien oder rieselfähige Partikel stabilisiert werden. Der vorliegende Beitrag stellt eine integrative Prozess-Struktur-Simulationsmethodik zur Vorhersage der bauweisen- und prozessbedingten Profildeformationen beim Spritzgießen vor.

### **1. Motivation**

Der weitere Ausbau der Elektromobilität bildet derzeit einen Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt im Fahrzeugbau. Ein wichtiger Baustein zum Ausbau der Elektromobilität kann dabei der konsequente Einsatz von Leichtbaustrukturen in den Fahrzeugen sein. Hierbei bieten hochintegrierte Bauweisen mit einer Kombination von torsions- und biegesteifen Hohlprofilen sowie flächigen Bauelementen eine besonders aussichtsreiche Möglichkeit zur Gewichtsreduktion. Die Substitution von metallischen Werkstoffen durch leichte Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) erlaubt hierbei zudem die gezielte kraftflussgerechte Verstärkung der einzelnen Bauelemente, wodurch weitere Gewichtseinsparungen ermöglicht werden.

Durch zusätzliche Funktionalisierung mit Spritzgießformmassen können hochkomplexe Rippenstrukturen, Lasteinleitungszonen und Funktionselemente integriert werden. Aktuell steht die Kombination von flächigen Verstärkungsstrukturen („Organoblechen“) und Spritzgießformmassen bereits kurz vor der Serienanwendung [1, 2]. Bei der Funktionalisierung von FKV-Hohlprofilen mit Spritzgießformmassen sind hingegen noch erhebliche konstruktiv-technologische Entwicklungsarbeiten zu leisten, um diese neue Bauweise zur Serienreife zu bringen [3, 4].

## 2. Funktionalisierte FKV-Hohlprofile als innovative Leichtbau-Hybrid-Bauweise

Ein technologisches Konzept zur Herstellung funktionalisierter Hohlprofile basiert auf einer Prozesskette zur Fertigung komplex geformter topologischer Hohlprofile (*ToHoP*-Prozess) [5]. Beim *ToHoP*-Prozess werden aus Thermoplast-Hybridgarnen mittels Flechten schlauchförmige Halbzeuge hergestellt und zu einer mehrlagigen Preform zusammengeführt (Bild 1). Diese textile Preform wird anschließend in ein Konsolidierungswerkzeug eingelegt, wobei die textile Architektur eine hohe Flexibilität hinsichtlich erreichbarer Biegeradien und Querschnittsgeometrien erlaubt. Die Konsolidierung der Preform erfolgt dann in einem variothermen Schlauchblasprozess mittels einer innen liegenden Pressmembran. Der Einsatz dünnwandiger Konsolidierungswerkzeuge ermöglicht hierbei eine effiziente Prozessführung und die Bauteilfertigung innerhalb kurzer Zykluszeiten.



Bild 1: Prozesskette zur Herstellung komplex geformter topologischer Hohlprofile und anschließender spritzgießtechnischer Funktionalisierung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes *e-generation* [6] erfolgte eine umfassende technologische Erweiterung dieser Pro-

zesskette (Bild 1). So wurde zum einen der Konsolidierungsprozess derart weiterentwickelt, dass eine Integration zusätzlicher metallischer Lasteinleitungselemente möglich wird. Im Sinne einer hohen Beanspruchbarkeit der Gesamtstruktur erfolgt dabei eine kombinierte form- und stoffschlüssige Anbindung der Lasteinleitungselemente an das textilverstärkte Hohlprofil. Zum anderen wurden die so hergestellten Hohlprofile in einem nachfolgenden Prozessschritt spritzgießtechnisch mit Langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) funktionalisiert, wobei die Anbindung zusätzlicher Strukturelemente wie Rippen oder Befestigungszoneen erfolgten. Als hochbeanspruchter Technologiedemonstrator wurde in Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden und der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG ein PKW-Batterieträger, welcher bisher als Stahl-Schweißbauteil hergestellt wird (Bild 2 a), in die neuartige *ToHoP*-Spritzguss-Hybridbauweise überführt (b). Hierfür erfolgten die faserverbundgerechte Konzeption des Batterieträgers sowie eine simulationsgestützte Auslegung der Tragstruktur. Ziel war neben einer deutlichen Massereduktion der Baugruppe bei gleichzeitiger Erfüllung aller Betriebslasten zusätzlich eine leichtere Montage der Batterie im Automobil.

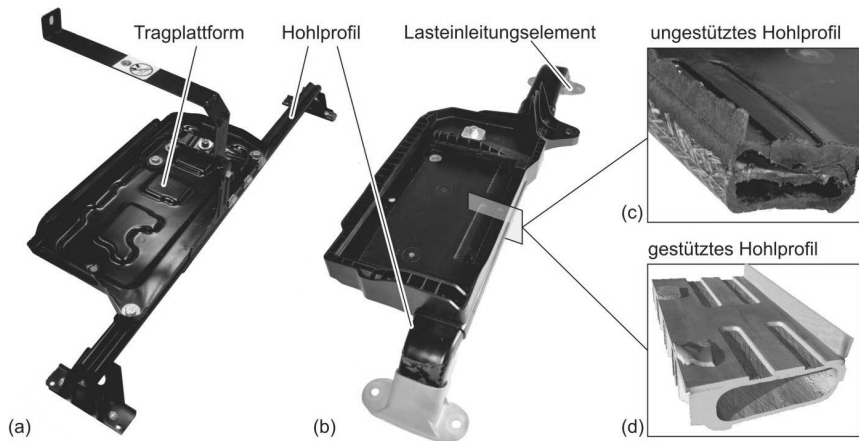
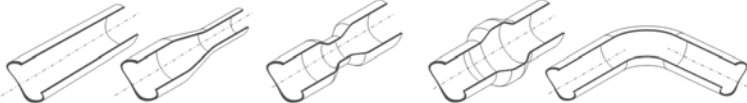


Bild 2: Batterieträger in Differentialbauweise aus Stahl (a) und in Integralbauweise als FKV-Spritzguss-Hybridstruktur (b), umspritztes Hohlprofil ohne Stützkern (c) und mit Stützkern (d)

Die Funktionalisierung von Hohlstrukturen im Spritzgießprozess erfordert im Gegensatz zum Hinterspritzen von flächigen Organoblechen den Einsatz von Stützsyste-men, welche das

Hohlprofil von innen stabilisieren, da selbst dickwandige Hohlprofile unter den hohen Spritzgießdrücken kollabieren können (Bild 2 c). Je nach geometrischer Komplexität des Hohlprofils bieten sich hierbei verschiedene Stützsysteme an. Während bei hinterschnittfreien und einfach hinterschnittigen Hohlprofilen feste Kernsysteme verwendet werden können, sind bei anwendungsnahen komplexen Geometrien alternative Stützsysteme notwendig (Tabelle 1). Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Abstützung mithilfe von Fluiden sowie mittels partikelbasierten Stützkernen erprobt, wobei die Stabilisierung durch Partikel ein reproduzierbares Umspritzen von prototypischen Hohlprofilen sowie eine erfolgreiche Demonstratorfertigung gewährleistete (Bild 2 d).

Tabelle 1: Übersicht möglicher Stützsysteme für unterschiedliche Hohlprofilgeometrien

Hinterschnitt	ohne	einfach	mehrfach
Skizze			
Kernsystem	fest, einteilig	fest, mehrteilig	schmelzbar, Partikel, Fluid

Um für die Demonstratorstruktur den Funktionsnachweis zu erbringen, dass eine sichere Befestigung der Batterie im Crashfall gewährleistet ist und somit die gesetzliche Anforderung UN ECE R94 [7] erfüllt wird, wurden hochdynamische Versuche auf einem Beschleunigungsschlitten durchgeführt. Diese Versuche bilden die Lastfälle Frontal-, Seiten-, und Heck-crash ab, wobei die Beschleunigungsverläufe aus Gesamtfahrzeugcrashversuchen abgeleitet werden. Der Frontalaufprall stellt dabei die auslegungsrelevante Belastungsrichtung dar, sowohl was den Beschleunigungsverlauf als auch die Deformationskinematik des Batterie-trägers betrifft. Da bei diesem Versuchsaufbau die Nachgiebigkeit der Fahrzeugkarosserie nicht abgebildet wird, ergibt sich gegenüber dem Gesamtfahrzeugcrash stets eine erhöhte Beanspruchung der Baugruppe. Durch das erfolgreiche Bestehen dieser Versuche kann so-mit von einer sicheren Auslegung des Bauteils gesprochen werden.

In Bild 3 ist der FKV-Batterieträger im Schlittenversuch zur Abbildung des Frontalaufpralls zu den Zeitschritten  $t_1 = 0\text{ ms}$  (a) und  $t_2 = 40\text{ ms}$  (b) dargestellt. Das abgebildete blaue Fang-band hat keine Haltewirkung auf die Batterie, sondern dient lediglich als zusätzliche Sicher-heitsmaßnahme. Im Rahmen der durchgeführten Sicherheitsversuche konnte für alle Belas-tungsrichtungen nachgewiesen werden, dass die Anforderungen an die Befestigung der Bat-

terie sicher erfüllt werden. Hierbei erfolgte keine makroskopische Schädigung der Tragstruktur, wodurch die Eignung des hier entwickelten Batterieträgers und damit der entwickelten neuartigen *ToHoP*-Spritzguss-Hybridbauweise für den Einsatz in hochbelasteten Strukturen grundsätzlich nachgewiesen werden konnte.

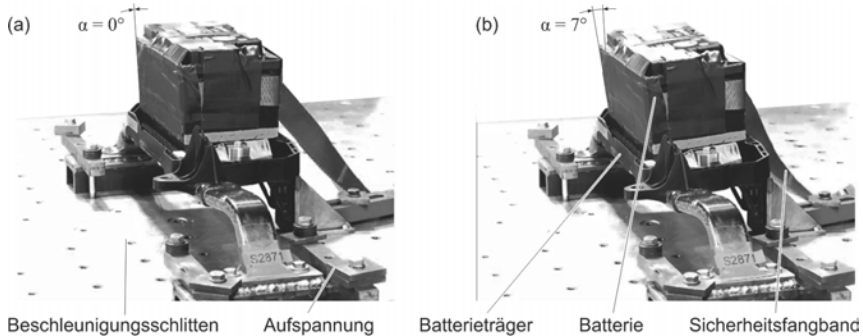


Bild 3: Deformation des Batterieträgers mit montierter Batterie im Beschleunigungsversuch zum Zeitpunkt  $t_1 = 0 \text{ ms}$  (a) und  $t_2 = 40 \text{ ms}$  (b)

### 3. Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Umspritzen von Hohlprofilen

Die Vertiefung und Erweiterung der Prozesskette zur Herstellung funktionalisierter Hohlprofile erfolgt aktuell im Rahmen des vom BMBF geförderten *FuPro*-Projektes der *FOREL*-Plattform [8]. Ziel ist es hierbei, die bisher getrennten Teilprozesse der Herstellung von textilen Halbzeugen, der Konsolidierung und der spritzgießtechnischen Funktionalisierung zu verknüpfen, um so eine großserienfähige automatisierte Herstellung von funktionalisierten Hohlprofilen zu ermöglichen. Darüber hinaus sind auch Organobleche als flächige Verstärkungsstrukturen im Sinne eines Halbzeug-Baukastensystems in die Bauteilkonzeption und Prozessgestaltung mit aufzunehmen.

Eine der zentralen Herausforderungen innerhalb der Prozesskette stellt die spritzgießtechnische Funktionalisierung der FKV-Hohlprofile im Großserienmaßstab dar. Die Umsetzung dieser Technologie erfolgte bisher lediglich auf Prototypenniveau. Eine systematische Untersuchung der auf das Hohlprofil wirkenden Belastungen beim Spritzgießen sowie die Analyse der daraus resultierenden Phänomene bei Verwendung verschiedener Stützsysteme sind für eine gezielte Prozessgestaltung jedoch zwingend erforderlich. Hierfür bietet sich eine integrative Prozess-Struktur-Simulation gemäß Bild 4 an. Dabei werden die während des Spritzgießprozesses auf das Hohlprofil einwirkenden transienten Belastungsprofile mittels einer Formfüllsimulation erfasst. Diese Belastungsprofile lassen sich dann in eine Struktursimulati-

on übertragen, welche neben dem anisotropen Werkstoffverhalten des FKV-Hohlprofils auch dessen strukturelle Interaktion mit dem Stützmedium abbilden muss.

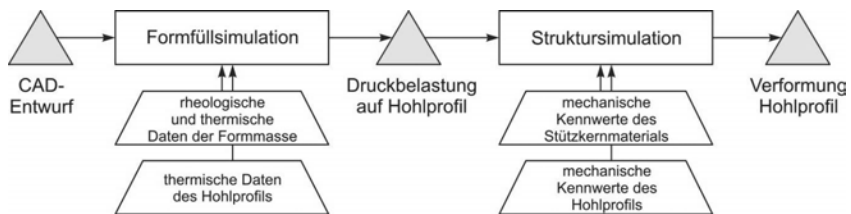


Bild 4: Simulationssystematik zur virtuellen Analyse des Hohlprofilumspritzens

Die Machbarkeit dieser Simulationsmethodik wird am Beispiel einer generischen Demonstratorstruktur („Dresdner Rakete“) aufgezeigt. Hierfür wird ein querschnittsvariables Hohlprofil aus Glasfaser-Polyamid 6-Hybridgarn (PHP FIBERS) mit einem Faservolumengehalt von 50 % im *ToHoP*-Prozess gefertigt (Bild 5). Die Funktionalisierung erfolgt in einem prototypischen Spritzgießwerkzeug, welches neben lokalen Rippen auch großflächige Bandagen sowie Lasteinleitungszonen in Form von Schraubdomen, Flanschen und Lagersitzen abbildet. Als Spritzgießwerkstoff kommt ein unverstärktes Polyamid 6/66-Blend zum Einsatz (EMS GRIVORY GRILON TSS).

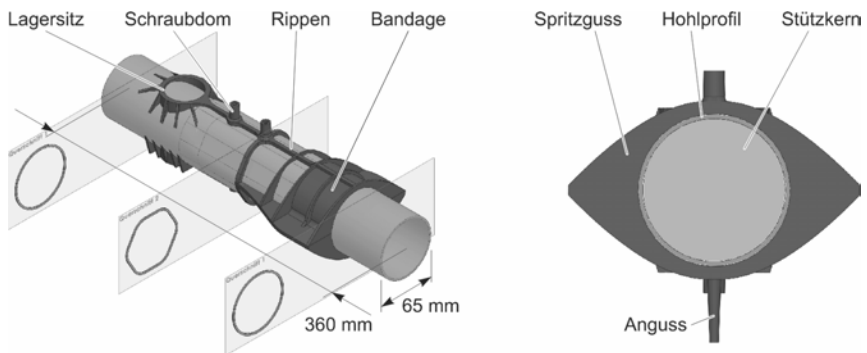


Bild 5: CAD-Entwurf der generischen Demonstratorstruktur „Dresdner Rakete“

Die numerischen Formfüllsimulationen erfolgen mittels AUTODESK MOLDFLOW [9]. Neben der Spritzgießkavität werden hierbei zusätzlich das Hohlprofil sowie das Stützmedium als zwei koaxiale Einleger modelliert. Für das Hohlprofil werden die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit bestimmt (Bild 6) und als werkstoffphysikalische Kenndaten des äußeren Einlegers hinterlegt.

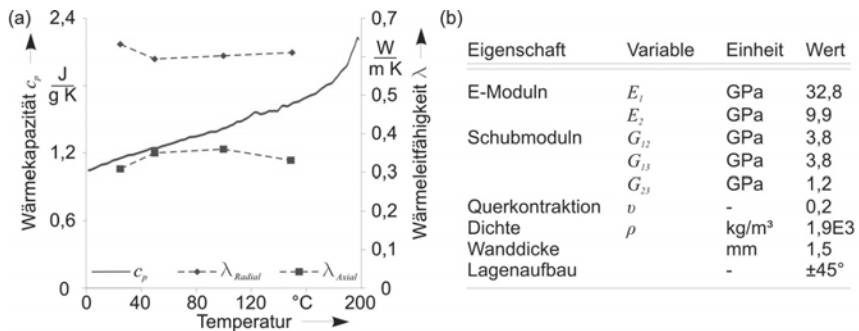


Bild 6: Werkstoffphysikalische Kennwerte des Hohlprofils: Spezifische Wärmekapazität aus DSC-Messungen und Wärmeleitfähigkeit aus Hotdisk-Messungen (a) [10], mechanische Kennwerte des Hohlprofils (b)

Die höchsten Beanspruchungen des Hohlprofils sind gegen Ende der nur wenige Sekunden andauernden Füllphase zu erwarten. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Hohlprofils wird davon ausgegangen, dass in dieser kurzen Zeit keine signifikanten Wärmeströme in den Stützkern stattfinden. Die werkstoffphysikalischen Kennwerte des in der Füllsimulation als starrer innerer Einleger modellierten Stützmediums werden daher vorerst vernachlässigt. Die rheologischen Eigenschaften der Spritzgießformmasse werden der programminternen Datenbank entnommen.

Auf Basis dieses Simulationsmodells wurden Sensitivitätsanalysen zum Einfluss einzelner Modellierungs- und Prozessparameter auf die transiente Druckbelastung des Hohlprofils durchgeführt (Bild 7 b). Das sich aus der Formfüllsimulation ergebende Druckprofil lässt sich anschließend knotenweise exportieren und für die Struktursimulation aufbereiten. Hierfür wurde in der Simulationsumgebung ABAQUS [11] ein Basismodell für das Hohlprofil und die Kontaktfläche der Werkzeugkavität aufgebaut (Bild 7 a). Das Hohlprofil wird dabei durch Schalenelemente (S4R) diskretisiert. Vereinfachend wird das Geflecht als bidirektionales UD-Laminat mit den in Bild 6 (b) zusammengefassten Werkstoff- und Strukturkenndaten modelliert. Die Abbildung der Werkzeug-Kontaktfläche (in Bild 7 grau) erfolgt durch ideal starre Elemente (R3D4). Die in Bild 7 dargestellten Grund- und Schließflächen dienen neben den Schalenelementen der Profilstruktur als Kontaktfläche für die innenliegenden Stützmedien und wurden ebenfalls mit R3D4-Elementen modelliert. Als Stützmedien wurden zum einen ein Partikelkern und zum anderen ein Fluidkern gewählt. Bei der Partikelfüllung wird die Schließfläche erst im Anschluss an eine erste Kompaktierungsphase der Partikel definiert.

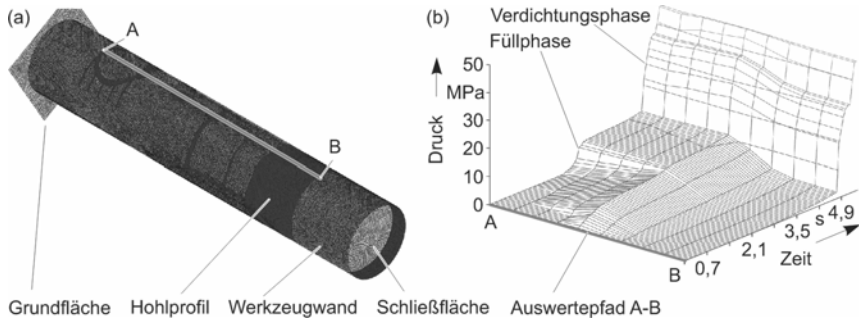


Bild 7: Basis-Strukturmodell zur Untersuchung der Interaktion zwischen Hohlprofil und Stützmedium (a) sowie das transiente Belastungsprofil entlang des Auswertepfads A-B (b)

Für die Modellierung des Partikelkerns wurde die *discrete element method* (DEM) [12] gewählt. Dabei werden die Partikel einzeln als ideal starre sphärische Einknoten-Elemente modelliert. Die Nachgiebigkeit der Partikelfüllung wird über Kontaktmodelle abgebildet. Für das hier vorgestellte Modell wurde ein Hertz'scher Kontakt verwendet [11]. Die Partikel besitzen einen einheitlichen Durchmesser von 3 mm. Als Material wurde in Anlehnung an eine grobkörnige Kiesschüttung Siliziumdioxid (Quarz) angenommen. Die Werkstoffkennwerte wurden [11] und [13] entnommen.

Bild 8 a zeigt die Situation zum Zeitpunkt des Auftreffens der Schmelze auf das Hohlprofil. Aufgrund der hohen lokalen Belastung werden die Partikel vom Anschnitt ausgehend radial in Richtung des Kerninneren verschoben. Der Betrag der Verschiebung nimmt dabei mit zunehmendem Abstand ab. Ebenfalls kann beobachtet werden, dass die Partikel nicht bloß translatorisch sondern auch rotatorisch bewegt werden. Hierbei bewirkt die zwischen den Partikeln induzierte Reibung eine sukzessive Lastverteilung in den Partikelkern, welcher dadurch ein festkörperähnliches Tragverhalten aufweist. Die Deformation des Hohlprofils entlang des Auswertepfads A-B verdeutlicht die lokale Wirkung des Stützeffektes (Bild 8 b).

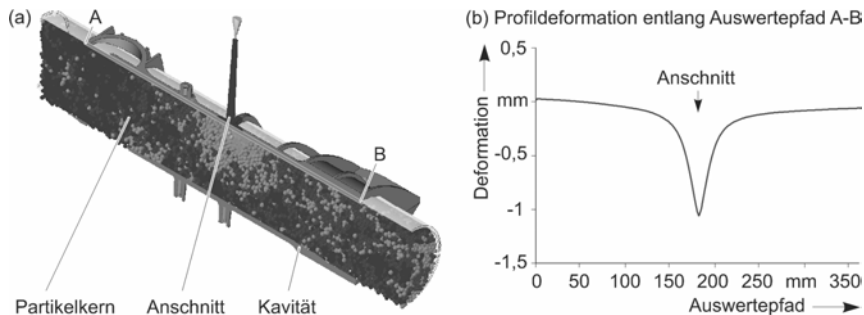
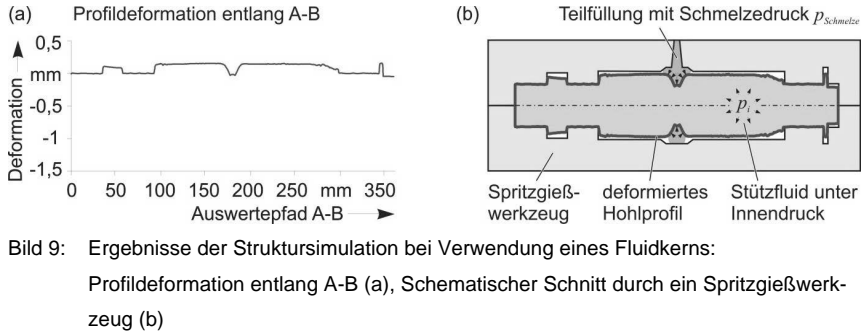


Bild 8: Simulationsergebnisse bei Verwendung eines Partikelkerns: Partikelbewegung infolge angussnahem Spritzgießdruck (a, überlagerte Darstellung der Ergebnisse aus Formfüll- und Struktursimulation), Profildeformation entlang des Auswertepfades A-B (b)

Die Modellierung des Fluidkerns erfolgte mit der zur Simulation des Strukturverhaltens von Flüssigkeiten etablierten Methode der *smoothed particle hydrodynamics* (SPH) [11, 15, 16]. Als Fluid wurde Wasser angenommen, welches drucklos im Hohlprofil vorliegt. Die notwendigen Materialkennwerte wurden [11] entnommen.

Bild 9 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnungen, wobei deutlich wird, dass das Fluid eine grundlegend verschiedene Charakteristik im Stützverhalten zeigt (Bild 9 a). Der auf die Oberfläche des Hohlprofils wirkende Spritzdruck führt analog zum Partikelkern aufgrund der Nachgiebigkeit der Profilwand zu lokalen Verformungen nach innen, welche auf das Fluid übertragen werden. Das mittels Abdeckungen abgeschlossene Hohlprofil wirkt dabei wie ein Druckbehälter. Aufgrund der Reibungsfreiheit und Inkompressibilität des Wassers wird der extern wirkende Spritzgießdruck in einen Innendruck im Hohlprofil umgewandelt. In den Bereichen, in denen das Hohlprofil nicht durch die außen anliegende Werkzeugwand oder bereits eingespritzte Kunststoffformmasse gestützt wird kommt es daher zur Deformation der Profilwand in die freien Werkzeugkavitäten. Je nach Höhe des Spritzgießdruckes und der Kontur der Kavität kann dies zur fehlerhaften Formfüllung aber auch zur lokalen Schädigung des Hohlprofils führen.



#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Eine lastpfadgerechte Aufteilung von hochbelasteten Strukturen in flächige Schubfelder, biege- und torsionssteife Hohlprofile sowie Knotenstrukturen bietet ein hohes Leichtbaupotential. Durch den Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden können aufgrund der hohen Anisotropie der Werkstoffe derartige Strukturen gezielt verstärkt und somit der Leichtbaugrad erheblich gesteigert werden. Zu diesem Zweck wurden in der Vergangenheit verstärkt Forschungsaktivitäten durchgeführt, die eine Kombination von schubsteifen Organoblechen und LFT-Knotenstrukturen untersucht und bis zur Serienreife gebracht haben. Die Erweiterung dieses Baukastensystems um FKV-Hohlprofile bedarf jedoch noch erheblicher Entwicklungsaktivitäten. In dem vom BMBF geförderten Projekt *e-generation* wurde diese Bauweise erstmals in eine hochbelastete Fahrzeugstruktur überführt. Es konnte dabei das hohe Leichtbaupotential der Bauweise nachgewiesen werden.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird seit 2015 im Projekt *FuPro* eine Prozesskette zur Kombination aus Organoblechen, Hohlprofilen und LFT-Knotenstrukturen zu komplexen *FuPro*-Strukturen entwickelt (Bild 10). Im Rahmen des Projektes wurden Simulationsstrategien evaluiert, die es ermöglichen das Umspritzen von Hohlprofilen detailliert zu untersuchen. Dabei werden die auf das Hohlprofil einwirkenden Drücke mit Hilfe von Formfüllsimulationen erfasst und in eine nachgeschaltete Struktursimulation übertragen. Mithilfe der Modellierungsansätze der *discrete element method* und der *smoothed particle hydrodynamics* konnten die in partikelbasierten und fluiden Stützkernen auftretenden Phänomene dargestellt werden. In weiterführenden Untersuchungen können nun die Auswirkungen der Kerneigenschaften auf das Stützverhalten detailliert untersucht werden. Darüber hinaus bilden die Ergebnisse die Basis zur Analyse der Interaktion von Hohlprofilen, Spritzgießformmassen und flächigen Organoblechen in integralen Fertigungsprozessketten.

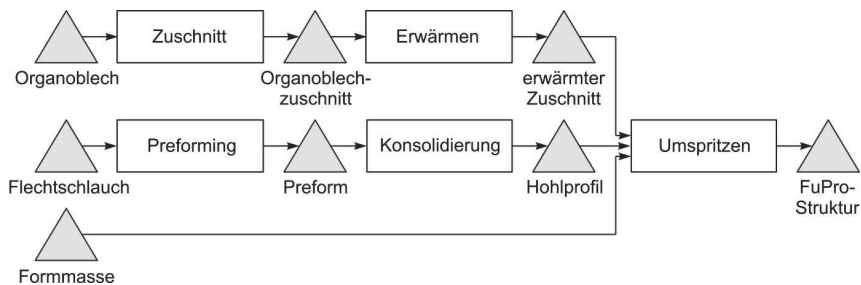


Bild 10: Prozesskette zur Herstellung von *FuPro*-Strukturen

## Danksagung

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 16N11872 und 02P14Z000 – 02P14Z010 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Literatur

- [1] Institut für Verbundwerkstoffe: Kombination von Thermoplast-Spritzguss und Thermoformen kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste für Crashelemente (SpriForm), Abschlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt (Förderzeitraum 01.11.2007 – 31.03.2011), Karlsruhe, 2011.
- [2] KraussMaffei Technologies GmbH: FiberForm-Leichtbauteile, Thermoformen und Spritzgießen perfekt kombiniert, München, 2013.
- [3] Liebsch, A.; Andricevic, N.; Maaß, J.; Geuther, M.; Adam, F.; Hufenbach, W.; Gude, M.; Batterieträger in Hybridbauweise – Kombination aus thermoplastischem Faserverbund und Aluminium ersetzt Stahlbauweise, *Kunststoffe*, No. 9, 2015, S. 126-129
- [4] Andricevic, N.: Innovativer Leichtbau bei Porsche – Batterieträger in Faserkunststoffverbund-Bauweise im Forschungsprojekt e-generation, 19. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, Dresden, 19.-20.06.2015
- [5] Hufenbach, W.; Adam, F.; Krah, M.; Geller, S.: Ganzheitliche Lösungsstrategien bei der Entwicklung von Faserverbundkomponenten für automobiler Leichtbauanwendungen. AutoMetForm 2010, Freiberg, 24.11.2010, S. 58-69.
- [6] Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik: Schlüsseltechnologien für die nächste Generation der Elektrofahrzeuge (e-generation), Abschlussbericht zum BMBF Verbundprojekt (Förderzeitraum 01.01.2012 - 31.12.2014), Dresden, 2014.

- [7] UN ECE R94: Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to the Protection of the Occupants in the Event of a Frontal Collision, United Nations Economic Commission for Europe, Genf, 2013.
- [8] FOREL – Forschungs- und Technologiezentrum für ressourceneffiziente Leichtbaustrukturen der Elektromobilität, Technologieprojekt *FuPro*. <http://plattform-forel.de/fupro/>, 09.12.2016.
- [9] Autodesk, *Autodesk simulation moldflow Insight 2014*, San Rafael, California, 2014.
- [10] DIN EN ISO 22007-2, Kunststoffe – Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit – Teil 2: Transientes Flächenquellenverfahren (Hot-Disk-Verfahren), Berlin, 2012.
- [11] Dassault Systèmes, *Abaqus 6.13 Analysis User's Guide*, Providence, Rhode Island, 2013.
- [12] Cundall, P. A. and Starck, O.D.: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, 1979, S. 47-65.
- [13] Zhou, Y.C., Xu, B.H., Zou, R.P., Yu A.B. and Zulli, P.: Stress distribution in a sandpile formed on a deflected base, *Advanced Powder Technology*, Vol. 14, No. 4, 2003, S. 401-410.
- [14] Price, J. F.: Lagrangian and Eulerian Representations of Fluid Flow: Kinematics and the Equations of Motion, Woods Hole, Massachusetts, 2006.
- [15] Jakob C., Konietzky, H.: Partikelmethoden – eine Übersicht, *Technische Universität Bergakademie Freiberg*, Freiberg, 2012.
- [16] Höfler, C.: Entwicklung eines Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Codes zur numerischen Vorhersage des Primärzerfalls an Brennstoffeinspritzdüsen, Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology, 2013.

# Use Case FVK im Materials Data Space, Digitalisierung der Materialkompetenz als Komplementär zur Industrie 4.0

Dr.-Ing. **R. Schlimper**, Dr.-Ing. **M. Zscheyge**,  
Prof. Dr.-Ing. **P. Michel**, Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von  
Werkstoffen und Systemen IMWS, Halle (Saale)

## Kurzfassung

Der Materials Data Space stellt unternehmensübergreifend digitale Daten zu Materialien und Werkstoffen entlang der gesamten Wertschöpfungskette bereit. Durch die Vernetzung werden kürzere Entwicklungszeiten, lernende Fertigungsverfahren und neue Geschäftsmodelle möglich, zudem ergeben sich enorme Potenziale für Materialeffizienz, Produktionseffizienz und Recycling. Neue Werkstoffe sind der entscheidende Treiber bei der Entwicklung innovativer Produkte im verarbeitenden Gewerbe. Schätzungen zufolge basieren heute bis zu 70 Prozent aller neuen Erzeugnisse auf neuen Werkstoffen. Für Industrie 4.0, die enge Verzahnung der Produktion mit der modernen Informations- und Kommunikationstechnik, wird die Bedeutung der Werkstoffe noch steigen. Sie sollen maßgeschneiderte Produkte nach individuellen Kundenwünschen möglich machen, die on demand, adaptiv, multifunktional oder by design hergestellt werden können – kostengünstig, mit hoher Qualität und bei kurzen Innovationszyklen. Der Materials Data Space wurde als Grundlage für die Werkstoffentwicklung, -herstellung und -verarbeitung innerhalb von Industrie 4.0 entwickelt. So wie Material und Werkstoffe den substanziellen Träger für die Werkstücke und Bauteile liefern, ist der Materials Data Space das digitale Abbild davon. Er stellt digitalisiert alle relevanten Informationen zu Materialien und Werkstoffen in einer leistungsfähigen und unternehmensübergreifenden digitalen Infrastruktur über den gesamten Lebensdauerzyklus zur Verfügung. Leichtbaustrukturen aus Faserverbundkunststoffen (FVK), halten aus Gründen der Ressourceneffizienz zunehmend Einzug in die Produktion von Fahrzeugen, Maschinen und Anlagen. Damit einhergehend ist an einigen Stellen der Technologiesprung von der manuellen FVK-Fertigung zu einer teil- bzw. vollautomatisierten Fertigung kleiner bis mittlerer Stückzahlen bereits vollzogen worden. Um den nächsten Schritt in Richtung großindustrieller Fertigung realisieren zu können, müssen die entsprechenden FVK-Technologien Industrie 4.0-fähig gemacht werden. Die bislang ungelöste Kernproblematik dabei ist die durchgängige Erfassung, Struktu-

rierung und Interpretation von Material-, Prozess- und Bauteildaten entlang des gesamten Produktlebenszyklus von der Produktentstehungs- bis in die Nutzungsphase. Stand dieser Entwicklung und die in nächster Zukunft zu bewältigenden Herausforderungen insbesondere für die Materialklasse Faserverbundkunststoffe werden in dem Vortrag dargestellt. Dabei wird besonderer Fokus auf die Bedürfnisse der Automobilindustrie gelegt. Die Datenplattform, die neben der Softwarekomponente auch Hardwareaspekte standardisieren muss, kann gegliedert werden in die Teilschritte:

1. Integrierte Erfassung von Material-, Prozess- und Bauteildaten
2. Fusion und Strukturierung der Messdaten zur standardisierten Weiterverarbeitung und...
3. deren computergestützte Interpretation mit Hilfe materialwissenschaftlicher Modelle

Für großserientechnisch hergestellte FVK-Leichtbaustrukturen müssen diese Größen skalen- und lebenszyklusübergreifend durchgängig abgebildet und dem Industrial Data Space von Industrie 4.0 in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden.

# Two-component air-guide panel manufactured by co-molding and foaming using core-back technology

Dr.-Ing. **A. Roch, A. Menrath,**

Fraunhofer Institute for Chemical Technology ICT, Pfinztal;

**B. Schmid,**

BBP Kunststoffwerk Marbach Baier GmbH, Marbach am Neckar

## Abstract

Using the example of an air guide panel for the next generation of BMW 7 series the lightweight potential of foam injection molding in combination with core-back technology of the mold is highlighted. The part is a co-molded, hard-soft combination consisting of two different materials: a polypropylene as the hard and a thermoplastic elastomer as the soft component. First the hard component is gas-laden inside the injection molding barrel and then injected into the cavity. After a short delay time, specific areas of the cavity are opened by core-back technology. Due to this a pressure drop occurs making the material expand in opening direction (→ breathing mold technology). The hard component is subsequently transferred into a second cavity and co-molded with the rubber material along the edge in a single process using only one injection mold. This presentation is introducing the manufacturing process and is focusing on the material savings that can be achieved by the core-back expansion technology which in this case was 20 %.



# High-Performance Polypropylene – hat PA 6 noch eine Zukunft?

Dipl.-Ing. **H. Häberle**, MAN Truck & Bus AG, München

## Kurzfassung

Leichtbau sollte nach Möglichkeit kostenneutral hinsichtlich Bauteilkosten und Invest sein. Besser noch, es wird günstiger, damit im Falle einer Umsetzung in der laufenden Serie zusätzliche Projektkosten ausgeglichen werden können.

Diese Voraussetzungen erfüllen die High-Performance Polypropylene (HP-PPs) in besonderer Weise, da bei einem 1:1-Tausch gegen das entsprechende Polyamid oder Polyester-Blend das Bauteilgewicht um ca. 15% sinkt. Die damit einhergehende Materialkostenreduktion aufgrund der geringeren Dichte wird durch einen in der Regel geringeren Kilopreis noch etwas aufgerundet. Die Erfahrungen zeigen, dass der Volumenpreis die entscheidende Reduktionsgröße ist.

Aber nicht nur die Gewichts- und Kosteneffizienz sprechen für die HP-PPs auch die geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen in allen Prozessschritten haben uns veranlasst, die Ablösung von PA6 anzugehen und weiter voranzutreiben.

## 1. Einleitung

Leichtbau ist nicht nur für bewegte Massen ein äußerst wichtiges Thema, um Anforderungen wie Energieeffizienz oder schnelle und präzise Bewegungen möglichst perfekt erfüllen zu können. Auch für unbewegte Massen bedeutet Leichtbau u. a. einen geringeren Ressourcenverbrauch für die eigene Herstellung und einen geringeren Ressourcengebrauch um von A nach B transportiert zu werden.

Beim Lkw schließt sich dieser Kreis, einerseits hat er leichter an sich zu tragen, andererseits leichter zu tragen; beides zusammen genommen ist die Effizienz, die ein CO<sub>2</sub>-optimiertes Transportwesen benötigt.

Unter werkstofflichem Leichtbau versteht man heute oft den Ersatz von Metallen durch entsprechend geeignete Kunststoffe, da man hier – sofern der Kunststoff alle Bauteilanforderungen erfüllt – durch den großen Dichteunterschied auch entsprechende Massereduktionen erreicht. Hier spricht man dann von den sogenannten Metallersatzkunststoffen.

Mittlerweile ist diesen Metallersatzkunststoffen – in der Regel sind damit die Polyamide gemeint – mit den sogenannten High-Performance Polypropylenen ein ernsthafter Wettbewerb

ber entstanden. Werden Polyamide durch HP-PPs ersetzt, werden bei einer 1:1-Umstellung generell ca. 15% Masse eingespart. Entsprechend reduzieren sich auch die Materialeinsatzkosten. Die HP-PPs rennen also offene Türen ein. Die Umsetzung im großen Stil ist angesichts dieser Vorteile nur noch eine Frage der Zeit.

Aus den vorgenannten Gründen – CO<sub>2</sub>-Effizienz, Gewichts- und Kosteneffizienz – beschäftigen wir uns seit 2013 intensiv mit diesem Thema und können mittlerweile Umstellungserfolge vorweisen; mussten aber auch Rückschläge einstecken. Aus diesen Erkenntnissen haben wir gelernt, was bei Neuentwicklungen zu beachten ist, um das Potential der HP-PPs zu nutzen.

## 2. Eigenschaftsvergleich HP-PPs versus PA-GF60

Die Bauteile, die wir bei den aktuellen Stoßfängern der Euro 6-Baureihe ersetzen wollten und in den Folgekapiteln beschrieben sind, sind heute noch aus PA-GF60 oder PBT/PET-GF45 hergestellt. Die High-Performance PPs mussten sich also dem Benchmark PA-GF60 stellen – das PBT/PET-GF45 wird nur im Scheinwerferträger Stahlstoßfänger TGS/X eingesetzt und lief deshalb „im Windschatten mit“, wurde aber nicht näher betrachtet.

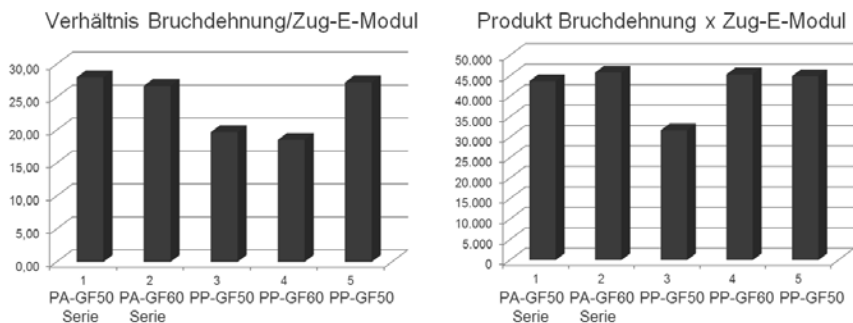


Bild 1: Performance-Vergleich HP-PP versus PA [1]

Im frühen Projektstadium wurden neben den drei HP-PPs auch das PA-GF50, das in der Verstärkung Trittplatte des Stahlstoßfängers TGL/M eingesetzt wird, mit dem Benchmark PA6-GF60 verglichen. Dieser Vergleich wurde auf der Basis „Bruchdehnung-Zug-E-Modul“ angestellt, Bild 1.

Im folgenden Projektablauf wurden dann noch weitere PPs in den Vergleich eingebunden, Bild 2. U. a. auch drei PP-CF-Typen mit 20, 30 und 40% Carbonfaseranteil (12, 13, 14). Auffallend bei diesen Carbonfaser-PPs ist die hohe Steifigkeit, auch die dichtebezogene Zugfes-

tigkeit liegt zum Teil noch über dem Benchmark PA6-GF60 konditioniert. Bezieht man aber die Bruchdehnung in die Betrachtung mit ein, dreht sich das Bild dramatisch.

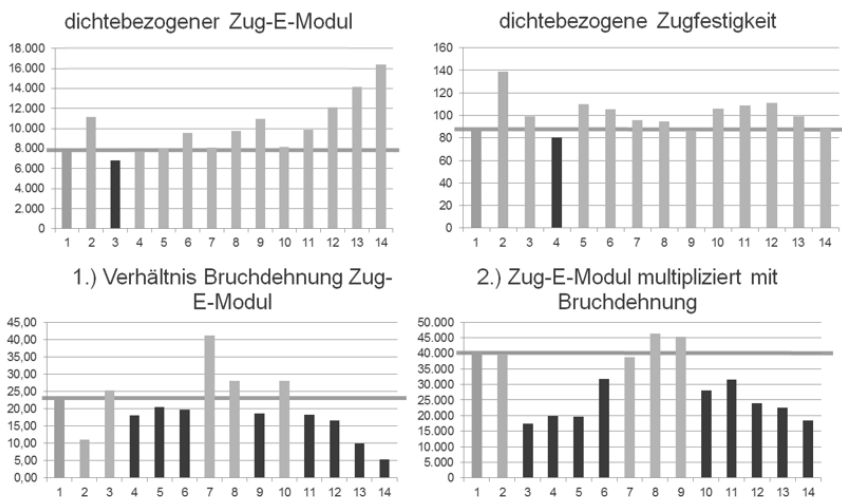


Bild 2: Zahlenspielerien [2]

Diese Zahlenspiele zeigen eindrucksvoll, dass der Vergleich isolierter Materialkennwerte in die Irre führen kann und nicht aussagekräftig ist. Nach meiner Erfahrung ist bei unseren hohen dynamischen Anforderungen im Bereich der Rahmenanbauteile, zu denen der Stoßfänger zählt, eine gute Balance zwischen Steifigkeit und Elastizität (Bruchdehnung) wichtig, damit der Kunststoff durch die hohe Dynamik nicht „innerlich zerrüttet“ wird.

Als Ersatz für das PA6-GF60 haben wir gemeinsam mit unseren Lieferanten verschiedene HP-PPs mit unterschiedlichen Glasfasergehalten untersucht und bewertet. Infrage kamen PP-Typen mit 50% und 60% Glasfasergehalt. Die Lieferanten haben sich aufgrund der besseren Fließfähigkeit, also besserer Verarbeitbarkeit und höherer Prozesssicherheit, für die Rialene-Typen SGF50 und SGF60 entschieden. Mit beiden HP-PPs wurden beim Kunststoffstoßfänger TGL/M die Betriebsfestigkeitsuntersuchen – statisch wie auch dynamisch – durchgeführt. Ebenso wurde die Umweltqualifikation nach unserer internen Norm durchlaufen. Diese umfasst einen Hitze- und Kältestest, einen statischen Klimatest und den bekannten Klimawechseltest der Automobilindustrie.

### 3. Strukturbauteile im Kunststoffstoßfänger TGL/M

Dieser Stoßfänger, der in Bild 3 dargestellt ist, wurde als erster unserer vier Stoßfängertypen auf dem Betriebsfestigkeitsprüfstand getestet. Bei diesem Stoßfänger wollten wir beide PP-SGFs auf Herz und Nieren prüfen, um dann einen der beiden für die weiteren Stoßfänger festzulegen. Dieser Stoßfänger wurde deshalb als Referenz festgelegt, da er bzgl. der dynamischen Anforderungen mit den anderen Stoßfänger vergleichbar ist, aber mit insgesamt 14 Kilogramm Schussgewicht die größte PA-GF60-Masse auf die Waage bringt.

Der dreiteilige Stoßfänger besteht aus: Scheinwerferbereich links und rechts, Mittelteil mit Auftritt. Bei diesen drei Baugruppen werden die Blenden aus dem unverstärkten Thermoplasten PET/PC auf den entsprechenden Trägerbauteilen befestigt. Diese tragenden Kunststoffbauteile werden aus PA6-GF60 hergestellt und auf die Alu-Druckgusshalter geschraubt. Diese wiederum sind am stählernen Frontquerträger befestigt.

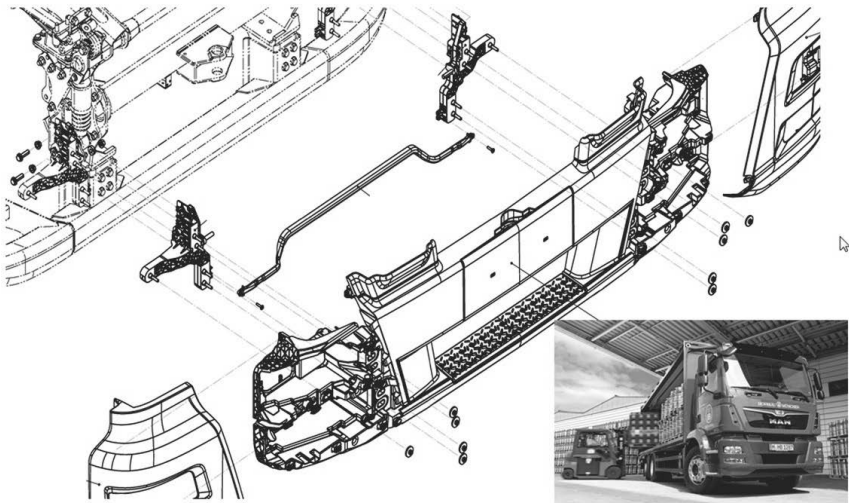


Bild 3: Dreiteiliger Kunststoffstoßfänger TGL/M [3]

Während beide HP-PPs die Umweltqualifikation erfolgreich absolvierten, war ihnen bei der Rüttlerprobung und dem statischen Aufstiegstest kein Erfolg beschieden: Bei den Scheinwerferträgern war der Verschleiß an den Befestigungsnasen zu groß und beim Träger Mittelteil hat der Untergurt die geforderte Auftrittslast von 6kN nicht erreicht.

Der statische Aufstiegstest simuliert die Last, die beim Aufstieg des Fahrers zum Reinigen der Frontscheibe auf den Aufstieg wirken kann.

Hierzu ist zu erwähnen, dass die Bauteile, da auf Polyamid abgestimmt, in einigen wichtigen Details nicht PP-gerecht ausgelegt sind. Aufgrund der geringen Stückzahl hätte sich aber eine entsprechende Werkzeugänderung nicht gerechnet.

Nach Abschluss aller Erprobungen und Auswertung der Ergebnisse haben wir uns auf PP-SGF50 festgelegt und PP-SGF60 nicht weiterverfolgt.

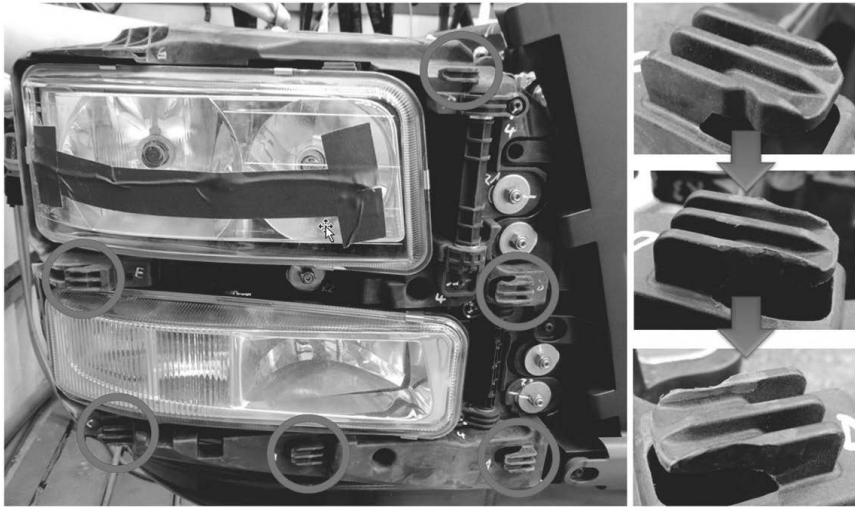


Bild 4: Verschleiß der Befestigungsnasen

### 3.1 Scheinwerferträger

Aufgrund der hohen dynamischen Lasten mit Anregungen bis zu 15g Beschleunigung in allen drei Raumrichtungen kann schon bei einem sehr geringen Spiel zwischen den Bauteilen der Effekt eintreten, dass sich die Partner gegenseitig aufreiben, was zum Versagen der Bauteile führen kann. Der Verschleiß an den Befestigungsnasen war hier bei SGF50 und SGF60 so groß, dass aufgrund des immer größer werdenden Spiels zwischen Seitenblenden und Scheinwerferträger die Seitenblenden gebrochen sind. Das kleine Bild oben rechts in Bild 4 zeigt eine Befestigungsnause zu Erprobungsstart, die beiden unteren zum Abbruch des Tests. Ein geringer Verschleiß ist auch bei PA6-GF60 festzustellen, dieser ist aber unproblematisch.

Dieses Ergebnis zeigt, dass Baugruppen so ausgelegt werden müssen, dass die Bauteile gegeneinander spielfrei eingebaut werden können.

### 3.2 Träger Mittelteil

Bei diesem Bauteil ist die härteste Anforderung die Auftrittslast von 6 kN, Bild 5. Die PPs erreichten hier nur 4 und 4,2 kN, was deutlich unter den geforderten 6 kN liegt – aber noch größer ist der Unterschied zum Benchmark PA6-GF60: Hier wurde der doppelte Wert von PP erreicht. Die Polypropylene müssten also mit etwas mehr Materialeinsatz und optimierter Geometrie dagegenhalten – bei einem Dichtevorteil von 15% (SGF60) und 23% (SGF50) sollte dies aber ohne allzu großen Verlust an Leichtbaupotential machbar sein.

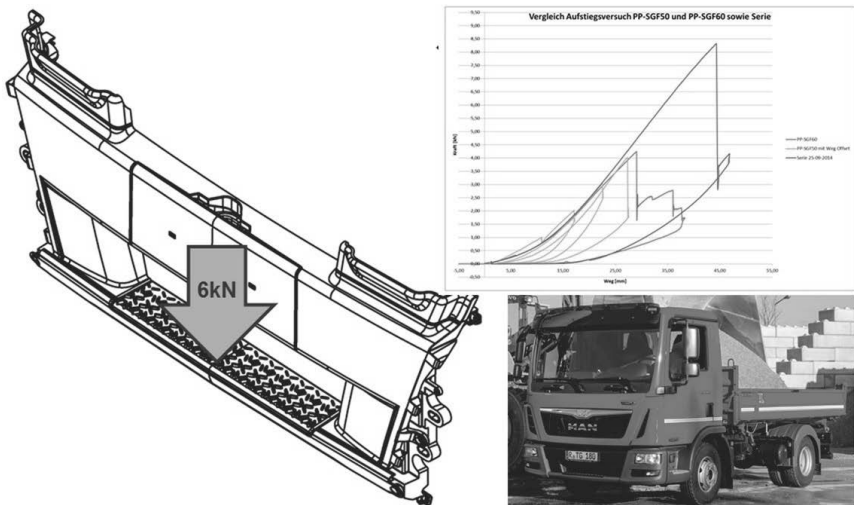


Bild 5: Bruchlasten von PP-SGF50, PP-SGF60 und PA6-GF60

### 4. Verstärkung Trittplatte Stahlstoßfänger TGL/M

Beim kleinen Stahlstoßfänger wurde die Verstärkung Trittplatte von PA6-GF50 auf PP-SGF50 umgestellt. Die Verstärkung, die in Bild 6 rechts zu sehen ist, trägt die Trittplatte aus PET/PC. Um einen sicheren Auftritt für den Fahrer zu gewährleisten ist die Trittplatte mit Antirutschnoppen versehen. In den beiden Schnittdarstellungen am unteren Bildrand ist zu sehen, wie die Verstärkung in den Untergurt des Stahlstoßfängers eingebunden ist. Die Umstellung wurde erfolgreich umgesetzt. Die Auftrittslast von 6kN klaglos ertragen.

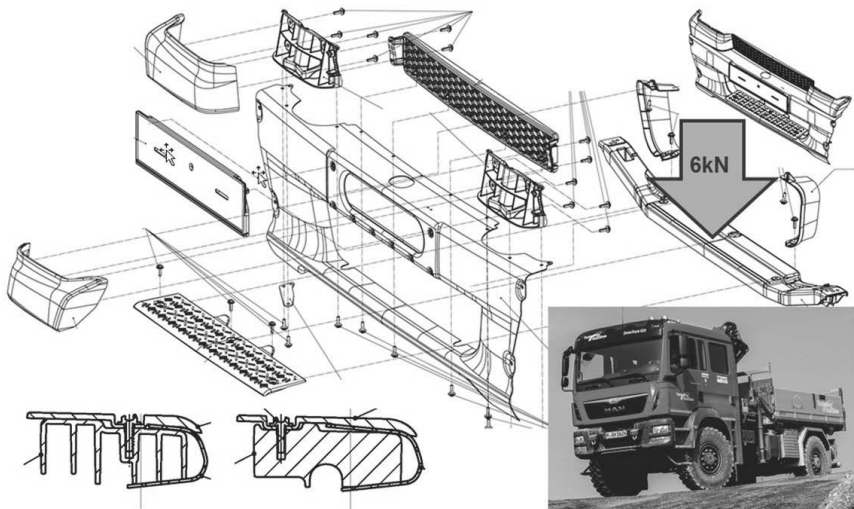


Bild 6: Verstärkung Trittplatte im Stahlstoßfänger TGL/M

## 5. Scheinwerferträger Stahlstoßfänger TGS/X

Dieser Stahlstoßfänger ist u. a. an unseren Schwerlastzugmaschinen verbaut, die bis zu 250 Tonnen Gesamtzuggewicht bewegen dürfen, Bild 7.

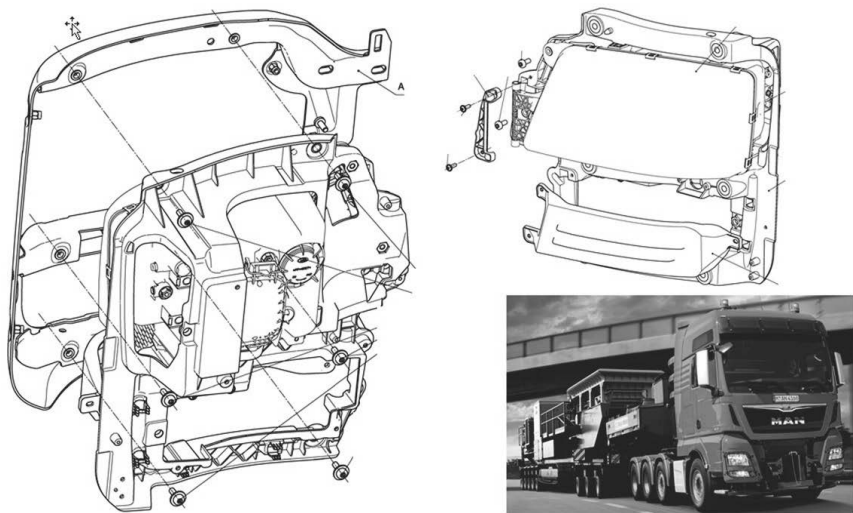


Bild 7: Scheinwerferträger Stahlstoßfänger TGS/X

Der Scheinwerferträger, der sowohl den Hauptscheinwerfer als auch das Leuchtenband aufnimmt wurde bis zu seiner Ablösung durch PP-SGF50 aus PBT/PET-GF45 hergestellt. Beide Testläufe – Betriebsfestigkeit wie auch die Umweltqualifikation – wurden mit Bravour bestanden.

Das Leuchtenband ist eine Sonderausstattung und beinhaltet Nebelscheinwerfer, Zusatzfernlicht und das Abbiegelicht. Da es eine relevante Masse für die Rüttelerprobung darstellt, läuft es auf den Prüfständen generell mit.

## 6. Scheinwerferträger Kunststoffstoßfänger TGS/X

Auch hier wurde der Träger des Hauptscheinwerfers und des Leuchtenbandes auf PP umgestellt. Der Scheinwerferträger ist am Rahmenfrontend in X-Richtung angeschraubt und stützt sich über den Frontunterfahrschutz zusätzlich in Z ab, Bild 8.

Da hier die Verbindung zwischen den Seitenblenden und dem Träger kein Spiel aufwies, das sich im Laufe der Erprobung hätte vergrößern können, kam es im dynamischen Rütteltest wie auch im Klimawechseltest zu keinen Auffälligkeiten. Serienstart für diese Träger ist Anfang 2017.

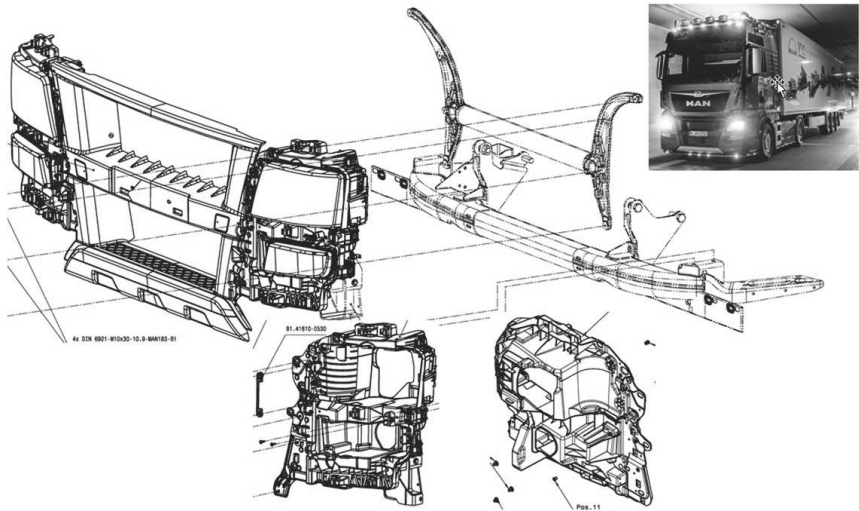


Bild 8: Scheinwerferträger Kunststoffstoßfänger TGS/X

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Beispiele zeigen, dass den glasfaserverstärkten PA6-Typen mit den HP-PPs ein sehr ernst zu nehmender Wettbewerber erwachsen ist, der in den wichtigsten Disziplinen – CO<sub>2</sub>, Gewicht und Kosten – die Nase vorn hat. Für PA6 wird es sehr schwer werden sich zu behaupten.

### Literatur

- [1] Häberle, H.: Nutzfahrzeugleichtbau durch Einsatz von Kunststoffen, Kunststoffe im Automobilbau, VDI Verlag 2014
- [2] Häberle, H.: High-Performance Polypropylene – wird PA 6 noch benötigt? SKF-Fachtagung Polypropylen im Automobilbau, Würzburg, 2016
- [3] Häberle, H.: PP-SGF – der Polyamid-Killer? Kunststoff Symposium Süd, Zimmern ob Rottweil, 2016



# Elektrochemische Korrosion und Ihre Vermeidung mit Polyamiden

Dipl.-Ing. **G. Prautzsch**, Dipl.-Ing. **T. Stier**, Dipl.-Ing. **T. Coeln**,  
AKRO PLASTIC GMBH Niederzissen

Die AKRO PLASTIC GmbH ist seit 1988 als Mitglied der KD Feddersen Gruppe (Hamburg) mit der Fertigung technischer Kunststoffe befasst. Im Hause werden praktisch alle technischen und auch einige nachwachsende und kompostierbare Werkstoffe verarbeitet. Im Eigen-Portfolio befinden sich sehr viele Polyamid-Typen. Glasfaserverstärkte Polyamide 6, PA66, 6.10, 6.12 spielen in der internationalen Automobilindustrie heute eine unverzichtbare Rolle.

Viele Anwendungen im Auto sind harschen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Die Hersteller übernehmen heute sehr weitreichende Gewährleistungen für Ihre Produkte. Die Eignung aller Komponenten für eine realistisch erwartbare Lebensdauer spielt daher eine stetig zunehmende Rolle. Über die Jahre haben sich in der Industrie entsprechende Prüfungen etabliert, mit denen ermittelt werden kann, ob Komponenten und Baugruppen den späteren Einsatz im Automobil-Betrieb gut überstehen können.

Ein Beispiel dafür sind die Motorprüfstände in der Autoindustrie, 3000 Stunden Dauerlauf mit verschiedenen Belastungsszenarien sind schon lange üblich. Wärmetauscher für die Kühlung der Motoren werden seit den 80er Jahren mit Kühlerendstücken aus PA66 GF 30 hergestellt. Auf deutschen Straßen aber besonders in Südafrika kann man viele Exemplare des Golf 1 aus den 80ern fahren sehen, eine Lebensdauer von 30 und mehr Jahren ist belegbar.

In der Elektro-industrie werden Sicherungsautomaten (Mini-Circuit-Breaker) produziert, die in unseren Häusern und Wohnungen verbaut, dort 20 und mehr Jahre im Einsatz sind, bevor sie im Zuge einer Renovierung evtl. ausgetauscht werden. Für diese lange Zeit muss die Betriebssicherheit gegeben sein. Auch diese Geräte werden heute im Wesentlichen aus Polyamidwerkstoffen hergestellt. Andere Beispiele sind Reihenklemmen in Schaltschränken und Steckverbindergehäuse in Haushaltsgeräten, auch diese sind länger als 10 Jahre, bis zu 20 Jahre im Betrieb.

Alle relevanten Industrien haben daher Test-Bedingungen definiert, die zunächst die Geräte, dann Einzelkomponenten und schließlich die Werkstoffe entsprechend prüfen. In der Haushaltsgeräteindustrie ist ein 5000 Stunden Dauerlauftest häufig anzufinden.

Ein Beispiel der daraus entstandenen Normung ist der SAE STANDARD US-CAR For Electrical Connectors. Ein Test-Zyklus mit Temperaturen zwischen -40°C und 90°C sowie Luftfeuchten von bis zu 90% rel. Feuchte wird verwendet. Ein 8 Stunden Zyklus ist definiert, der dann mehrfach durchlaufen werden muss. Aus solchen Baugruppen-Prüfungen wurde dann

abgeleitet, welche Anforderungen für Werkstoffe gelten, damit sie Aussicht auf Erfolg haben können. Ein Beispiel dafür ist der GMW3013 Worldwide Engineering Standard, der die Wärmostabilisierung der Werkstoffe adressiert. Hier finden sich Temperaturen von 110°C für unverstärkte und 140°C für verstärkte Polyamide. Werkstoffe, die diese Norm erfüllen, müssen am Ende einer 1000 Stunden Prüfung noch 75% der Ausgangseigenschaft nachweisen. Ein anderes Beispiel ist die VW 50127, die PA66 Werkstoffe für den PKW-Innenraum zum Gegenstand hat. Die Forderung hier ist Alterung bei 150°C für 1000 Stunden mit nachfolgender Kerbschlagzähigkeitsprüfung nach ISO 179-1/1eA. Kriterium ist ein Abfall der Eigenschaft von maximal 50%.

Als Konsequenz all dieser Forderungen haben die Hersteller der Werkstoffe umfangreiche Untersuchungen zum Alterungsverhalten gemacht. Über die Jahre wurden immer wieder neue Stabilisierungssysteme entwickelt. Diese erlauben heute eine maßgeschneiderte Rezeptur mit optimalen Kosten, bester Farbtreue und bester Lebensdauer je nach Anwendung.

Hersteller Elektrotechnischer Baugruppen in der Automobilindustrie werden häufig mit dem Problem der Korrosion an Spannungsführenden Teilen konfrontiert. Die häufigste Form der Korrosion ist die Elektro-Korrosion, die überall anzutreffen ist, wo ein flüssiger Elektrolyt mit zwei verschiedenen leitfähigen Werkstoffen zusammenkommt. Dies sind meist Metalle, aber auch Carbon kommt zunehmend in Betracht. Jeder leitfähige Werkstoff hat eine ihm eigene Elektronegativität. Die Differenz dieses Wertes zwischen zwei Leitern ist der treibende Faktor für das Korrosionsgeschehen. Der „unedlere“ (d.h. der Werkstoff mit der niedrigeren Elektronegativität) gibt dabei Elektronen an das Elektrolyt ab. Es kommt dabei zu Korrosion mit Lochfraß, wie er ganz besonders bei Magnesium-Bauteilen beobachtet werden kann, die in einem überwiegenden Stahl-umfeld verbaut sind. Das Getriebegehäuse alter VW-Käfer, manche Ölwanne und einige Zylinderkopfhäuben der frühen 80er Jahre sind dafür heute noch sichtbare Beispiele.

Daneben kommt aber auch eine trockene Form der Elektro-Korrosion vor. Lutz Müller von Bosch hat diese exemplarisch dargestellt (1). Bauteile der Mikroelektronik sind ICs (Integrated Circuits). Diese stetig kleiner gewordenen Bauteile erfordern sehr feine elektrisch leitende Anbindungen. Häufig ist das ein hauchdünner Draht aus Gold, der auf ein „Bond-Pad“ aus Aluminium mittels Ultraschall geschweißt wird. Es sind auch Lösungen mit einem Alu-Draht auf Gold-Pad möglich. In beiden Fällen wird im Schweißbereich eine Intermetallische Phase (IMP) gebildet. Diese Intermetallische Phase hat eine besondere Empfindlichkeit gegen Korrosive Vorgänge. In der Erprobung ausgefallene Bauteile wurden im Längsschnitt untersucht und im Raster-Elektronen Mikroskop untersucht. Sehr deutlich kann sichtbar gemacht werden, dass die IMP verschwunden ist. Analytische Untersuchungen an korrodierten Kontakten zeigten, dass am Korrosionsgeschehen offenbar Iod, Brom und Kalium beteiligt sind, die nicht aus den Kontaktwerkstoffen stammen. Diese Elemente konnten als Bestandteile der Rezepturen der

Polyamid-Werkstoffe identifiziert werden. Gehäuse für Steuerungen oder Steckverbinder in der Autoindustrie werden häufig aus PA hergestellt, weil PA alle bekannten Randbedingungen gut übersteht. Polyester sind mitunter an der Grenze Ihrer Fähigkeiten, wenn feucht-warm getestet wird (85°C und 85%rel.F. für 1000 Stunden).

Neben den Ausfällen infolge von weg-korrodiertem Material kommt es gelegentlich zu Ausfällen, weil auf einem Kontakt sich ein Belag aufbaut, der stetig wächst und schließlich einen Kurzschluss benachbarter Kontakte bewirkt. Diese Beläge konnten auf die Metallseifen (Kaliumstearat, Aluminiumstearat) zurückgeführt werden, die ebenfalls häufig in PA Rezepturen verwendet werden.

Einige der betroffenen Auto-Entwickler und System-Lieferanten haben mit dieser Fragestellung nach neuen Lösungen gesucht. Die nachhaltig sowohl die Korrosion, als auch die Belagsbildung vermeiden. In diesem Kontext wurde auch bei AKRO-Plastic begonnen, am Thema zu arbeiten. Rezepturen zu erstellen, die auf die gefährlichen Elemente verzichten, war dabei der erste und einfachste Schritt.

Die Iod-induzierte Korrosion aus der Gasphase erwies sich als eine sehr schwierige Aufgabenstellung.

Sehr kleine Iod-Konzentrationen im Werkstoff wurden als korrosiv erkannt. Da Iod bei mäßig erhöhten Temperaturen schon sublimiert kommt es auch bei Bauteilen im Abstand von 10cm vom Iod-haltigen PA zu Korrosion. In der Konsequenz entschloss sich die AKRO-Plastic, einen Grenzwert von 1ppm für die gefährlichen Iod und Brom anzustreben. Dieser Grenzwert sollte für jede gefertigte Charge garantiert werden können, dazu ist eine Messmethode vonnöten, die die Rohstoffe entsprechend untersucht und das fertige Compound. Zu Beginn der Arbeit war eine solche Methode am Markt nicht verfügbar. Die Analytik in der Metallurgie benutzt schon viele Jahre die Röntgenfluoreszenz mit einer Genauigkeit von etwa 1ppm. Für den Einsatz mit Polymeren, wollte das aber kein Geräte-Lieferant als Eigenschaft zusagen.

Daher blieb die Entwicklung einer Methode, die hinreichend genau kalibrierbar ist, eine Aufgabe, die bei AKRO-Plastic bewältigt werden musste. Dies konnte nach etwa einem Jahr intensiver Arbeit erfolgreich abgeschlossen werden. Die heute im Einsatz befindlichen Geräte können mit einer Reproduzierbarkeit von 0,1ppm bis 2ppm die meisten Elemente des Periodensystems quantitativ bestimmen. (Nicht bestimmt werden können die Elemente bis zur Ordnungszahl 11 (Natrium)). Damit hat AKRO-Plastic den entscheidenden Fortschritt gemacht. Bei der Produktion von „elektrisch neutralen“ („EN“) Polyamid-Compounds konnte nun zunehmend Erfahrungen gesammelt werden, welche Randbedingungen eingehalten werden müssen, um unbeabsichtigte Einträge von Iod oder Brom zu vermeiden. Chlor wurde in den meisten Fällen nicht als kritisches Element erkannt. Chlor-Freiheit ist auch schwer einzuhalten, wenn man das Kühlwasser aus dem öffentlichen Netz bezieht.

Die Beprobung führt schon häufig zur Kontamination der Proben mit Chlor aus dem Hautkontakt.

In einer separat stehenden Anlage, die gezielt mit reinem Wasser befüllt und betrieben wurde, konnte mittlerweile auch ein Produkt produziert werden, das nachweislich Chlor unter 1 ppm enthält.

Damit sind die Voraussetzungen erfüllt, dass auch künftig langfristig funktionierende elektrische und elektronische Baugruppen in schwierigen Klima-Bedingungen betrieben werden können. „EN“ Polyamide sind Verfügbar als Werkstoffe für Gehäuse und Steckverbinder.

Quellen:

SAE Standard US CAR

GM Worldwide Engineering Standards 3013

VW Konzernnorm 50127

„Korrosion von Metallen durch Temperaturstabilisatoren und Flammschutzmittel in Polyamid“

Lutz Müller et. al. ; Reutlingen; Vortrag beim SKZ im Juni 2016.

Werksbilder Leopold Kostal GmbH

Werksbilder AKRO PLASTIC GMBH

## AKRO-PLASTIC GmbH, Niederzissen

seit 1988 in der Feddersen Gruppe  
Spezialist für innovative Werkstoffe und  
Lohn-Compoundierung  
Akreditiertes Labor  
Kapazität >100 000 t  
>300 Mitarbeiter



## Elektrochemische Korrosion und Polyamide

- Umgebungseinflüsse auf Baugruppen, Lebensdauerprüfungen für Baugruppen und Materialien
- Elektro-Korrosion in Verschiedenen Funktionselementen
- Stabilisatoren und Additive, die Elektrokorrosion ermöglichen
- Produktion und Messtechnik, um „saubere“ Produkte <1ppm zu garantieren

## **Umgebungseinflüsse auf Baugruppen,**

### **Lebensdauerprüfungen für Baugruppen und Materialien**

Automobilbau und Elektrotechnik verwenden seit Jahrzehnten Kunststoffe in Anwendungen mit sehr langer Lebensdauer

Beispiele:

Wärmetauscher für Kühlung und Heizung (Golf I >30 Jahre);  
Gehäuse Sicherungsautomat (Mini-circuit-breaker) >20 Jahre;  
Reihenklempen in Steuerungen >20 Jahre.  
Steckverbinder in Haushaltsgeräten 10-20 Jahre.

## **Umgebungseinflüsse auf Baugruppen**

Methoden zur Prüfung der Lebensdauer-Tauglichkeit von Baugruppen wurden entwickelt

z.B.

Motorprüfstand in der Automobilindustrie 3000 hrs

Dauerlauftest für Haushaltsgeräte 5000 hrs.

## Umgebungseinflüsse auf Baugruppen

Methoden zur Prüfung der Lebensdauer-Tauglichkeit von Baugruppen wurden entwickelt

Normierung dieser Methoden

Werksnormen,  
nationale Industrie-Normen,  
Internationale Normen

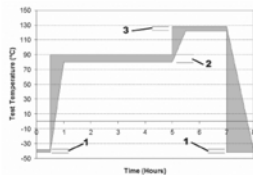
## Umgebungseinflüsse auf Baugruppen

SAE STANDARD US-CAR  
Elektrische Steckverbinder / Electrical Connectors  
Test Cycle

Key:

1. (-40°C)
2. (80-90°C)
3. Test Temperature, see figure 5.1.4 (Class 3 shown for illustration)
4. Relative humidity uncontrolled. (do not vent chamber at hr. 5)
5. 80-90% relative humidity

# Umgebungseinflüsse auf Baugruppen



7. Cycle the test samples 40 times using the cycling schedule shown in Figure 5.6.2.3. Extended transition times may be used as long as the dwell times at temperature are maintained. The cycle begins with the sample at -40°C and uncontrolled relative humidity. Completion of the schedule shown in Figure 5.6.2.3 will constitute one cycle. Use the Maximum Ambient Temperature for hours 5 through 7 as determined from Figure 5.1.4 in Step 6 above.

- Key
- 1 (-40)°C
  - 2 (90 – 90)°C
  - 3 Test temperature, see Figure 5.1.4 (Class 3 shown for illustration only)
  - 4 Relative humidity, uncontrolled. Do not vent chamber at hour 5
  - 5 (90 – 100)% Relative humidity

Figure 5.6.2.3: Temperature/Humidity Cycling Schedule

# Umgebungseinflüsse auf Baugruppen

daraus abgeleitet, die Forderungen für Werkstoffe:  
z. B. 1000 h bei 140°C, mit 75% der Ausgangseigenschaft

GMW3013 Worldwide Engineering Standards

Heat Stabilized. Requirements for heat stability will be indicated in the Mechanical Requirements paragraph of each GMW, if applicable. Heat stability tests are run at 1000 h per ISO 1818 at highest temperatures that still allow 75 % retention of properties. All filled materials must be heat stabilized unless otherwise specified.				
#	Test Method	Specimen	Test Conditions	Retention
1	Impact at yield or break if no yield point after heat aging 1000 h	ISO 527-1/2 Type A bar	Heat Age Temperature: _____ °C	% retain
2	Nominal strain at yield or break after heat aging 1000 h	ISO 178/mk	Heat Age Temperature: _____ °C	% retain
3	Charpy notched impact strength after heat aging 1000 h	ISO 179/mk	Heat Age Temperature: _____ °C	% retain
4	Notched impact strength after heat aging 1000 h	ISO 180/1A	Heat Age Temperature: _____ °C	% retain
5	Notched impact strength after heat aging 1000 h	ISO 180/1A	Heat Age Temperature: _____ °C	% retain
6	Notched impact strength after heat aging 1000 h	ISO 180/1A	Heat Age Temperature: _____ °C	% retain
7	Notched impact strength after heat aging 1000 h	ISO 180/1A	Heat Age Temperature: _____ °C	% retain

GMW3013 GM WORLDWIDE ENGINEERING STANDARDS

Table 4: Heat Aging Test

Polymer Family	Description	Heat Age Test Temperature
Acrylonitrile/Butadiene/Styrene (ABS)		+100 °C
Polyamide 6 and 66	Unreinforced	+110 °C
	Reinforced	+140 °C
Polyamide 11 and 12	Unreinforced	+90 °C
	Reinforced	+130 °C
Polyamide 46	Unreinforced	+160 °C
	Reinforced	+180 °C

# Umgebungseinflüsse auf Baugruppen

oder 150°C 1000 h mit mehr als 50% Schlagzähigkeit

**VOLKSWAGEN**  
AKTIENGESELLSCHAFT

Konzernnorm VW 50127  
Ausgabe 2013-04

Klass.-Nr.: 55112  
Schlagwörter: Türgriff, Zugstange, Buchse, Schalter, Gelenk, Clips, Lautsprechergritter, Hebel, Lager, Innenraumteil, Polyamid 66, PA66

Polyamid 66, Fertigteile des Fahrzeuginnenraums  
Werkstoffanforderungen

12	Kerbschlagzähigkeit nach DIN EN ISO 179-1/1eA bei +23 °C nach Alterung (150 °C, 1000 h) Alterungsbeständigkeit siehe Abschnitt 5.7			
	trocken	%	Δ ≤ 50	Δ ≤ 30
	siehe Abschnitt 3.5			

# Umgebungseinflüsse auf Baugruppen

oder 150°C 1000 h mit mehr als 50% Schlagzähigkeit

**VOLKSWAGEN**  
AKTIENGESELLSCHAFT

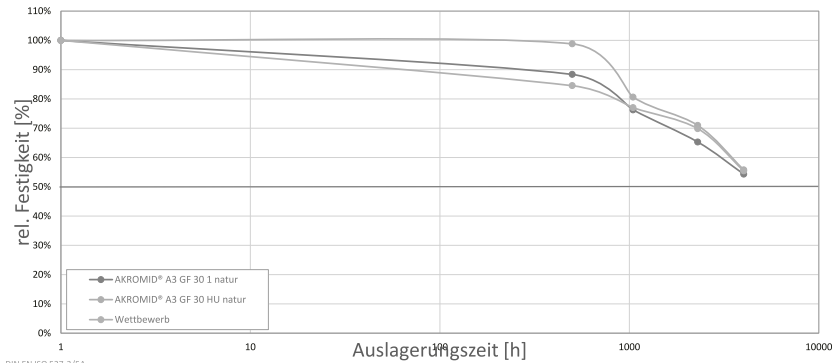
Konzernnorm VW 50127  
Ausgabe 2013-04

Klass.-Nr.: 55112  
Schlagwörter: Türgriff, Zugstange, Buchse, Schalter, Gelenk, Clips, Lautsprechergritter, Hebel, Lager, Innenraumteil, Polyamid 66, PA66

Polyamid 66, Fertigteile des Fahrzeuginnenraums  
Werkstoffanforderungen

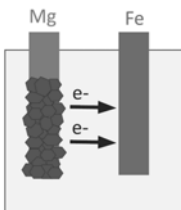
12	Kerbschlagzähigkeit nach DIN EN ISO 179-1/1eA bei +23 °C nach Alterung (150 °C, 1000 h) Alterungsbeständigkeit siehe Abschnitt 5.7			
	trocken	%	Δ ≤ 50	Δ ≤ 30
	siehe Abschnitt 3.5			

## Polyamid-Compound Lagerung bei 150°C



## Elektro-Korrosion

Häufigste Form mit flüssigem Elektrolyt zwischen zwei Metallen unterschiedlicher Elektronegativität.



„Lochfraß“ an Magnesium

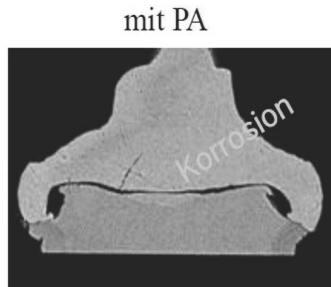
Magnesium-Gussteile  
VW Käfer Getriebe,  
Ölwannen etc.

Eisen mit Opferanode (Mg)  
in wässriger Lösung

## Elektro-Korrosion

Trockene Korrosion aus der Gasphase

Beispiel:  
Kontaktierung von  
Integrierten Schaltungen  
(Micro-Chip) mit  
Gold-Aluminium-  
Schweißverbindung



Bildnachweis: Lutz Müller, Bosch Reutlingen, Vortrag beim SKZ 2016

## Elektro-Korrosion

Trockene Korrosion aus der Gas-Phase

IMP intermetallische Phase AU-AL



Korrosion an IMP

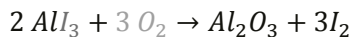
Bildnachweis: Lutz Müller, Bosch Reutlingen, Vortrag beim SKZ 2016

## Elektro-Korrosion

Intermetallische Phasen bei der Kontaktierung zwischen Aluminium und Gold  
leiden unter dem Angriff von trockenem, Gasförmigem Iod



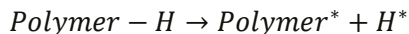
dabei kommt es zu einem Kreisprozess, das Iod kann mehrfach, praktisch beliebig häufig wirksam werden.



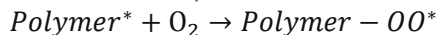
diese Korrosion lässt sich im Versuch reproduzieren.

Zitat: Lutz Müller, Bosch, Vortrag beim SKZ 2016

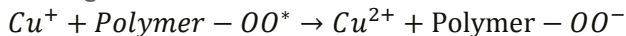
## Stabilisierung PA & PPA, Kupferiodid Kaliumiodid



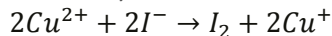
Bindungsbrüche bei hohen Temperaturen



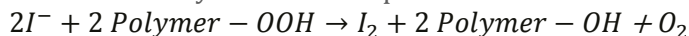
Peroxydbildung mit Luftsauerstoff



Kupfer-Ion zerstört das Peroxyd



Iod-ionen aus KI recyceln das Kupfer



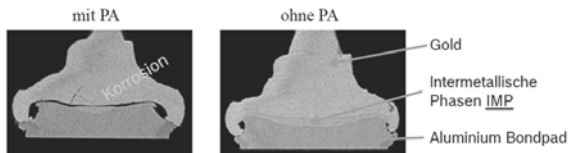
Iod in Lösung sublimiert und steht gasförmig zur Verfügung

Quelle: Lutz Müller, Bosch, Vortrag beim SKZ 2016

## Elektro-Korrosion

### PA mit KI/ CuI in Hochtemperatur-Dauerlauf

- **Material:** geschlossenes Gehäuse, PA-Bauteile und Au-Al-Bondverbindungen (Golddrähte mit Ultraschall auf Aluminium-Bondpads geschweisst, [Harman 10]) im Gehäuse
- **Auftreten bei Temperaturtest:** HT-DL, >1000h bei 150°C an Luft
- **Mechanismus B:** Korrosion an Au-Al-Bonds ca. 10cm Luftlinie von PA ohne PA- trat diese Korrosionsart nicht auf
- **Ursache:** Bauteil aus PA enthält HT-Stabilisator: KI + CuI,
- **Mechanismus B**



Bildnachweis: Lutz Müller, Bosch Reutlingen, Vortrag beim SKZ 2016

## Ausfallanalyse mit Mikroskop und Elementar-Analyse

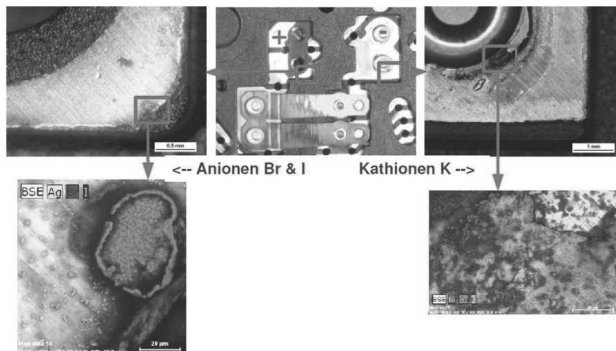
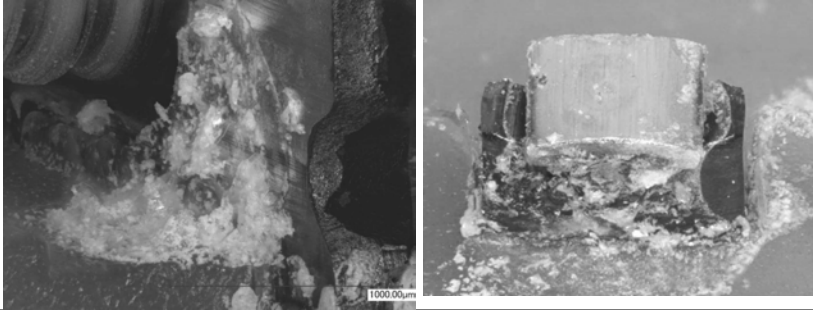


Bild Leopold Kostal GmbH & Co. KG, Technologieentwicklung<sup>IV</sup>, zeigt mögliche Schadensbilder

## Ausfall-Analyse mit Stereo-Mikroskopie

### Belagsbildung im Feuchtwarmen Klima



## Stabilisatoren und Additive, die elektrotechnische Ausfälle ermöglichen

Kupferiodid und Kaliumiodid

Kaliumstearate

Aluminiumstearate

## Alternative Stabilisierungssysteme

Polyamide können mit organischen Stabilisatoren alterungsbeständig gemacht werden.

- Aminische Systeme
- Phenolisch Systeme
- Auch auf den Einsatz der Metallseifen kann verzichtet werden.

## Produktion und Messtechnik

Sehr kleine Mengen an Iod und Brom wurden als gefährlich erkannt  
Chlor war nicht immer ein Problem.

Die Idee: „elektrisch neutrale“ Polyamide zu produzieren war einfach.

Nachweisgrenze im kleinen ppm Bereich war schwierig.

Um unterschiedlichen Forderungen gerecht zu werden, entschied sich AKRO-PLASTIC einen Grenzwert von 1ppm anzustreben

## Produktion und Messtechnik

2014 gab es keine käuflich verfügbare Messmethode mit 1ppm Grenzwert.

AKRO-PLASTIC hat eine Methode weiterentwickelt.

Röntgen-Fluoreszenz-Analyse erlaubt heute:

Messungen des Masseanteils von Elementen,  
(die größer sind als Magnesium)  
von 1 ppm bis 100%

## „ELEKTRISCH NEUTRALE“ TEST FÄHIGKEIT

Alle Polyamide, Polyketone, Polyester (nicht PTFE, PPS, ...)

Analyse an Granulaten

Probengröße >2 gramm

Elemente von Interesse: Brom (Br), Iod (I),

Schwierig zu messen: Chlor (Cl) (Probennahme ist oft Quelle für Kontamination)

Elemente : Mg und höher im PSE, d.h. nicht Natrium (Na)

Genauigkeit: 0,1 ppm bis 2 ppm (standard deviation of method)  
abhängig von Element und Proben-Größe

Messbereich: 1 ppm bis 100%

## ELEKTRISCH NEUTRAL

Beprobung kritisch für die Analyse

saubere Probenbehälter, vermeide Haut-Kontakt

Beprobung vom spritzgegossenen Artikel

-- Mahlen auf angemessene Korngröße

-- schwierig für Bauteile mit Metal-Inserts

## Produktion

Eine Rezeptur ohne Iod, Brom, Chlor

bedeutet noch nicht, ein Produkt ohne Iod, Brom, Chlor.

Compoundier-Linien bieten viele Quellen für Quer-Kontamination

## AKRO EINZELNE FERTIGUNGSLINIE (BRASILIEN)



### Produktion

Reinigung aller Aufgäbebehälter

Sorgfältige Auswahl der Rohstoffe (Vorab-Analyse)

Separierte Wasserkreisläufe, für jede Linie sind nötig

Mehrere Stunden Tot-Zeit im Regelkreis wurden beobachtet

Produktion „zertifizierter“ „EN“ Produkte  
erfordert einen Vorlauf von mindestens 8 Stunden „EN“ Rezeptur.  
(Austrag von Resten früherer Fertigungen)

# Einsatz von Organoblechen im Fahrzeugunterflur – Kosten- und gewichtsoptimiertes Geländerobustheitspaket

Dipl.-Ing. (FH) **R. Apfelbeck**, **S. Müller**, B.Eng. (BA),  
AUDI AG, Neckarsulm

## Kurzfassung

Audi steht für „Vorsprung durch Technik“. Getreu diesem Markenclaim entwickelt Audi kontinuierlich fortschrittlichste Technik. Passend zum sportlichen Markenprofil haben die Modelle von Audi ein markantes Gesicht und sportliche Linien. Der Anspruch „Hightech in Premiumfahrzeugen“ setzt sich auch in durchdachten Bauteillösungen fort. Eines der Beispiele bietet die neuentwickelte Dämpfungswanne, welche von Plattformnutzern mit Offroad-Paketen genutzt wird. Dieses Bauteil setzt auf einen intelligenten Materialmix .



Bild 1: Der neue Audi Q7 Komfort auf höchstem Niveau

Dieser Fachartikel beschreibt den erfolgreichen Einsatz von Organoblechen im Unterflurbereich und den Vorteil der Verwendung von Light Weight Reinforcement-Thermoplastic

(LWRT). Es handelt sich hierbei um ein konzernübergreifendes Plattformprojekt im SUV-Segment, welches mit dem Ersteinsatz des neuen Q7 die technischen und wirtschaftlichen Anforderungen für alle Plattformnutzer stellt.

## 1. Aufbau und Funktion einer Unterflurverkleidung

In der Fahrzeugentwicklung hat sich das Material Polypropylen (PP) im Bereich des Unterflurs durchgesetzt. Es gilt zu unterscheiden wie dieses Material verarbeitet und entsprechend eingesetzt wird. In den Fahrzeugen der Kompaktklasse wird Polypropylen (PP) in verstärkter und unverstärkter Ausführung eingesetzt.

Für Autos der Mittelklasse werden die Materialien in modifizierter Form verarbeitet. Hier wird Polypropylen (PP) in glasverstärkter Form im Pressprozess unter der Bezeichnung Glas Mat-ten Thermoplast (GMT) verwendet. In Premiumfahrzeugen kommen Light Weight Reinforcement-Thermoplastic-Materialien (LWRT) zum Einsatz und bieten optimale Eigenschaften bezüglich Leichtbau und Akustik. Verschiedene Typen dieser Materialarten sind am Markt verfügbar.

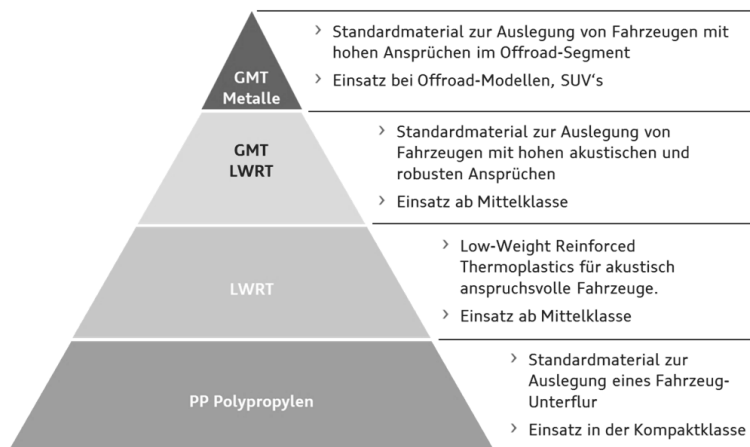


Bild 2: Einsatz von Materialien nach Anforderung und Fahrzeugklasse

Bei der Entwicklung des neuen Audi Q7, des Porsche Cayenne, des VW Touareg und des Bentley Bentayga waren die Lastenheftanforderungen klar definiert. Dadurch konnten die Entwicklungen zu einem sehr frühen Zeitpunkt zielgerichtet durchgeführt werden.

Die hohen Anforderung im Bereich Geländepaket, Bordsteinabfahrt, die Anbindung an das Frontend, die akustische Wirksamkeit des Bauteils, sowie die Berücksichtigung der unterschiedlichen Fahrbahnbeschaffenheiten setzten die Entwicklungsabteilungen um.

## **2. Aufbau eines Fahrzeug-Unterflurs**

Der vordere und auch anspruchsvollste Bereich wird je nach Lastenheftanforderung in den Punkten Akustik, Fahrzeugarchitektur, technischer Performance und dem Aggregateaufbau des Fahrzeuges mit unterschiedlichsten Materialien der Unterbodenverkleidungen ausgestattet. In der Regel werden die Dämpfungswannen der Fahrzeuge auf Basis von PP-EPDM (geringere akustische Performance als LWRT, jedoch kostengünstiger) oder LWRT (Steigerung der Akustikperformance) ausgelegt. Bei hohen Anforderungen an die Geländerobustheit kommt GMT oder Metall zum Einsatz.

Die Fahrzeugmitte kann bei hoher Anforderung der Akustik großflächig mit LWRT oder bei geringer akustischer Performance mit auf PP-Basis bestehenden Materialien , wie zum Beispiel D-LFT, PP-EPDM, SMC oder PP-GF ausgelegt werden. Für Fahrzeuge im SUV-Segment, welche eine hohe abrasive Beständigkeit gegenüber Schotter- und Splitterstrecken aufweisen müssen, werden Materialien wie GMT oder Metalle eingesetzt.

Der Hinterwagen wird in der Regel mit Verkleidungen zum Schutz der Tanks, von Aggregaten oder des Fahrwerkes ausgestattet. Ebenfalls steuern diverse Anlaufkörper zur optimierten Aerodynamik bei. Die Akustik des Vorder- und Hinterwagens spielen in aktuellen und zukünftigen Projekten eine wesentliche Rolle bei der Materialauswahl.

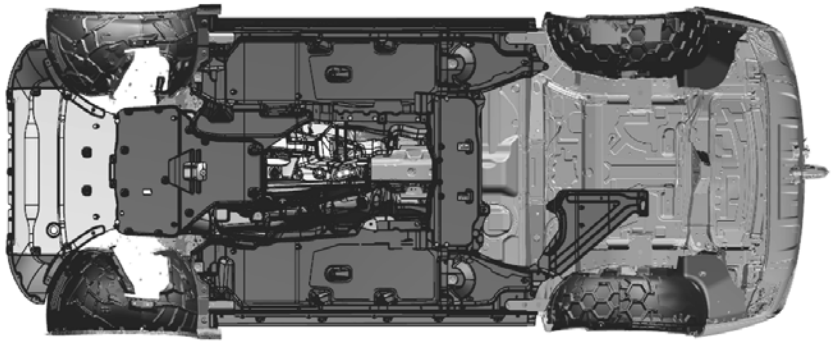


Bild 3: Aufbau eines Fahrzeugunterflurs im Q7

### 3. Anforderung für Schlechtwegeländer

Alle Fahrzeuge der Plattform werden weltweit angeboten und müssen deshalb für die jeweiligen Anforderungen der Fahrbahnbeschaffenheit optimal entwickelt werden. Bei Schlechtwegeländern ist ein Aufsetzen mit Kontakt des Unterbodens möglich. Aus diesem Grund gilt es, diese Beanspruchung so aufzunehmen, dass eine Beschädigung des Aggregates und des Kühlerpaketes ausgeschlossen werden kann. Die Unterbodenverkleidung eignet sich hervorragend diese Belastungsspitzen durch Abgleiten aufzunehmen.

Fahrzeuge, welche das Anforderungsprofil eines Schlechtwegelandes erfüllen müssen, erhalten metallische oder auf GMT basierende Dämpfungswannen bzw. seitliche Mittelböden. Die hydrodynamische Wechselwirkung während dem Ein- und Ausfahren von Wasserbecken im Verbund mit hoher Schotter- und Splitterbeanspruchung, führt bei einem Basismaterial, wie zum Beispiel LWRT zur Ermüdung. Um ein für die Erprobungen serienreifes Material zu ertüchtigen, wurde ein Material benötigt, welches widerstandsfähiger ist als ein Basis-LWRT, schlagzäher als GMT und hinsichtlich anwachsender Gesetzesanforderungen, leichter als Metall.

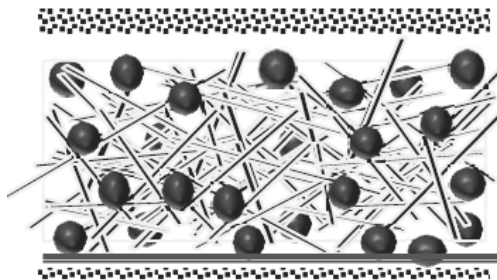
#### 4. Lösungen für Schlechtwegeländer

In die Entwicklung des neuen Audi Q7 fließen 20 Jahre Leichtbau-Erfahrung mit ein. Um eine intelligente Lösung mit zeitgleicher Substitution von Metallen im Unterflur-Segment zu erzielen, setzte man auf LWRT und Organoblech.

Damit auch ein mehrmaliger Kontakt der Dämpfungswanne und der seitlichen Unterflurverkleidung mit der Fahrbahn nicht zu einem Versagen des Materials führt, wird in der Schlechtwege-Ausführung die gesamte Fläche der Bauteile mit einem Organoblech ausgelegt. Die seitlichen Verkleidungen wurden mit einer neu entwickelten Spezialtyp eines Organoblechs entwickelt.

#### 5. Aufbau von Organoblechen

Unter einem Organoblech versteht man einen Faserverbundwerkstoff aus Glasfasern, Carbon oder Aramid sowie einer Kunststoffmatrix, wie zum Beispiel Polypropylen. Das Material zeichnet sich durch seine hohe Steifigkeit und Festigkeit aus, und ist daher für Leichtbauanwendungen ideal einzusetzen.



PET - Schutzvlies

LWRT- Hohe akustische Performance

Organoblech – Hohe Robustheit

PET – Schutzvlies – Hohe Gleiteigenschaften

Bild 4: Aufbau eines Unterflurs für Schlechtwegeländer

Der besondere Materialaufbau ist in einem One-Step-Prozess herstellbar und benötigt keine weiteren Prozessschritte. Durch das Lofting (Expansion des Materials durch Wärmeeintrag) des Materials kann eine Höhe von 15-20mm erreicht werden. Das führt zum Anstieg des Flächenträgheitsmoments, der Steifigkeit und der akustischen Performance.

## 5. Allgemeine prozesstechnische Herstellung von Organoblech-LWRT-Unterböden

Insbesondere flache Bauteile mit geringen Umformgraden eignen sich sehr gut für die Herstellung. Hintergrund sind die unterschiedlichen Schwundeigenschaften zwischen einem LWRT und einem Organoblech, wie zum Beispiel Tepex von der Firma Bond Laminates. Zu große Höhensprünge führen aufgrund des unterschiedlichen Flächengewichtes, trotz gleichem Grundmaterial PP-GF, zu einer Deformationen im Bauteil.

Im Rückschluss dazu muss je nach Bauteilgeometrie entschieden werden, wie der Herstellungsprozess aussehen muss. Hier bieten sich mehrere Möglichkeiten an, das Organoblech an das LWRT anzubinden. Einfache und flache Bauteile können über bereits fertige Halbzeuge, durch ein auf LWRT laminiertes Organoblech produziert werden. Bei komplexeren Bauteilen mit hohen Flächengewicht-Differenzen sollten beide Halbzeuge separat aufgeheizt werden. Dies wird durch den unterschiedlichen Energieeintrag in die Materialien begründet. Danach folgt das Einlegen in das Presswerkzeug mit anschließenden Press- und Stanzvorgängen.



Bild 5: Herstellung eines LWRT-Organoblech-Verbunds

## 6. Vorteile der Verwendung von Organoblechen

### Gewicht

Der neue Q7 ist ein Auto mit einem sehr guten Höhen-Breiten-Verhältnis: 5,05 Meter Länge, 2,99 Meter Radstand, 1,97 Meter Breite und 1,74 Meter Höhe. In der Version mit dem 3.0 TDI-Motor bringt der neue Q7 lediglich 1.995 Kilogramm auf die Waage (Leergewicht ohne Fahrer bei einem Q7 mit fünf Sitzen), das sind gegenüber dem Vorgängermodell bis zu 325 Kilogramm weniger Gewicht – so viel wie ein Konzertflügel.

Die neuen Entwicklungen im Unterbodenbereich leisten durch den Wegfall von Metall und GMT einen Beitrag zu dieser Gewichtsersparnis. Durch den Einsatz von Organoblechen im Unterboden konnte eine Gewichtsersparnis von insgesamt sieben Kilogramm für das Schlechtwegeländer-Paket erreicht werden.

## Aeroakustik

Den soliden und eleganten Eindruck des Audi Q7 verstärken die hochwertigen Akustik-Komponenten. Der Audi Q7 ist Best-in-class mit seiner Aeroakustik. Der cw-Wert des großen SUV beträgt 0,32 – dank aufwendiger technischer Lösungen ein Top-Ergebnis im Segment. Einen bedeutenden Beitrag leistet der Unterflurbereich, welcher von Fahrzeugfront bis Fahrzeugheck ausgelegt ist.

Ein großer Vorteil des LWRT-Organoblech-Aufbaus gegenüber einem Metall oder GMT ist die gesteigerte, akustische Performance. Die Abbildung 6 zeigt den Unterschied zwischen einem GMT und einem LWRT-Organoblech-Verbund. Bereits im Niederfrequenzbereich zeichnet sich das Delta deutlich aus und verläuft bis in den Hochfrequenzbereich nahezu konstant.

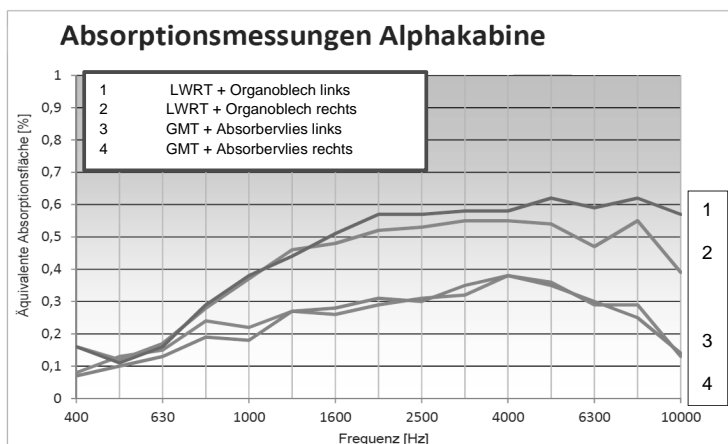


Bild 6: Absorptionsmessung geometriegleicher Unterflurbauteile, unterschiedlichen Materials

## Robustheit



Bild 7: Bentley Bentayga in der Geländeerprobung

Die in der Plattform entwickelten Premiumfahrzeuge stehen für Performance und Exklusivität im SUV-Segment. Der auf der Plattform basierende Bentley Bentayga ist Benchmark für die Vereinigung extravaganter Ausstattung und Komfort bei härtesten Bedingungen.

Mit dem Einsatz des Organoblechs werden die seitens Lastenheft gegebenen Plattformanforderungen im SUV-Segment in allen Punkten erfüllt.

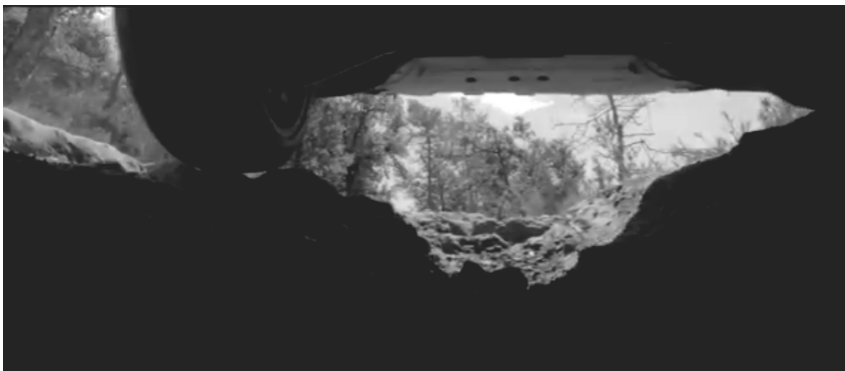


Bild 8: Erprobung des Unterbodens in der Geländepföhrstrecke

Bei einer schlagartigen Beanspruchung, wie zum Beispiel dem Aufsetzen eines Fahrzeuges bei Bordsteinabfahrt oder hoher Schotterberieselung, kann der Organoblech-LWRT-Verbund einen Großteil der Energie durch elastische Verformung absorbieren. Dies ist gegenüber

einem GMT ein großer Vorteil, welches aufgrund der geringeren Schlagzähigkeit zu einem früheren Materialversagen führt.

## **Kosten**

Die Entwicklung eines Bauteils erfordert neben den technischen Anforderungen die Berücksichtigung der Kosten. Neben den Einzelteilkosten können aufgrund von Gesetzesanforderungen zusätzliche Zahlungen bei Überschreitung des vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes entstehen. Da der Ausstoß unmittelbar mit dem Gewicht verbunden ist, liegt die Motivation sehr nahe, mit dem Einsatz eines optimalen Materials, das Gewicht niedrig zu halten.

Mit der Substitution des metallischen Unterfahrschutzes als auch der aus GMT basierenden Seitenverkleidung, ist es Audi gelungen, den Kostenumfang um die Hälfte zu reduzieren.

## **7. Fazit**

Mit der zweiten Generation des Audi Q7 setzen die Fahrzeuge der Plattform in ihrem Marktsegment neue Maßstäbe: Antrieb, Fahrwerk, Leichtbau, Assistenzsysteme und Infotainment überzeugen mit innovativer Technik. Der neue Audi Q7 ist bis zu 325 Kilogramm leichter als sein Vorgänger und spart pro Kilometer bis zu 50 Gramm CO<sub>2</sub>.

Die Dämpfungswannen und Unterflur-Umfänge für Schlechtwegeländer sind ein gut durchdachtes Produkt, das in erfolgreicher Zusammenarbeit der Audi Entwicklungsabteilung mit den Audi-Partnern und Konzernkollegen entstand.

Diese Entwicklung demonstriert eindrucksvoll, dass der zielgerichtete Verbund modernster Materialien neue innovative Lösungen zur Gewichtseinsparung bietet. Hohe Anforderungen und anspruchsvolle Aufgaben aus den Bereichen Schlechtwegeländer, Akustik, Struktur und Leichtbau wurden in einem für den Kunden äußerst hochwertigen Endprodukt realisiert.

Neuartige Kunststoffe im Automobilbau werden zukünftig eine noch größere Rolle spielen, weil sich dadurch der Leichtbau besser gestalten lässt. Unterschiedliche Herstellungsverfahren in Kombination ermöglichen ein hohes Maß an Gestaltungsfreiheit und bieten ebenso Potentiale, zukünftige Gesetzesvorgaben erfüllen zu können.



Bild 9: Der Audi Q7: Neues beginnt, wo Grenzen enden

Das Ergebnis, ein ultraleichtes akustisch hochwertiges Material in Verbindung mit einem Organomaterial, gegen ein Metall einzusetzen, spiegelt sich für die Firma AUDI AG und auch letztendlich für den Kunden in den Punkten Effizienz, Verbrauch und Komfort durch optimierte Akustik wider. Mit der technischen Umsetzung ist es der AUDI AG gelungen, auch in zukünftigen Projekten, gemäß dem Slogan „Vorsprung durch Technik“, im SUV-Segment gut aufgestellt zu sein.

## **Begriffserklärung**

Organoblech = Materialfaserverbund aus Endlosfasern und einem Polymer

LWRT = Low Weight Reinforced Thermoplast

Loft = Erzeugt im LWRT Kammern, welche akustisch wirksam sind und die Bauteildicke zugleich ansteigen lässt.

Konsolidieren = LWRT im verpressten Zustand

AU536 = AUDI Interne Bezeichnung für den Q7

B9 = AUDI interne Bezeichnung für den A4/A5

D-LFT = Langfaserverstärkter Thermoplast

PP-EPDM = Thermoplast

SMC = Sheet Molding Compound Faser-Matrix- mit Faserverstärkung

PP-GF = Polypropylen + Glasfaser

## **Quellenangabe**

[1] VDI Wissensforum GmbH: Kunststoffe im Automobilbau, Düsseldorf, 2011

[2] AUDI AG, Produktkommunikation, 2014



# Innenraumkonzepte – Zukunftsrelevante Designentwicklungen von Fahrzeug-Interiors

**J. Friedrich, Car Men GmbH, Idstein**

- Überblick der aktuellen designrelevanten Cockpitentwicklungen Deformation, Transformation, Information
- Auswirkungen des "Autonomen Fahrens" auf die Cockpitgestaltung
- Definition von Interior Designfaktoren für "Autonomes Fahren" in Abhängigkeit vom Fahrer/Beifahrer und der Vehikel-Infrastruktur
- Ausblick auf die zunehmenden „Auflösungstendenzen“ im Cockpit

## Überblick der aktuellen designrelevanten Cockpitentwicklungen

Die Faktoren: Deformation, Transformation, Information sorgen für neue Interiorkonzepte und werden an Beispielen von den letzten weltweiten Auto Messen erläutert.

Die aktuellen und zukünftigen Veränderungen stehen im engen Zusammenhang mit der Wahl der Antriebseinheit: konventionell und/oder elektrisch. Diese beeinflussen die Dimensionen und die Konfiguration des Fahrzeuginteriors.

Die individuelle Designpräferenz der verschiedenen Milieus und Nationalitäten spielen eine ebenso wichtige Rolle, wie die technologische Basis des Interiors. Unsere Untersuchungen in den letzten 15 Jahren haben gezeigt, daß in Perceived Quality Analysen das zielgenaue Treffen des individuellen Designgeschmacks des Endkunden seinen Qualitätseindruck stark beeinflusst.

## Auswirkungen des "Autonomen Fahrens" auf die Cockpitgestaltung

Direkte Auswirkungen auf das Fahrzeug:

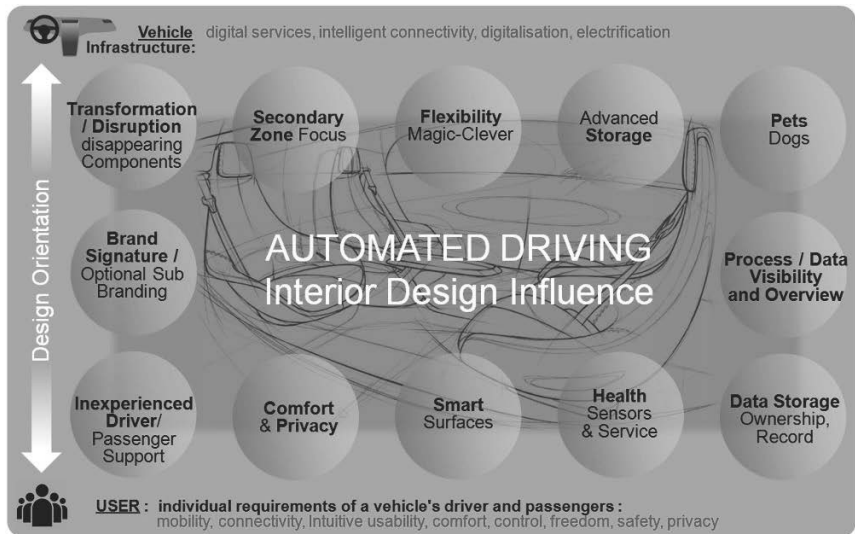
- Aufwertung des Interiors: digitale Oberflächen plus authentische Materialien
- variable/flexible Komponenten wie Lenkrad, Sitze, Mittelkonsole etc.
- automatische Konfiguration des Interiors auf das individuelle Nutzer-Profil
- erweiterte Nutzungssituationen: z.B. Gesundheits-Sensoren, Liefer-Service Datenspeicherung, -Nutzung/Information und -Weitergabe

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Grade / Entwicklungsstufen des autonomen Fahrens entsteht für jedes Interiorbauteil eine eigene Roadmap.

## Definition von Interior Designfaktoren für "Autonomes Fahren"

Oft stellt sich die Frage, welche Auswirkungen das Autonome Fahren auf das Fahrzeug-Interior hat. Wir haben versucht, einen Überblick zu erzeugen.

Jeder dieser Faktoren kann für die einzelnen Fahrzeugkomponenten unterschiedlich dekliniert werden. Daraus ergibt sich ein Komponenten-Profil von designrelevanten Interior-Faktoren bei autonomen Fahrzeugen in Abhängigkeit von Fahrer/Beifahrer Bedürfnissen und der Vehikel-Infrastruktur.



### Ausblick auf die zunehmenden „Auflösungstendenzen“ im Cockpit

Durch den sich vollziehenden Paradigmenwechsel von analoger Technik hin zu digitalen Mechanismen passieren zunehmende Bauteilveränderungen.

Diese, sich in unterschiedlichen Entwicklungsstufen darstellende Veränderungen von Interiorkomponenten werden am Beispiel der Situation von Mittelkonsolen betrachtet.

Dank der gestiegenen Nutzung von Automatik-Getrieben können bei der Gestaltung der Mittelkonsole deutliche Veränderungen und Materialeinsparungen beobachtet werden. Das Design greift die Idee des „Light Weight Looks“ auf.

Fazit : Drei Entwicklungsstufen können bei Mittelkonsolen umgesetzt werden:

- Der erste Schritt in Richtung „Modernes Interior“ ist eine scheinbar schwebende Mittelkonsole
- der zweite Schritt: ist die Integration der Mittelkonsole in andere Komponenten z.B. den Sitz
- der letzte Schritt ist das Verschwinden der Mittelkonsole

# Lightweight design for increased payload: new ways using polymer composites and physical foaming

**L. Jerpdal**, M.Sc. M.E., Dipl.-Ing **J. Hain**, Dr.-Ing. Dipl.-phys. **O. Täger**,  
Volkswagen Konzernforschung, Wolfsburg

- Self-reinforced poly(ethylene terephthalate) (SrPET) organo-sheets for lightweight design
- Overmolding of organo-sheets using physical foaming
- In-mold coating (IMC) on organo-sheets for class-A surface finish
- Technology for heavy truck exterior body panels

Composite organo-sheets are commonly based on endless glass- or carbon-fibrereinforcements and polymer matrices. A novel group of composite organo-sheets are self-reinforced polymer composites (SrPC), which are materials based on a thermoplastic reinforcement and matrix of the same polymer type as the reinforcement, that is, both poly(ethylene terephthalate) (PET). SrPC materials are ductile, have low density and good recycling properties. Organo-sheets show a limited degree of design freedom but overmolding can be used as technique to overcome this disadvantage and to efficiently increase function integration. Several concept parts from organo-sheets overmolded with glass-reinforced composite material have been shown in the past. When a reinforced material is used for overmolding not only is mechanical performance increased but also dimensional stability is improved, which is good result since warpage is a challenge due to the volumetric shrinkage of the overmolded material. Reinforced materials used for overmolding have higher density compared to unfilled material but are well suited for physical foaming due to the fact that the reinforcement acts as nucleation for foaming. Applying physical foaming for overmolding can not only save weight but can also reduce warpage caused by volumetric shrinkage because the pressurized gas counteracts the material shrinkage effect and lowers the internal stresses. The woven fibre structure in an organo-sheet influences the surface finish thereby making it very difficult to achieve a class-A surface finish. However, for a part that is overmolded by injection molding there are possibilities of using in-mold coating (IMC)

in sequence with overmolding to create a surface with a class-A finish. This presentation shows a concept with self-reinforced poly(ethylene terephthalate) (SRPET) using a new technology for physical foaming, called IQ foam, for overmolding and in mold coating in sequence, as a technology for the efficient manufacturing of lightweight parts with high-quality surface finish. This concept has been evaluated for the use in exterior body panels for heavy trucks.

# Carbon-Leichtbau: Leichter und günstiger als Stahl

## Gesamtheitliche Betrachtung von Leichtbaupotential & Prozesskosten von CFK

Dipl. Wiss.-Ing. **G. Kalkoffen**, CarbonTT, Stade

### Kurzfassung

Leichtbau mittels Carbonfaser-verstärktem Kunststoff (CFK) ist aus hochpreisigen Anwendungen hinreichend bekannt. Bestehen jedoch gewisse Freiheitsgrade, so dass Werkstoffeigenschaften und Produktionsparameter berücksichtigt werden können, birgen CFK-Bauteile nicht nur einen Gewichts- sondern auch Prozesskostenvorteil.

### 1. Leichtbau-Potential von CFK

Die Festigkeit (Zug, Druck) und Beulsteifigkeit von CFK ist etwa 6mal höher als von Stahl, während das eModul 40-70% niedriger ist. Um das geringere Flächenträgheitsmoment von CFK auszugleichen, sind größere Querschnitte gegenüber Stahl bevorzugt. Wenn Bauräume dies zulassen ist eine Massereduktion von 40-70% realisierbar.

### 2. Betrachtung der CFK-Prozesskosten

Ein Kilogramm Carbon-Fasern kostet etwa 10-15mal mehr als hochfester Stahl. Je nach Stückzahl, Komplexität und Anforderung gibt es eine breite Spreizung der resultierenden Bauteil-Herstellungskosten – für beide Werkstoffe. Gelingt die Abkopplung einer gesamten Baugruppe, für die ein fasergerechter Prozess aufgesetzt werden kann, so ergeben sich Kostenvorteile in Bezug auf Korrosionsschutz (insb. KTL) und Montageprozesse. Voraussetzung dafür ist eine umfassende Parametrisierung aller CFK Bauteile während der Konzeptphase, so dass Material- und Verfahrenskosten ebenso optimiert werden, wie Gewicht und Festigkeit. Die jeweilige Gewichtung der Parameter sollte im Einklang mit dem Kundenwert der Massenreduktion stehen.



# Entwicklung eines CFK-TP E-Getriebegehäuses

## Development of a carbon-composite transmission housing

Dipl.-Ing. (FH) **M. Kreutzmann**, Dr. **T. Schneider**,  
Dipl.-Ing. **R. Rademacher**, P+Z Engineering GmbH, München

### Kurzfassung

Für eine hohe Reichweite elektrisch angetriebener Fahrzeuge ist ein möglichst geringes Fahrzeuggewicht von herausragender Bedeutung. Aus diesem Grund müssen Komponenten aus dem Antrieb, wie die für elektrische Antriebe typischen zweistufigen Getriebe, ein optimales Gewicht bei Erfüllung aller Anforderungen aufweisen. Eine Gewichtsreduktion dieser Getriebe wird durch eine Substitution der Gehäusematerialien durch Werkstoffe mit niedrigerem spezifischem Gewicht erreicht.

Kohlefaserverstärkte thermoplastische Matrices stellen dabei bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften in Kombination mit den etablierten Möglichkeiten bei der Fertigung eine sehr interessante Werkstoffauswahl dar. Die anspruchsvollste Forderung an diese Werkstoffkombination in einem Getriebegehäuse ist die Einhaltung der geforderten Steifigkeiten auch bei Betriebstemperaturen von über 100°C. Diese haben einen erheblichen Einfluss auf Lebensdauer und Akustik des Getriebes und bestimmen daher maßgeblich die geometrische Gestaltung.

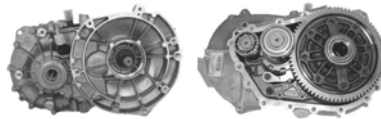
Im vorliegenden Projekt wird bei einem konventionellen E-Getriebe das Aluminiumgehäuse durch ein Gehäuse aus faserverstärktem Thermoplast ersetzt. Der grundsätzliche Ansatz zur Erreichung aller Anforderungen an das Getriebegehäuse sieht ein Organoblech (Thermoplast) vor, welcher mit einem kurzfaserverstärkten Kunststoff umspritzt wird. Die Verwendung von Aluminium-Inserts, welche die in die Lager eingeleiteten Lasten auf das Organoblech übertragen können, ermöglicht eine deutliche Reduzierung der Wellenverkipfung. Mit Hilfe zusätzlicher Spritzgussrippen und UD-Tapes können die Steifigkeitsziele erreicht werden.

In der Entwicklungsphase werden mit Hilfe von FE-Analysen die unterschiedlichen Konzepte innerhalb einer morphologischen Analyse untersucht und deren Machbarkeit bewertet. In Press- und Spritzgussimulationen wird die Fertigbarkeit der Konzepte bewertet und optimiert. Mit Hilfe von Topologieoptimierungen werden die Lastpfade des Gehäuses unter Berücksichtigung von Zug- und Druckbereichen ermittelt. Der daraus abgeleitete konstruktive Entwurf dient als geometrischer Startpunkt für die Lagenoptimierung des Organoblechs, die Optimierung der UD-Tapes und der Spritzgussrippen.

Die eng in die Entwicklung eingebundene Werkzeugfertigung stellt die Herstellbarkeit sicher, und fertigt die ersten Prototypen einer Gehäusehälfte in einem 2-phasigen Prozess. In der ersten Phase werden das Organoblech und die verstärkenden UD-Tapes erwärmt und anschließend in einem Pressverfahren umgeformt. Durch Wasserstrahlschneiden wird anschließend die Außenkontur hergestellt. In der zweiten Phase wird das Organoblech erneut erwärmt und anschließend umspritzt, um die Rippengeometrie und damit die finale Geometrie zu erzeugen.

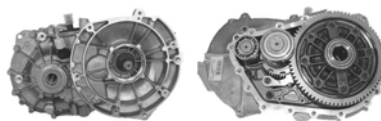
## MOTIVATION

- Development and manufacturing of composite parts with a thermoplastic matrix
- Produce a working demonstrator with an overmolded organo sheet based on an series used part with a conventional material concept (e.g. aluminum)
- Keep manufacturing costs of existing part (as close as possible)

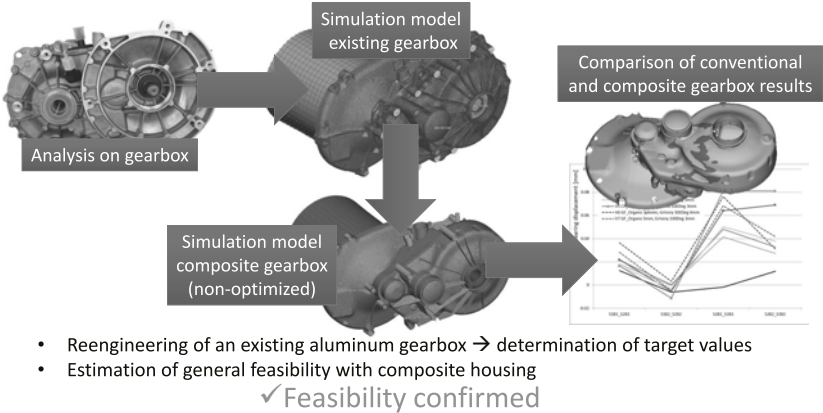


## MOTIVATION

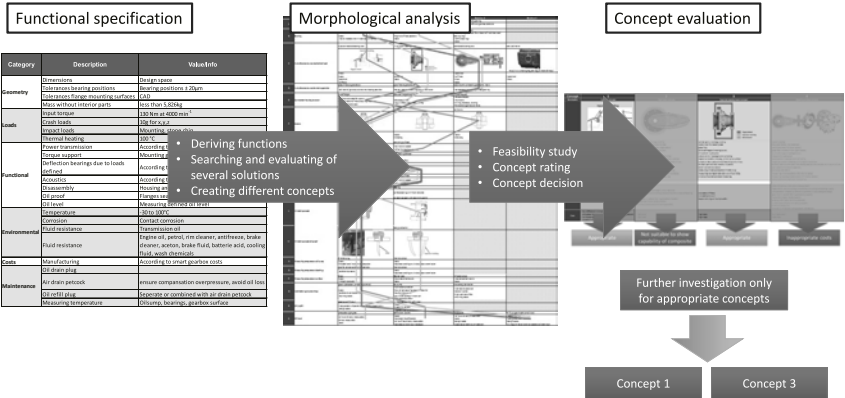
- Development and manufacturing of composite parts with a thermoplastic matrix
- Produce a working demonstrator with an overmolded organo sheet based on an series used part with a conventional material concept (e.g. aluminum)
- Keep manufacturing costs of existing part (as close as possible)



PHASE 1 – GENERAL FEASIBILITY

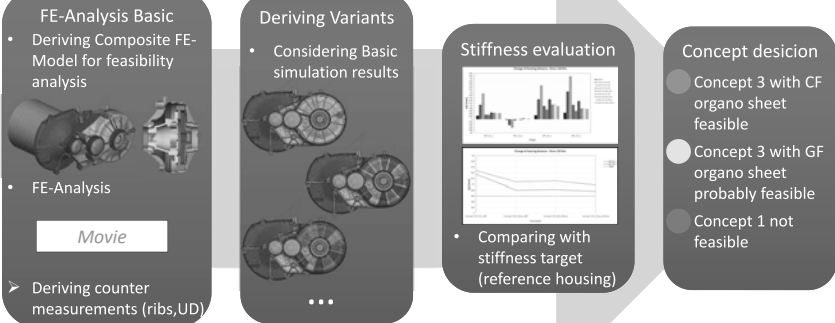


1ST CONCEPT

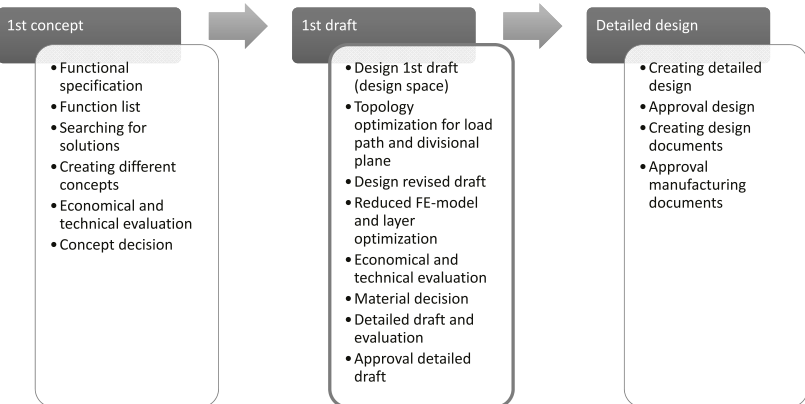


## 1ST CONCEPT

### Concept decision



## PHASE 2 – 1ST DRAFT



## 1ST DRAFT

### Topology optimization

Optimization process

Optimization results

Deriving shape

Movie

Topology optimization

Deriving revised draft

Setup

- Minimization of strain energy
- Mass constraint
- Stiffness constraints
- Strength constraints

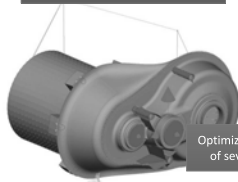
## 1ST DRAFT

### Layer optimization

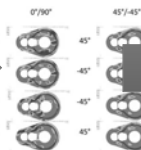
Shell model for layer optimization

Optimization result

Derived results



Optimizing thickness of several layers



Evaluation

Results

- Higher thickness for 45°/-45° plys
- Using especially 45°/-45° plys to further improve stiffness
- Reduction of laminate thickness by mainly using 45° plys
- Further local reinforcement measurements by using UD-Tapes

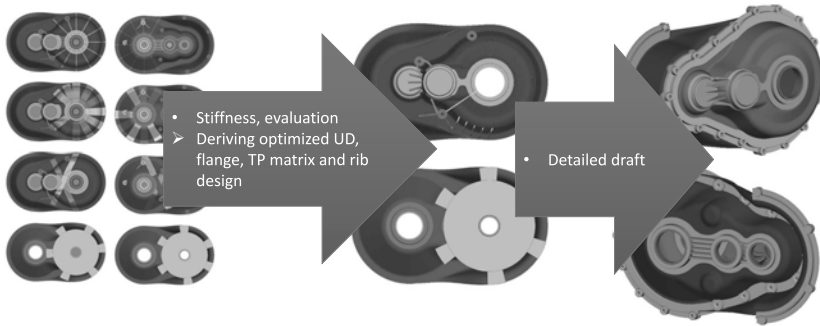
Setup

- 0/90/45/-45/-45/45/90/0°
- Optimization for CF
- Laminate thickness 0.6 to 6 mm
- Balanced 45°/-45° plys
- Considering stiffness results

## 1ST DRAFT

### Further stiffness optimization

Deriving variants based on FE-Optimizations



## 1ST DRAFT

### Feasibility analyses of manufacturing

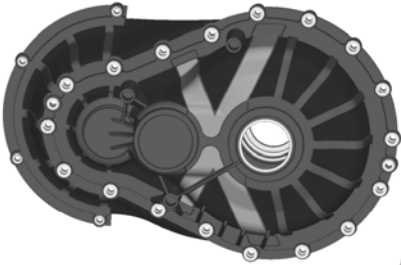
#### Injection molding simulation



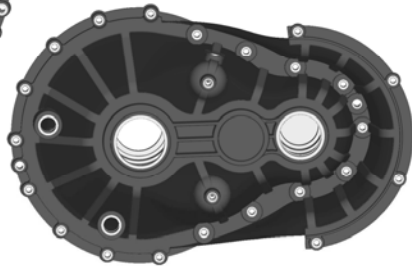
#### Stamping simulation

Movie

## DETAILED DESIGN

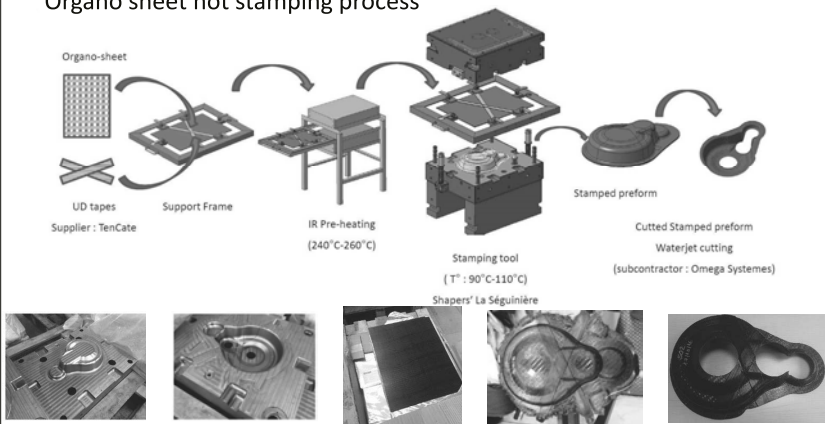


- Detailed design with CF organo sheet
- GF reinforced TP injection molding material
- Aluminum inserts for bearing position
- Metal inserts for screws



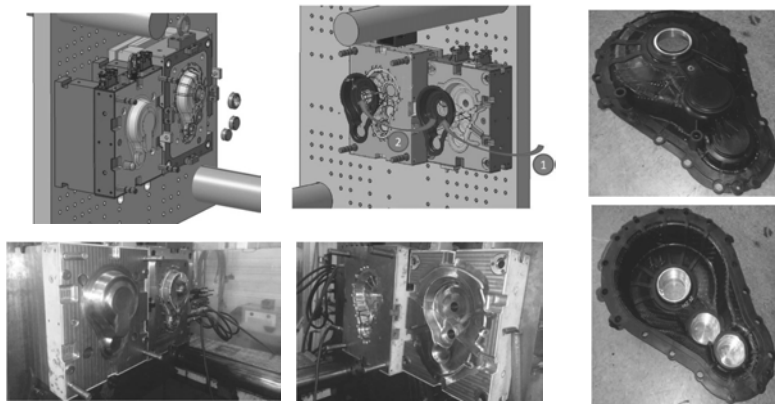
## MANUFACTURING

### Organo sheet hot stamping process



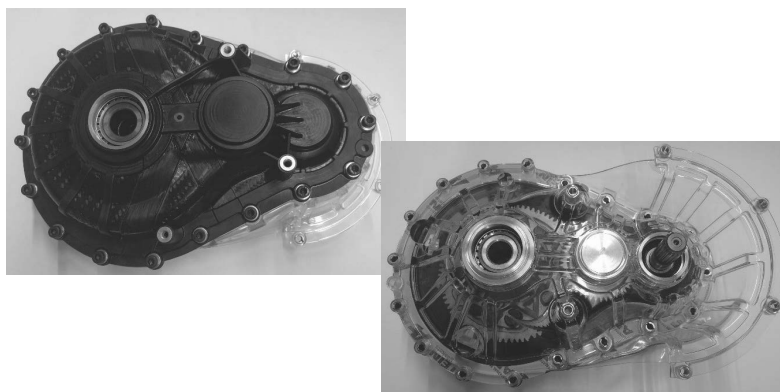
## MANUFACTURING

### Overmolding process



## DEMONSTRATOR

### Assembly



## FURTHER STEPS

- First test of prototype cover to validate FE simulations
- Validation of stamping simulation results
- Mapping of stamping results to consider in FE simulations
- Manufacturing 2nd part of gearbox
- Testing with complete gearbox assembly

# The use of an alternative material for engine encapsulation for Trucks

**T. van den Einden**, DAF Trucks, Eindhoven, The Netherlands;  
Dipl.-Ing. **K. Menke**, Johann Borgers GmbH & Co., Bocholt

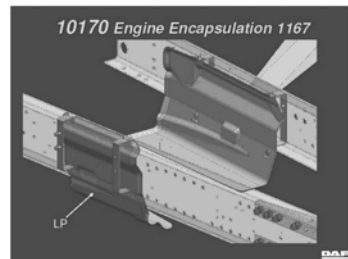
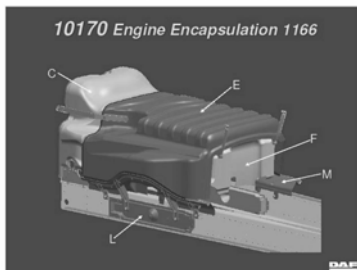
## Introduction

- Short introduction DAF Trucks Engine encapsulation
  - Specifications
  - Target on weight
  - Target on costs
- Material survey
- Triflex mineral
- Summary

## Introduction Euro 6 Engine Encapsulation



## Engine Encapsulation



## Specifications

The purpose of the Noise Encapsulation is:

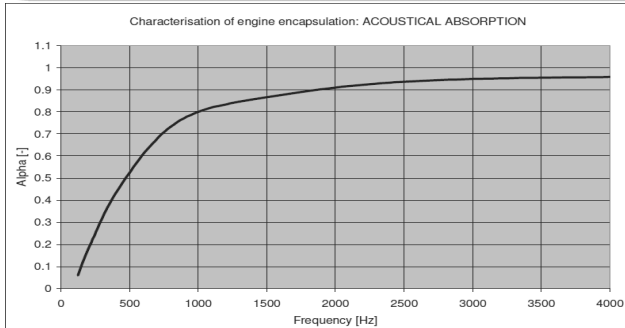
- Reduction of interior noise in such a way that requirements for interior noise are met.
- Reduction of exterior noise in such a way that legal requirements for exterior noise are met.
- Thermal insulation between engine compartment and components outside the engine compartment.
- Guidance of cooling air flow in such a way that recirculation is minimized and cooling performance optimized.

## Specifications

Main points for the specification are:

- Temperature range between -40 and 120°C
- Vibration range
- Stone chip resistance
- Steam cleaning
- Thermal isolation
- Noise absorption and isolation
- Flame ability V0
- Air flow resistance
- Legal requirement on used materials
- Lifetime at least 8 years or 1.600.00 km

## Targets



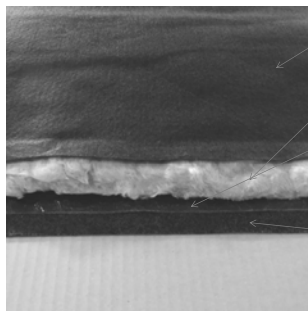
## Targets

- Weight reduction of 25% with the same acoustic behaviour
- Cost reduction of >10% compared with the current material

## Material survey

- SMC in combination with an absorber
- Cotton fibres with phenolic resin in combination with glass fibres.

## Material concepts



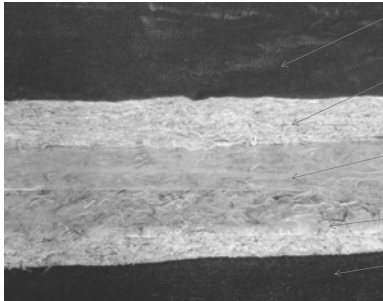
Carbon fabric (non woven)

Stone Wool

SMC (Sheet Molding Compound)

Polyester non woven fabric

## Material Concepts



Carbon non woven fabric

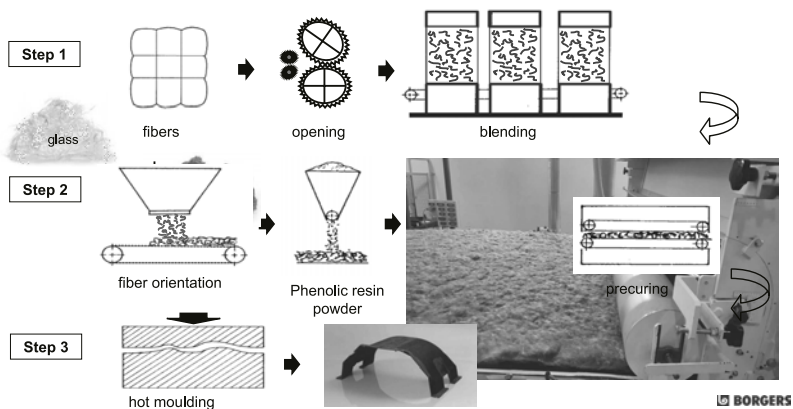
Glass fibre + Cotton Fibre+ Phenolic resin

Barrier foil (PE/PA/PE)

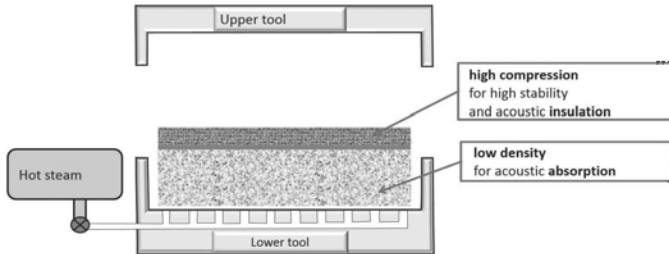
Glass fibre + Cotton Fibre+ Phenolic resin

Polyester non woven fabric.

## Aerodynamic production process for Triflex<sup>mineral</sup>



### Molding process hard/soft-technology



### Equipment requirements

- Press
  - Valve for the steam circuit, should be in the machine periphery
- Tooling
  - The fitting of the tool should be steam tight
  - The cutting surface should be dedicated for Triflex Mineral (dimensional)
  - The cutting device itself should have a special shape based on the Triflex mineral to overcome sharp edges.
  - Steam channels have to be included.

## Summary

### Targets:

- Weight reduction with the Triflex mineral has achieved.
- The cost price of a part in Triflex mineral is about 15% lower as the material composition with SMC.
- The material could be used in current tooling's after some small optimizations if the tool has already a steam system included.
- The functionality of the parts is still confirm specification

# A new analytical calculation method for the injection-molding process of a composite luggage rack holder

**M. Bakkal**, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey;  
**O. Otuz**, M.Sc., **S. Dođru**, M.Sc., Mercedes-Benz, Istanbul, Turkey

## Abstract

This article presents a new anisotropic analytical method for thermoplastic composite materials. This method considers the effect of fiber orientation on the mechanical properties of composites and concludes with various elastic modulus values of material in complicated part geometries. At the beginning of the paper, a new composite luggage rack holder is designed according to the plastic injection-molding design criteria to replace the previous metal luggage rack holder. Afterwards, Moldflow simulations and analyses are carried out, with the results of analysis including fiber orientation data. Next, fiber orientation input is mapped using Helius software. Mapped data containing anisotropic structure information with various elastic modulus are imported into ABAQUS structural software and analysis carried out. The study concludes that with this newly developed method, anisotropic structures with various elastic modulus values are mapped into finite element analysis software successfully and anisotropic analysis gives a more realistic estimate of strength and deformation results than does isotropic analysis.

## 1. Introduction

Polymer composite is the material which is spreading widely among industries. Especially industries such as the automotive industry, which seek to make lightweight products while providing the same strength results as with previous materials, are trying to use polymer composites. Apart from these advantages, they also have good fatigue resistance, their thermal expansion and electrical conductivity are low and they can be easily molded to produce complex parts [1]. Polymer composites vary as regards their matrix and reinforcement material. There are two different matrixes that can be used for composites: thermoplastic and thermoset. They differ from each other in respect of having cross-links and their state at room temperature [1]. There are also different fiber materials such as glass, carbon, and aramid which can be found in several forms [3]. According to their properties they are used in a variety of applications in the automotive industry. As the importance of the composites in automotive industry increases, so too does the importance of the analyses of their behaviors

before becoming a real product. Fiber orientation of the composites during manufacturing and its effects on strength and fatigue analyses have in particular become one of the areas which can be researched and widely developed.

Analyses of strength and fatigue by means of finite element analysis (FEA) software has been very popular method in previous research work. With software such as Abaqus, both isotropic and anisotropic analyses can be applied and results obtained for stress and displacement. However, fiber orientation of the composites during injection molding could not be predicted with these software programs. In order to eliminate this deficiency, many programs have been produced to carry out a simulation of the process and convert of the results into FEA programs. Simulations of the injection-molding process are carried out with Moldflow, C-Mold and so on. To transfer the results from these programs, different interfaces such as Digimat and Helius have been created. Some but not many studies have been made of this aspect. They make use of various simulation and analysis programs and the interfaces which can carry out conversions between them.

Prediction of the fatigue behavior and strength of the part using both finite element analysis and mold flow software with the help of interfaces have begun to be popular. Knowing the effects of the injection-molding process on the composites and the corresponding isotropic and anisotropic strength analyses before manufacturing the part is becoming very important. Because of this, many studies are carried out using different interfaces. Kancharla et al. use the translator insideMoldflow and convert the Moldflow results to Abaqus. They try to show the importance of orthotropic analyses and their reliability using both simulation and experimental methods taking the deflection of the part as reference. According to deflection results, they found that isotropic analyses will be inappropriate for short-fiber-reinforced thermoplastics and that orthotropic results vary from experimental results by 4% [2]. In another study, Lindhult and Ljungberg investigated the fatigue behavior of the short-fiber-reinforced polymers. They tried anisotropic analyses using software such as Moldflow, Abaqus, Digimat, and nCode DesignLife. They obtained the fiber orientation by carrying out a Moldflow simulation and exported the data to Abaqus using the Digimat interface. Digimat also has been used for converting from Abaqus to nCode DesignLife. Their investigations used the front-end carrier of an automobile as a case study. According to them, conversion between programs has been successful but the correlation between simulation and the experimental results was weak. They have stated that results were consistent although they did not match completely and can be developed by making further researches [3]. Another investigation was conducted by Carlsson to investigate the relation between the injection-molding method and stress analysis of short-fiber-reinforced composites. They chose three different shapes –

specimen, plate with hole and battery tray – for strength and stiffness analyses. For the plastic simulation and fiber orientation results, the Autodesk Moldflow program was used. To make the conversion between Moldflow and Abaqus, the Autodesk Moldflow Structural Alliance for Abaqus 2012 (MSA) was selected. Carlsson wrote Matlab code in order to provide the ultimate strength value (not supplied in Moldflow) to complete the conversion. According to the results obtained, a good correlation has been seen for the stiffness analysis but when compared with the stiffness results, strength results have shown uncertainties in respect to comparison of theory and experiment [4].

In the present study, analysis of the design of the luggage rack holder was carried out on Moldflow and Abaqus software in order to observe the relevance of the results to strength. Also using the Helius interface, the realism of the method used was investigated. In order to perform flow analysis, Moldflow software, which simulates the thermoplastic injection-molding operation, was used. These results have been transferred to Abaqus using Helius, an interface produced by Autodesk. According to this procedure the results of both isotropic and anisotropic strength analysis and flow analysis are investigated.

## **2. Material and method**

### **2.1. Material**

A polyamide 6/6 was selected as the thermoplastic matrix composite material. Analyses were performed for non-filled polyamide 6/6, UltramidA3K, and 35% short-glass-fiber-reinforced polyamide, UltramidA3WG6. Mechanical and thermal properties of the selected materials are shown in Table 1.

Table 1: Properties of non-filled PA 6/6 and 35% glass-fiber-reinforced PA 6/6

Material	Mechanical Properties				Thermal Properties		Density g/cm <sup>3</sup>
	Elastic Modulus (MPa)		Poisson Ratio		Surf. Temp °C	Melt Temp °C	
	E1	E2	ν12	ν23			
PA66 Non-filled	3100	3100	0.4	0.4	50	290	0.9463
PA66 GF35	11300	4428	0.38	0.55	85	290	1.3808

2.2. Method

Our new design of luggage rack holder in two cases is investigated in this study (Fig.1). The part was designed to achieve the goal of reducing its weight to below 1 kg. In order to achieve this, the material chosen for the part was glass-fiber-reinforced thermoplastic and it was decided to manufacture it by injection molding. The flow analyses, isotropic and anisotropic strength analyses were carried out by different software programs. The procedure for each analysis are explained in detail below.

Flow simulations for different types of injection- and compression-molding processes were carried out with Moldflow Insight 2016 software. The examination of the thermoplastic injection-molding process analysis begins with the meshing step. After meshing, injection locations and process parameters need to be set. In order to obtain more realistic results with the analyses, runner and cooling system designs can be made before starting the analyses. For reasons of manufacturability, hot runner systems were selected for the new part. There are many parameters which can be investigated once simulation of melt flow has been done. Weld lines, filling time, fiber orientation tensor, air traps, sink marks are some examples of these parameters. Finite element analysis was carried out using the commercial software ABAQUS 6.13. The study started with isotropic analysis. Material properties were taken from the software library. The selected modulus of elasticity values of the material were 5000 MPa; 11000 MPa; 19000 MPa, respectively, and the Poisson ratio was 0.35. The defined boundary conditions are shown below in Fig. 2. There is a fixed connection (zero degrees of

freedom) at the upper connections and only rotational movement about the y- and z-axes permitted at the lower connections.

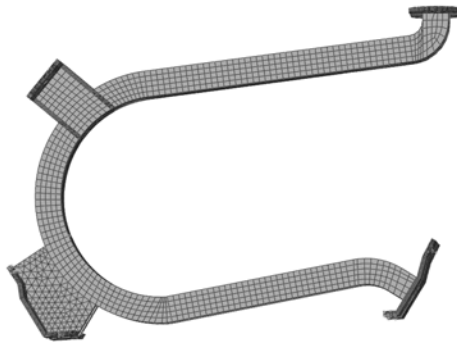


Fig. 1: ABAQUS model of the luggage rack holder

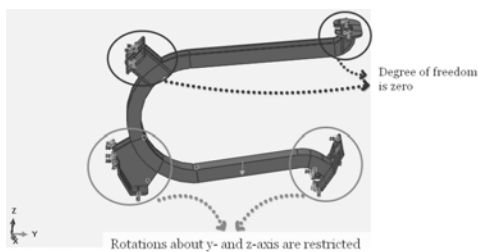


Fig. 2: Boundary conditions applied to the geometry

### 3. Results and discussion

The design was investigated in two different cases: no glass-fiber-reinforced PA66 and 35% glass-fiber-reinforced PA66. The 3D model of the new design is shown below in Fig. 3.

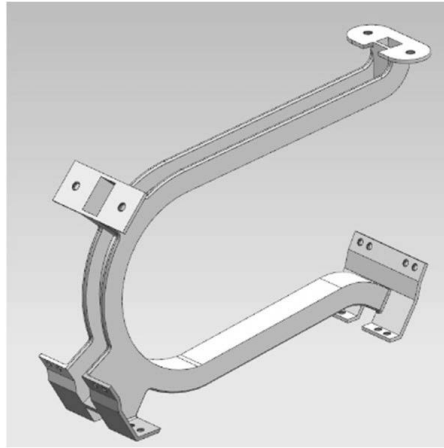


Fig. 3: Part geometry

### 3.1. Moldflow results

Moldflow results help us to understand the injection-molding process and the plastic injection-molded part. To analyze the design, the strength properties of the material must be specified for the FEA program. In this study, the Moldflow database was used for the work-piece's material properties.

#### a. Fiber orientation tensor results

The fiber orientation results show fiber orientation through the plastic injection molding. Orientation in one direction means that fibers are fully orientated in the direction of the plastic flow. However, orientation in one direction is nearly impossible with thermoplastic composites. Generally, the area where melt is injected through the gates shows irregularity with respect to fiber orientation due to divergent flow in that region [7]. It can be seen from Fig. 4 that regular orientation decreases significantly in the part in the gate area compared with other regions. The fiber orientation results can also be used to investigate the strength of the plastic injection-molded part. The fiber orientation tensor value observed is 0.8835 ('1' means fully oriented fibers) for the fiber orientation in the direction of the flow.

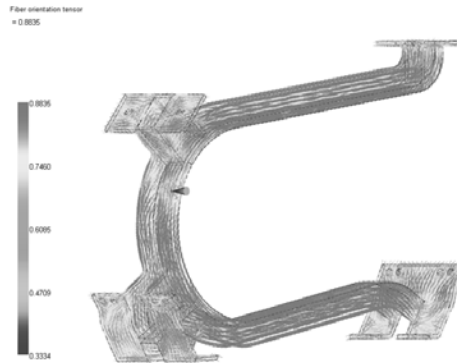


Fig. 4: Fiber orientation tensor for 35% glass-fiber-reinforced PA 6/6

#### a. Weld line results

Weld lines occur where melt flows coming from different directions meet. Generally speaking, the weld line gives an indication of areas which are structurally weak [7]. In addition, surface appearance is affected adversely. For that reason, consideration should be given to regions where the weld line occurs, especially in the case of applications in which part strength and the appearance of the surface are important. The negative effects of the weld line can be prevented by modifying the part geometry, process parameters and mold design [8]. Coloured areas in Fig. 5a and Fig. 5b represent the weld line where two different materials meet.

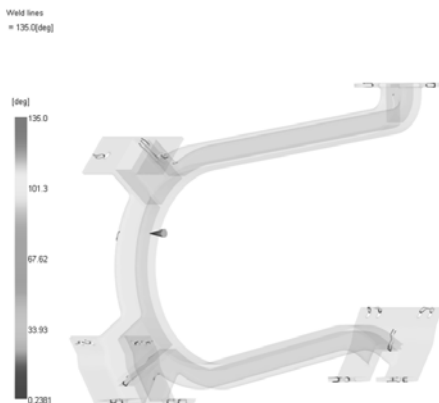


Fig. 5a: Weld line results for non-filled PA 6/6

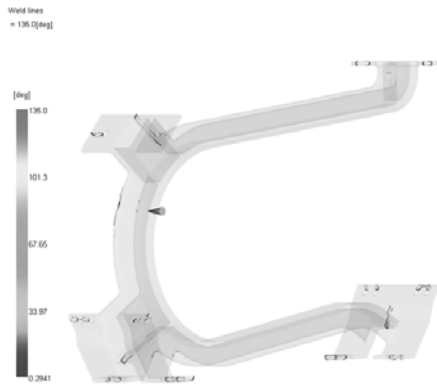


Fig. 5.b: Weld line results for 35% glass-fiber-reinforced PA6/6

#### b. Average Volumetric Shrinkage Result

Volumetric shrinkage shows the percentage raise of local density starting from the end of the packing time until the time it solidifies to the ambient temperature. Volumetric shrinkage has to be uniform to prevent the warpage. On the other hand, average volumetric shrinkage indicates the mean value of volumetric shrinkage through the half-gap thickness. This value can be used for the detection of the sink marks on the surfaces [9]. Fig 6.a and Fig 6.b shows the average volumetric shrinkages percentages for non-filled PA6/6 and 35% short-glass-fiber-reinforced PA6/6, respectively. According to the results, when the non-filled material is used, the value is seen as 14.86% while in the case where glass-fiber-reinforced material is used, average volumetric shrinkage has reduced to 11.81%. This result suggests that reinforcement with fibers reduces the average volumetric shrinkage.

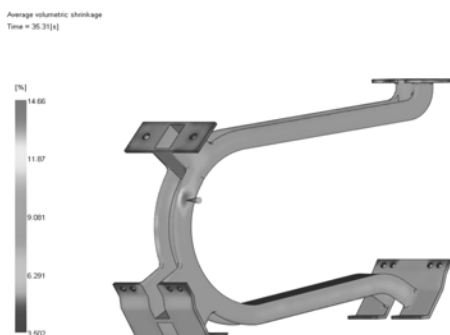


Fig. 6.a: Average volumetric shrinkage results for non-filled PA 6/6

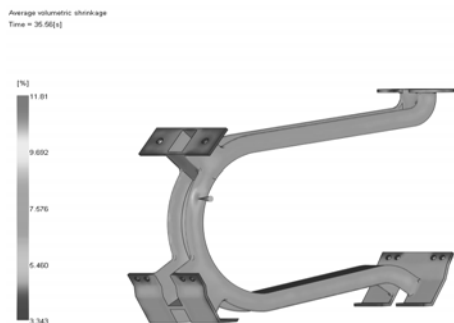


Fig. 6.b: Average volumetric shrinkage results for 35% glass-fiber-reinforced PA6/6

### c. Air Trap Results

The air trap value indicates the air that is caught within the injection-molded part. Generally, it reveals the presence of defects on the surfaces. Although it causes problems on surfaces, such as burn marks, short shot, surface blemishes and voids, some of them which are near the surface can be eliminated with the proper venting during the injection-molding process. Air traps can be prevented by changing part and mold design and setting proper molding conditions [8]. In Fig. 10.a and Fig. 10.b it shows that short-glass-fiber reinforcement in PA6/6 does not make any significant changes to the air trap results and all of them are near the surface, which can be prevented by appropriate molding conditions and venting.

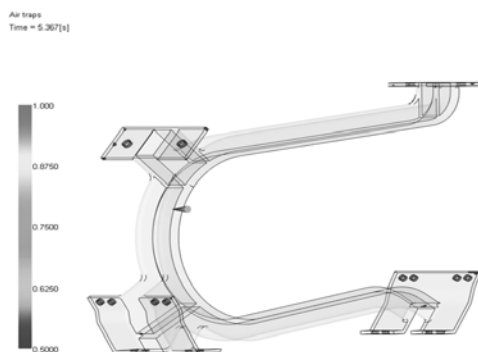


Fig. 7.a: Air trap results for non-filled PA6/6

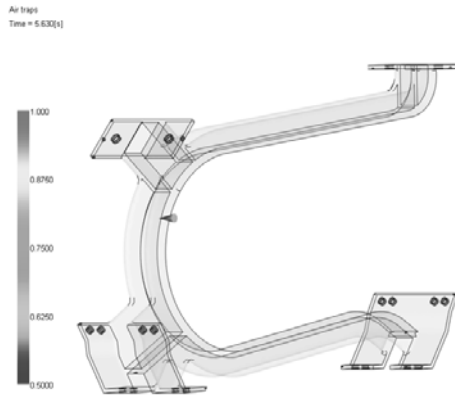


Fig. 7.b: Air trap results for 30% glass-fiber-reinforced PA6/6

### 3.2. Isotropic Analysis Results

The design selected for the luggage rack holder is modelled using different Young's modulus values in isotropic fashion in order to evaluate critical regions. 5000 MPa, 7800 MPa, 11000 MPa and 17000 MPa are selected as critical strength values for the material PA66%35 GF. Isotropic analyses will be used to make a comparison with anisotropic calculation results and frequency response analyses (vibration) results.

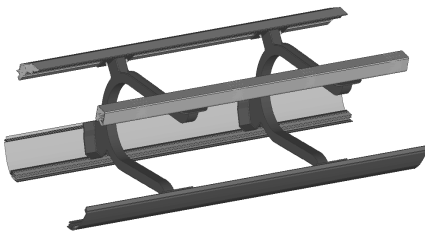


Fig. 8: Finite element model of the luggage rack system on Intouro buses

The luggage rack system was modelled with solid elements such as hexahedral and tetrahedral elements. By using solid elements for rack holders it was easier to simulate real deformations and stresses in the desired product.

In order to fix the rack system as in the real bus, rigid elements were applied on two sides of the upper horizontal profiles and loads were applied to different positions on the front profile, as can be seen in Fig. 9.

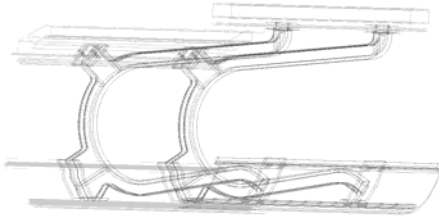


Fig. 9: Bolt connection regions on the luggage rack holder

Bolts were applied to eight different positions and were fixed by pre-tension forces, which were taken from Daimler Screw standards (Fig. 9). Firstly, critical deformations and stresses are examined, then pre-tension effects analyzed.

Two different load cases were applied in the first step of finite element analysis. Pre-tensions were applied to all of the bolt connections in order to obtain a more realistic bolt strength evaluation. In order to examine the real bus conditions, luggage masses were also taken in consideration, so that simulations were carried out either with a luggage effect or without a luggage effect. The results show us that the main critical region is located on the connection parts of the holder, since bolts are used to provide connections at these positions.

Additionally, stresses become higher on these connection parts, especially near bolt holes, as shown in Fig. 10, which indicates that pre-tension should be examined in detail in order to develop the geometry more accurately.



Fig. 10: Von-Mises stress results after a pre-tension load on the bolts

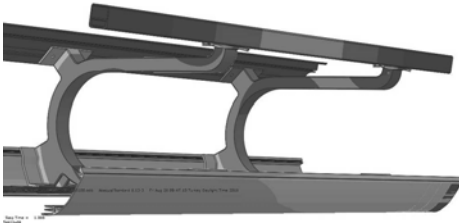


Fig. 11: Deformation results after a pre-tension load on the bolts and applied loads

After applying pre-tension to the bolts, the rest of the loads were applied from specific regions on the luggage rack system. In Fig. 11, limitations for geometrical deformation can be evaluated so that deformations obviously increase and become critical on the back side of the holder. It is easily predicted that screws and bushings will be affected immediately by both pre-tension and applied loads; afterwards stresses propagate into the structural regions of connection holder parts. FEAs were prepared as four cases; firstly, with the lowest E module and without luggage; secondly, with the lowest E module and with luggage; thirdly, with the highest E module and without luggage and, finally, with the highest E module and with luggage. Considering static FE analyses, the worst case was with the lowest E module and with luggage, whereas the best case was with with the highest E module and without luggage. After adding luggage as it is stowed in real Intouro buses, the results from static FEAs demonstrate approximately 15 - 20% higher stresses than the results without luggage on the system. Fig. 12 and Fig. 13 illustrate comparative von-Mises stresses and on the central C-shape of the holder there occurs the biggest difference at around 22%. Luggage has an average mass of 300 kg as in real conditions and it seems that it has a normal impact across the holder's section.

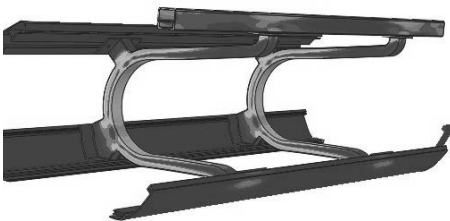


Fig. 12: Von-Mises stress results after applied loads, with maximum E module value but before adding luggage (17000 MPa)



Fig. 13: Von-Mises stress results after applied loads, with maximum E-module value after adding luggage (17000 MPa)

Fig. 14 and Fig. 15 demonstrate the static FEA results under von-Mises conditions and with the lowest E module value of 5100 MPa. In a comparison with the results of the highest E module and the lowest E module, 15 – 45% differences can be captured, close to areas of back-side connection parts particularly.

After adding luggage as it is stowed in real Intouro busses, results from static FEAs show approx. 15 – 30% higher stresses than the results without luggage on the system. Fig. 14 and Fig. 15 illustrate comparative von-Mises stresses and either on the middle C-shape of the holder or in the close vicinity of connection parts the biggest difference of around 25% is found.

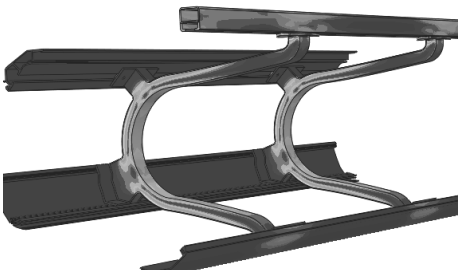


Fig. 14: Von-Mises stress results after applied loads, with minimum E-module value before adding luggage (5000 MPa)

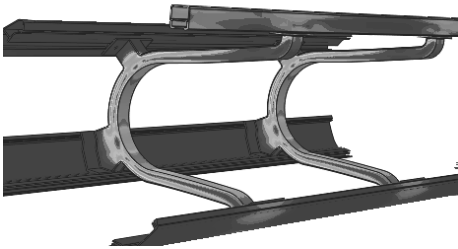


Fig. 15: Von-Mises stress results after applied loads, with minimum E-module value after adding luggage (5000 MPa)

### 3.3. Isotropic Modal Frequency Analysis Results

Parallel with strength analyses, modal frequency analyses should be conducted in order to understand the dynamic behavior of the luggage rack holder under different levels of vibration. Especially for those products which can be damaged not only under high loads but sometimes under minor loads with many repetitions, critical damage to and cracking of the product can occur.

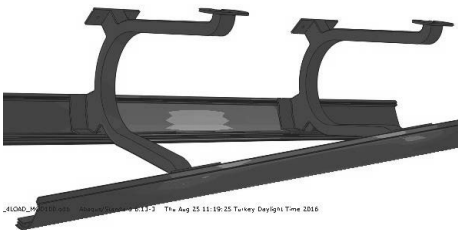


Fig. 16: Frequency response function (FRF) results at 7 Hz without luggage

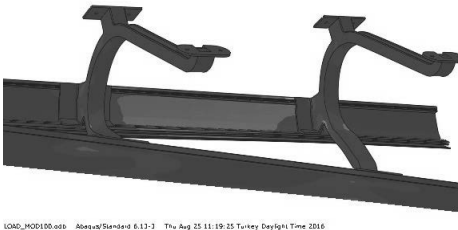


Fig. 17: Frequency response function (FRF) results at 10 Hz without luggage

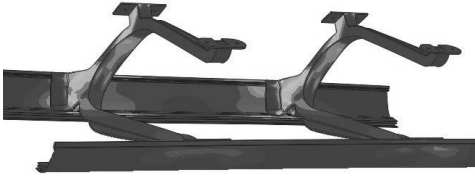


Fig. 18: Frequency response function (FRF) results at 30 Hz without luggage

FRF results are separated into two groups: vibration results without (Figs. 16 - 18) luggage and with luggage (Fig. 19 - 21). All the simulations were carried out with the lowest E module in order to reveal the most critical region on the rack system and the holder. Among the first group of simulations, the frequency range was between 7 Hz and 85 Hz, which it should be taken as the worst case, since the system has no additional mass and the holder has the weakest material property of PA66 %35 GF. Vibration results should be examined according to their frequency range pairs in order to validate with the aid of measurements and following this to eliminate these critical frequencies. The most critical range was between 6 Hz and 31 Hz. That means with or without luggage, frequencies have to be located outside these intervals. If there are some critical frequencies between 6 Hz and 31 Hz, some geometrical solutions should be found which reduce the critical frequencies.

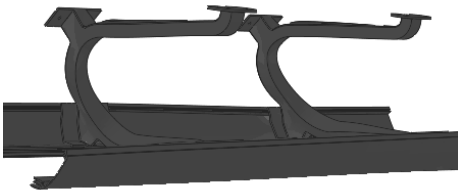


Fig. 19: Frequency response function (FRF) results at 7 Hz with luggage



Fig. 20: Frequency response function (FRF) results at 11 Hz with luggage

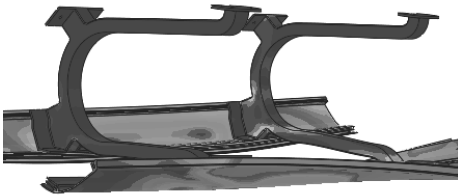


Fig. 21: Frequency response function (FRF) results at 30 Hz with luggage

FRF analyses indicate that there are huge differences between two simulation groups, without and with luggage effect.

Moreover, these results show that the luggage effect has a big impact by changing the dynamic behavior of holders in the rack system and the frequency range between 6 Hz and 85 Hz was obtained during the simulations without luggage, whereas 6 Hz and 31 Hz originated as the frequency range during simulations with luggage. These numbers demonstrate that frequencies 7 Hz, 10 Hz, 18 Hz and 30 Hz have to be dispelled by changing the geometry.

### 3.4. Anisotropic Analyses Results

Anisotropic material modeling of short fibers was carried out using firstly, Moldflow for the injection-molding process and, secondly, Helius for the mapping between Moldflow and ABAQUS and finally ABAQUS for anisotropic simulations and visualizations. Relatively different stresses occur in both von-Mises (Fig. 22) and max. principal conditions (Figs. 23 - 24). Region by region the holders were examined and it was found that the middle C-section has the most critical and flexible positions, which means there are some hot-spot points

which do not occur with the isotropic modeling technique. Differences are calculated at around 15 – 20% for critical positions, such as the middle C-shape section and the close vicinity of bolt holes.

Results indicate that anisotropic material modeling improves the evaluation of short-glass-fiber-reinforced injection-molded composite products such as the luggage rack holder. Failure energy falls on the mid-region of the holder and this tells us that this region has to be modified. Not only von-Mises stresses but also max. principal stress results demonstrate that 60% of critical regions are found in the same location – the mid-region of the C-shape, either by average stress results or by principal stress results.

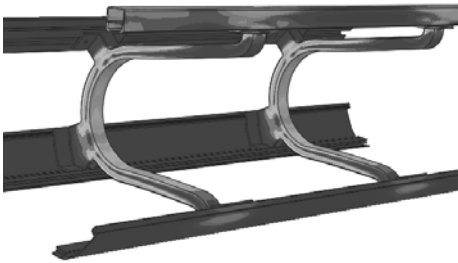


Fig. 22: Anisotropic von-Mises results with Helius

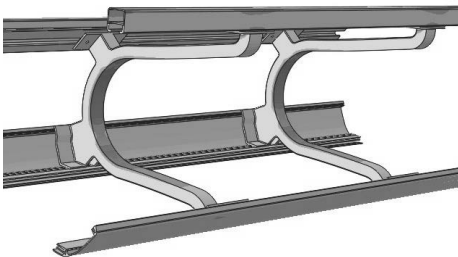


Fig. 23: Anisotropic max. principal stress results with Helius

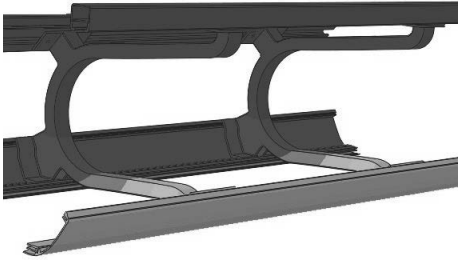


Fig. 24: Anisotropic max. deformation results with Helius

## Conclusion

This paper aims to study the effects of different loading and material conditions, including luggage effect, isotropic and anisotropic material modeling module criteria, on the mechanical responses of the short-glass-fiber-reinforced injection-molded composite luggage rack holder under static loads and dynamic vibrations. The isotropic material modeling and static FE calculations are established using ABAQUS PYTHON scripting language. An anisotropic material distribution among short glass fibers is developed by using Moldflow, Autodesk Helius and ABAQUS interfaces. Vibration analyses and frequency response function (FRF) calculations were established using ABAQUS PYTHON scripting language. From numerical analysis of the injection-molded composite product with different materials, loading and boundary conditions, four main conclusions are obtained:

- (a) In general, major hot-spot points above the limit value are located on the C-shaped middle region of the rack holder. Cracks start in the the mid-region and propagate non-symmetrically to the top and the bottom sides.
- (b) Pre-tension was applied at eight different bolt locations with same amount of torque. After applying torque to the bolts, high stresses over yield strength were captured and high inter-contact shear stresses occur which directly affect the behavior of the bolt connection.
- (c) The first critical frequency 7 Hz is obtained either with the luggage case or without the luggage case. Moreover, these results show that the luggage effect has a big impact by changing the dynamic behavior of holders in the rack system. The frequency range between 6 Hz and 85 Hz was obtained during the simulations without luggage, whereas 6 Hz and 31 Hz originated as a frequency range during simulations with luggage. These numbers demon-

strate that frequencies 7 Hz, 10 Hz, 18 Hz and 30 Hz have to be dispelled by changing the geometry.

(d) Anisotropic material modeling of short fibers was carried out using firstly Moldflow for the injection-molding process, secondly, Helius for the mapping between Moldflow and ABAQUS and finally ABAQUS for anisotropic simulations and visualizations. Relatively different stresses occur under both von-Mises and max. principal stress conditions. Region by region the holders were examined and it was found that the middle C-section has the most critical and flexible positions, which means there are some hot-spot points which do not occur with the isotropic modelling technique.

Although isotropic static analysis criteria theoretically show some advantages by minimizing details and revealing hot spots easily, there are still some intractable problems, such as accurate determination of the dynamic fracture location during low levels of vibration and related strength parameters. Because of simpler formulas and numerical implementation by FEA, we also examine vibration and frequency response function criteria, which are widely applied to the FRF analysis of composites as an integrated module in some commercial finite element software including ABAQUS, LS-DYNA and MSC Dytran. By weighing numerical precision and cost, there should be an appropriate selection and use for these failure criteria in the impact analysis of composites.

Overall, these calculation and simulation criteria as macroscopically phenomenological theories should make it possible to solve some practical failure problems of composite structures accurately and efficiently.

## 2. References

1. Kancharla A. K., Sharma H. K., Nugent P., Orthotropic structural analysis of short fiber filled thermoplastics: Abaqus – Moldflow interface, Experimental validation, SIMULIA India Regional Users Meet 09
2. Kancharla A. K., Sharma H. K., Nugent P., Orthotropic structural analysis of short fiber filled thermoplastics: Abaqus – Moldflow interface, Experimental validation, SIMULIA India Regional Users Meet 09
3. Lindhult J., Ljungberg M., Fatigue analysis of anisotropic short fibre reinforced polymers- by use of digimat and nCode Designlife, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2015
4. Carlsson J, Coupling of injection moulding process to stress analysis of short fibre composite structures, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012
5. Strong A.B., Fundamentals of Composites Manufacturing - Materials, Methods, and Applications, 2nd ed., SME, 2008
6. Groover, M.P., Fundamentals of Modern Manufacturing: Material, processes and Systems, 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2007
7. Imihezri S.S.S. , Sapuan S.M. , Sulaiman S. , Hamdan M.M., Zainuddin E.S., Osman M.R., Rahman M.Z.A. , Mould flow and component design analysis of polymeric based composite automotive clutch pedals, Journal of Materials Processing Technology, 2005
8. Shoemaker J., Moldflow Design Guide : A Resource for Plastics Engineers (1st edition), Massachusetts, 2006
9. Autodesk Moldflow webpage

# True confidence in thermoplastic composite simulations for any automotive component

W. Schijve, G. Francato, R.Yaldiz, SABIC, Geleen, The Netherlands

## Abstract

Today, carbon emissions reduction is one of the key drivers for new developments in the automotive industry. Amongst others, one solution is to reduce the weight of a vehicle significantly. Composite materials can offer these weight savings, yet widespread adoption is as yet lacking. We believe that cost hurdles can be overcome by using UD or multi-axial laminates in combination with an overmolding process with LFT material.

Besides cost, a major hurdle that we see is the lack of confidence in performance predictability. Especially for the more cost-efficient hybrid combinations of UD-tape-based laminates with overmolding material, robust predictability procedures are not yet state of the art.

For this reason, a test component was designed that can be produced in a representative production process and can validate all of the many different composite failure modes. The main purpose is to have sufficient process and simulation validation for any yet-to-be-designed component. At the same time, the design takes care to ensure the actual failure occurs in the continuous-fiber composite material and not in the much weaker short/long injection-overmolding material. Current simulations now show good agreement with test results and as such give confidence in predictions.

## 1. Introduction

Continuous-fiber-reinforced thermoplastic materials have been attracting the attention of the automotive industry for several years now. They are attractive due to their high mechanical performance and low weight. These new materials do however require new, robust manufacturing processes which must comply with the short cycle times of around one minute required for mass production in this industry. In addition, new predictive methods need to be developed providing the necessary confidence for accurate predictability of the manufacturing process and (mechanical) part performance.

A few years ago, SABIC interviewed most major OEM's, tiers and equipment suppliers, asking them what they see as the main hurdles for the introduction of composites. This resulted in a clear top three:

1. Design predictability.
2. Cost
3. Cycle time

Of much less importance were the following aspects:

- Material properties characterization
- Joining predictability / performance
- Quality and consistency
- Recycling

## **2. Cost-effective material forms and process**

We believe that the issue of cost and cycle time can be handled especially well by clever design and making use of the hybrid overmolding technology as explained elsewhere [1, 2]. The advantage of this process, when properly designed, is that it significantly reduces the percentage of composite material, maximizing the use of the cheaper overmolding resin. This is explained further in Figure 1.

In this approach, high-performance multi-axial UD tape-based laminates are used selectively along the main load axis. At the same time, functional details can be integrated, using the injection-molding material, eliminating separate production steps. In this way, the same high mechanical performance of thermoset composites can still be realized, without the high cost associated with these materials.

The hybrid overmolding process itself is schematically shown below (see Figure 2) and by now has been well developed for industrial use [4].

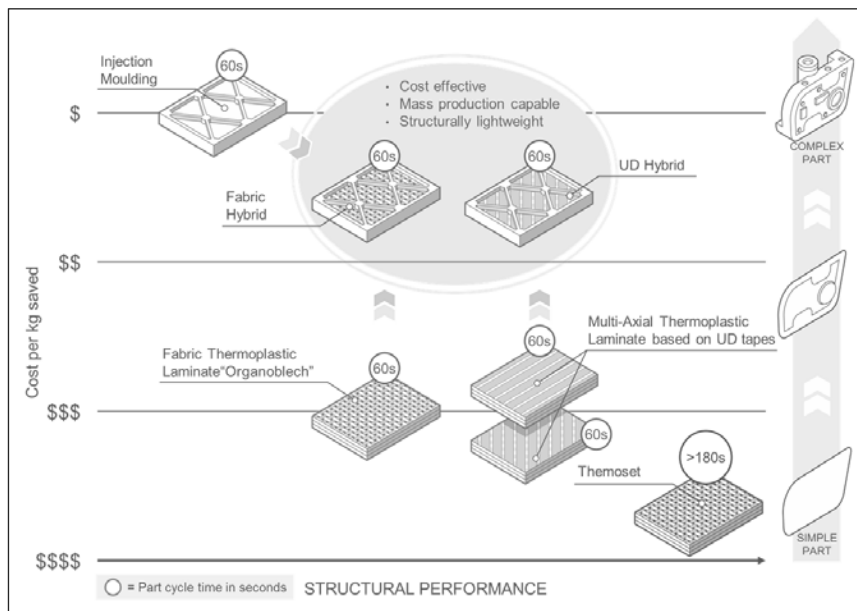


Fig. 1: Performance versus cost of weight saving for various material systems.

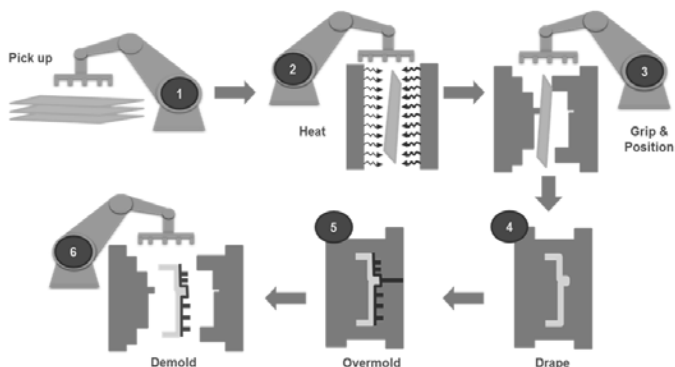


Fig. 2: Hybrid overmolding technology for thermoplastic hybrid components. 1: Pick-up of composite blank. 2: IR heating. 3: Blank fixation in the mold. 4: Thermoforming of blank. 5: Injection overmolding. 6: Part demolding

As regards the composite material form, we see multi-axial laminates made from UD-tape material of constant thickness as being the most suitable for automotive applications, since UD layer orientations can be best optimized to load paths and thus are most efficient for weight saving.

SABIC has developed UD tapes, using various resins and fibers, and multi-axial or unidirectional laminates and can offer a wide range of fully compatible overmolding products. A first UD tape product is called UDMAX™ GPP 45-70 tape, based on glass-fiber-reinforced polypropylene (see Figure 3).

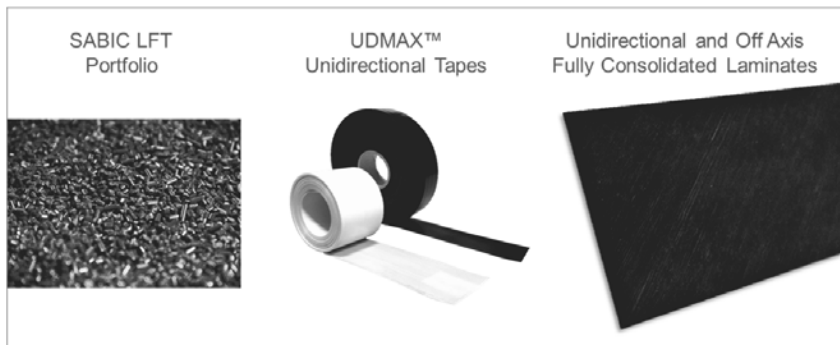


Fig. 3: SABIC composite material portfolio.

The material has 45% glass fiber by volume, which corresponds to 70% fiber by weight. In addition, molding and application development support can be provided, which includes the expertise and capability needed to predict a part's mechanical behavior [3]. Note that fabric-based materials are also evaluated, which may involve specific applications not discussed here.

Although unidirectional tapes are commercial products too, multi-directional laminates will be by far the more cost-effective solution for automotive use because the material supplier can produce them on a large continuous scale. In contrast, tape-laying systems will always take a few seconds per deposited piece of tape, and an automotive-sized laminate will take many minutes to manufacture. Also the flexibility to make large-width laminates, up to about 2 meters, in any width or length, gives good nesting options to minimize waste. Note that off-axis plies deposited with a tape-laying machine or pick-and-place units in many cases still results in waste. This is illustrated with an example in Figure 4 below.

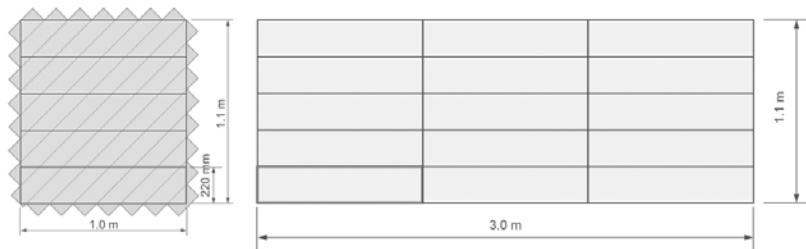


Fig. 4: Tape-laying solution for 220x1000mm multi-directional blank manufacture (left); the laminate solution (right).

Suppose we would need a blank with dimensions of 220 x 1000 mm, 4 mm thick with a typical mix of  $0^\circ$  and  $\pm 45^\circ$  layers, as for example could be used for a door impact beam. A fast tape-positioning system using 100 mm wide tape would need to deposit 208 pieces of tape to make a total laminate that can be used to cut out five blanks at a later stage. As a result, even the fastest system available today would need more than one minute per blank. On the other hand, multi-directional laminate plates mass-produced by the material supplier to optimal size would just need nesting and cutting of the blanks. And in the case of a rectangular blank, as in the above example, practically zero waste is the result. The important conclusion here is that for mass production, with cycle times of one to two minutes, you already would need one tape-laying/positioning machine for each relatively small part, with the associated investment cost and floor space. So large, optimally sized laminate plates with the required lay-up would be the better option.

As an application example, consider the cross-car beam, shown in Figure 5, carrying the dashboard, steering wheel and a number of components. For the existing C-class car model, this application was an aluminum-welded assembly consisting of about 20 separate sheet metal and one casting part. Note that most mass-produced cars in the same class today would be made of steel rather than aluminum.

The part was redesigned for a composite overmolding process, as a one-shot molded component, as shown in Figure 5 on the right. Although it may look rather different, the same equipment can still be mounted and can still fit in the same available space.

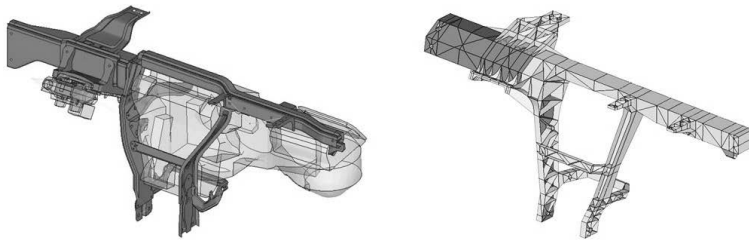


Fig. 5: Reference metal (left) and composite (right) cross-car beam. Only the left part of the composite beam has UD tape laminate (dark colour).

The dark grey parts indicate the use of multi-directional composite laminates, while the light grey parts represent the overmolding material, in this case a 30 wt% long glass PP material. The main design driver for this part is the lowest eigenfrequency, which is a driver for vibrations which can be felt on the steering wheel. As the steering column is a heavy part, stiff support provided by the cross-car beam is crucial. The laminate in the section supporting the steering column will need both the  $0^\circ$  and  $\pm 45^\circ$  directions of UD tape to provide both the bending and torsional stiffness in this section.

The composite part was optimized for equal performance at  $65^\circ\text{C}$ , which includes a first eigenfrequency of higher than 43 Hz at this temperature. Although this temperature hardly influences the continuous-fiber composite material as the fiber stiffness does not change with temperature, it does have some effect on the overmolding material, where the influence of matrix properties is much greater. In the optimization, these effects have been taken into account, based on measured data.

Furthermore, although the actual reference component happened to be an aluminium beam, the same beam was also optimized separately as a steel sheet-metal assembly and as a magnesium casting, such as can be seen on premium car models today. Figure 6 shows the results of weight optimizations using various material forms. It should be noted again that each of the composite variants has exactly the same mechanical performance as its metal counterparts.

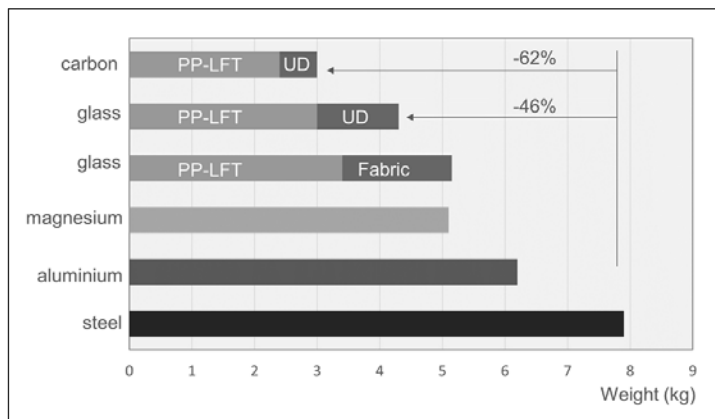


Fig. 6: Cross-car beam weights for various materials.

In Figure 6, the PP-LFT segments indicate the amount of overmolding material, the other segments show the amount of continuous-fiber material. Clearly, the majority of material is long-fiber thermoplastic (LFT) overmolding material, which dilutes the cost for this component significantly.

Compared to the steel solution, a weight saving of four to five kg is possible, depending on the choice of carbon or glass fibers. Looking at the \$/kg weight-saved value, glass fiber is the more favorable alternative and compares very well with weight-saving alternatives considered by many OEMs, such as magnesium or aluminium. In this case, one could even consider use of carbon fiber because the amount of material needed is very small. Being a stiffness-driven design roughly one third of the amount of carbon fiber would be needed as compared with glass. Despite this, the glass variant would still be the more attractive today.

### 3. Confidence in predictability

Although, as shown above, the cost and cycle-time hurdles can be overcome and hybrid thermoplastic composite components are quite cost-effective, confidence in predictability still needs to be gained. For this reason, a beam-like test component was designed which would tackle variations in process and validate predictions of actual in-part composite material performance.

Confidence in predictions of composites can be obtained at various levels (for example, one would usually start with testing material properties on laminates, and end up with testing a final component until failure under realistic application conditions). This could be, for example, a side door in a car, tested in a crash situation. This is illustrated below (see Figure 7).

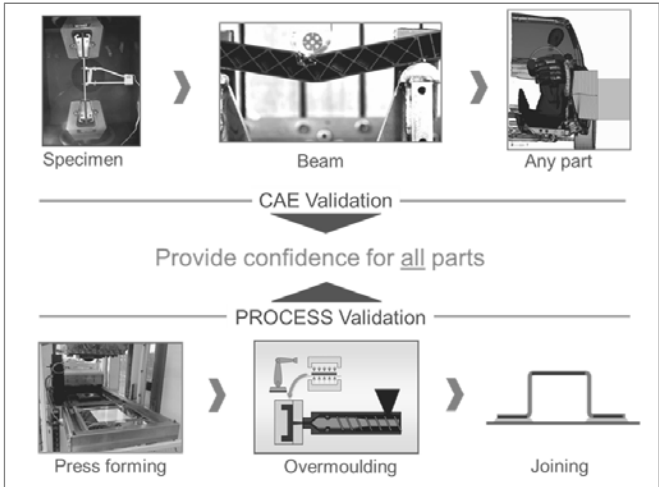


Fig. 7: Performance validation steps in component development.

Composite material properties would typically be tested on the as-supplied material, this being constant-thickness laminates. To obtain all necessary failure parameters this would be carried out with unidirectional composites, testing the material in tension, shear and compression in different orientation directions. This will yield the required material properties and the variability of these properties.

Next, it is important to realize that the material will see a processing step, typically some kind of press forming, sometimes also called drape forming. And in the case of a hybrid process this is followed by an overmolding process. These processes can add variability to the material properties, and therefore the effect of process variations within a given window should be determined experimentally also.

Finally, the accuracy of simulation methods themselves needs to be verified, preferably on a component that can be tested under different temperatures and speeds. At the same time

this component should undergo a production process that is representative of the final applications to be developed in the future.

Now it is essential to note that for a general validity for all possible components, one should be able to test each individual composite's failure mode on this test article (for example, being able to test both composite tensile and compression failure).

Covering all these boundary conditions, a single test component was developed as a four-point bending beam having a hat-shaped or 'omega' cross-section (see Figure 8).

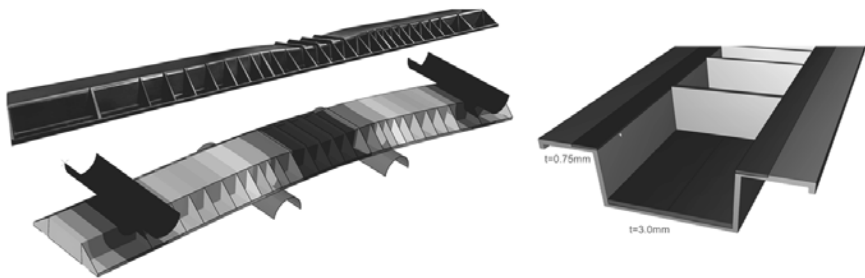


Fig. 8: Four-point bending hybrid test component. Note the depression in the middle test section. Right: 3D cross-section showing highly asymmetrical UD insert layout (dark grey).

As shown in the illustration, the beam has reduced height at the middle test area. This is necessary in order to have a well-controlled test region and to make sure that the highest stresses do not occur very locally, only below the load introduction points. However, this depression in the height of the beam easily leads to buckling at the high failure stresses as typically seen for UD materials. For this reason, the final geometry design has an unusually large number of ribs.

The next challenge was to be able to test both the compression and tension strength of pure UD composites with this beam. A typical glass thermoplastic UD material would have a tensile strength of around 900 to 1000 MPa and a compression strength of only 500 MPa. As a result, beams loaded in bending typically always fail in compression, making it impossible to validate the tensile strength for a real component. To solve this issue, a highly asymmetrical insert layout was chosen (as in Figure 8, right-hand image).

In this way the neutral axis in bending is shifted towards the thick insert, causing the stresses in the thin insert to always be much more than twice those of the thick insert. In this way the thin UD strip can always be tested either in compression or in tension.

As can be seen in Figure 8, the beam is quite slender. Its actual length is 1000 mm while the height is only 40 mm. The reason being that in this way the shear stresses in the overmolding material remain quite low, and can be as low as around 20 MPa depending on the resin. By increasing the length of the beam, it will be certain that the beam can be tested to, for example, 1000 MPa tensile failure in the composite and not fail in the overmolding material.

Similarly, when one wants to test the shear strength, it is easy to reduce the distance between the load point and supports, which will result in relative high shear stresses.

Apart from UD strips, even multi-directional laminates or joined components can be tested for validation purposes (see Figure 9).

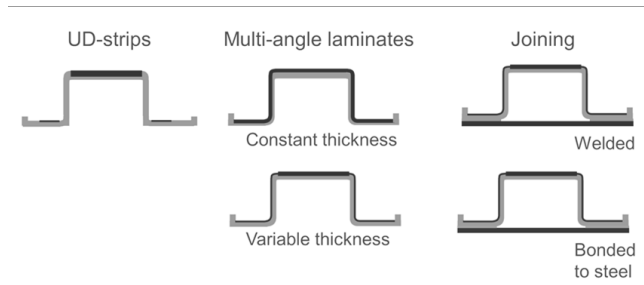


Fig. 9: Various layout configurations.

#### 4. Example validations

Beams were tested at the typical temperatures required by the automotive industry, such as -40 and +85 °C, with both static and dynamic loading. A few examples are given below.

The first configuration using narrow strips (upper left in Figure 9) was used to test UD material performance in a real molded component, both in tension and compression by testing the beam with the hat section pointing upwards or downwards. The resulting force deflection curves can be seen in Figure 10 below. Results show that the stiffness of the beam and fail-

ure of the UD laminates can be well predicted and that the tensile strength of the UD material is much higher than the compressive strength.

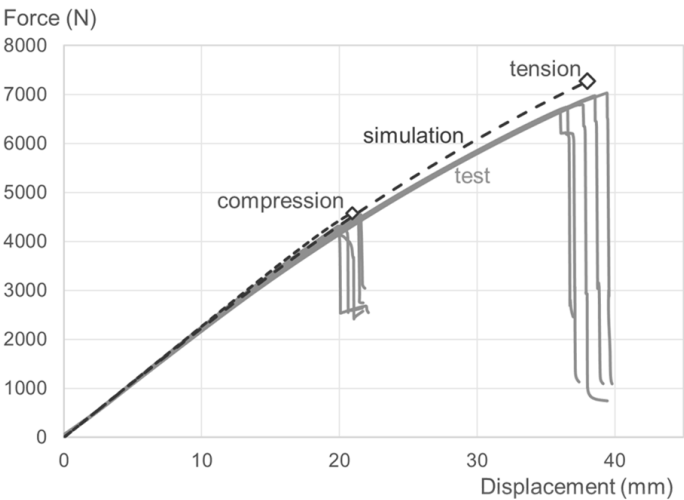


Fig. 10: Room-temperature force deflection curve for variant with narrow UD strips, loaded in either tension or compression. Solid lines are test results, dotted lines simulation.

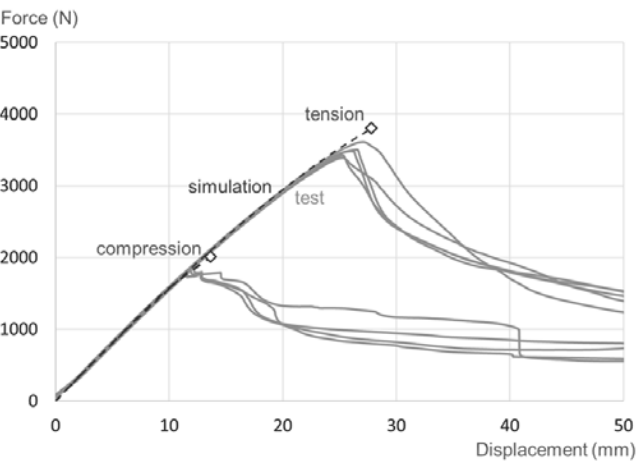


Fig. 11: 85 °C temperature force-deflection curve for variant with narrow UD strips, loaded in either tension or compression. Solid lines are test results, dotted lines simulation.

The same tests were also performed at 85 °C, as shown in Figure 11. The stiffness and force levels are now lower, as both the overmolding material and especially the compression strength fall with temperature, while at the same time the failure is now much more ductile. The important point is that there still is reasonably good agreement with predictions. Current simulation work focuses on predicting behavior past the failure point and results will be published at a later date.

### 5. Integrated simulation chain

Today several software packages are available for simulation of different composite manufacturing processes and for mechanical analysis. For hybrid processes, fiber orientation of both the short and the continuous fiber is especially important for mechanical (or warpage) simulation. The continuous-fiber material orientation can change due to the draping process, which can be simulated with software such as AniForm† or PAM-FORM†, while the short- or long-fiber orientation resulting from the filling process can be predicted by, for example, Moldflow† or Moldex3D†. Software packages such as Digimat† can transfer fiber orientation from Moldflow to Abaqus, which is used for mechanical performance prediction. Nevertheless, today there is no software that couples any step in the manufacturing process with mechanical simulation. At SABIC the newly developed software SIMAN† Mapper is used which takes care of all these tasks (see Figure 12). This software is a new custom development from the INPRO company.

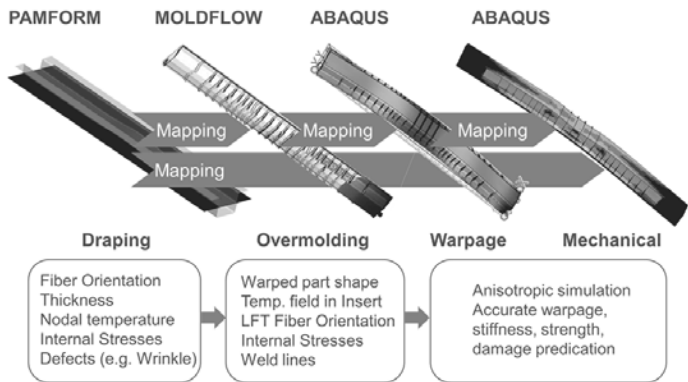


Fig. 12: Integrated simulation chain, using mapping software.

What is unique here is that these coupled simulations can be performed on 2D meshes throughout the process. This is a big advantage in design stages when one wants to optimize many different structural design layouts rapidly.

## **6. Conclusions**

Cost-effective composite material forms, such as multi-axial laminates based on UD tape have been developed. In combination with LFT overmolding material they can offer significant lightweighting at competitive cost. Confidence in new technology still needs to be built up, especially in the case of simulations.

For this reason, a new test component has been developed. The unique geometry of this component permits validation of the different failure modes which can occur in composite materials. It will not experience the buckling failure seen with many other test beams.

Because of this special layout, it has the capability to test high-strength UD materials until failure, and as such it will be useful for any future real automotive application.

## References

- [1] Schijve, W., G.Francato, G.: New thermoplastic composite solutions to make automotive lightweighting a reality. ICC 2015
- [2] Schijve, W., Kulkarni, S.: New thermoplastic solutions making the difference in automotive lightweighting. SPE-ACCE 2016
- [3] van Aken, H., Schijve, W.: Weight saving potential of thermoplastic unidirectional composites in the passenger door of a car. ICC 2015
- [4] Götze, C., Böhme, P., Rietman, B., Boxus, E., Fenske, S., Schierl, S.: Heiße Lamine sicher im Griff. Kunststoffe 106 (2016) 9, pp. 165-169.

† Any brands, products or services of other companies referenced in this document are the trademarks, service marks and/or trade names of their respective holders.

# Kosteneffizienz durch Einsatz von UV-stabilen Kunststoffen in dynamisch und statisch höchstbelasteten Bauteilen

## Was wirklich geschah!

Dipl.-Ing. (FH) **C. Bauer**, Dipl.-Ing. (FH) **H. Häberle**,  
MAN T&B AG, München

### Kurzfassung

Anforderungen an Kunststoffe im Nutzfahrzeugbereich sind hart, nicht nur die gegenüber Pkw deutlich längeren Laufzeiten auch das sehr hohe Belastungsprofil bringen Kunststoffe an ihre Grenzen. Speziell für am Rahmen befestigte Bauteile gelten sehr hohe Beschleunigungskräfte im deutlich zweistelligen G-Bereich, sodass hier im Allgemeinen hochwertige und unempfindliche Kunststoffe eingesetzt werden müssen.

Für große Verblendungsbauteile im Stossfängerbereich wurden bei der MAN bisher PET/PC-Blends eingesetzt. Die höhere Festigkeit gegenüber Standardkunststoffen war hierfür ausschlaggebend. Der Nachteil der nicht ausreichenden UV-Beständigkeit wurde durch eine Lackierung der Bauteile gelöst. Um bei der Überarbeitung der Kunststoffstoßfänger der schweren Baureihe TGS/X die Kosten der Lackierung für den schwarzen Mittelbereich einzusparen, sollten die Blenden nun mit ASA umgesetzt werden. Die niedrigere Festigkeit und geringere Zähigkeit musste durch eine geschickte Konstruktion kompensiert werden. Dies gilt vor allem für das große Mittelteil. Dieses erreicht bei einer freitragenden Spannweite von 1,5 Metern Längenänderungen in Wärme und Kälte ca.  $\pm 10$  Millimetern. Um diese Längenänderung schadensfrei zu ermöglichen, wird mit verschiedenen Konzepten gearbeitet: „Schwimmende“ Befestigungspunkte mit gezielten Bewegungsfreiheiten, Bombierungen (Überspannung) der Bauteile und der richtigen Abstimmung zwischen den unverstärkten Blenden und den glasfaserverstärkten tragenden Strukturbauteilen. Ein Strukturbauteil mit höherem Glasgehalt hat den positiven Effekt der höheren Steifigkeit und den negativen Effekt der geringeren Längenausdehnung gegenüber den unverstärkten, mit ihm im Schweißverfahren verbundenen Verkleidungsteilen. Über Simulation und Validierung wurde hier ein Optimum erreicht. Das Ziel einer Systemkostenreduzierung wurde erreicht. Zum einen durch die Materialkosteneinsparung aufgrund geringerer relativer Materialkosten von ASA gegenüber PET/PC, zum anderen durch die Einsparung der Lackierung. Mit der Umstellung auf ASA wurde eine robuste Konstruktion geschaffen, welche alle Anforderungen erfüllt.

## Agenda

- 1 Historie
- 2 Anforderungen
- 3 Kosten
- 4 Technische Auslegung
- 5 Herausforderungen
- 6 Optimierungen
- 7 Fazit

## Historie

1

## Entwicklung vom Stahl zum Kunststoff im Bereich Stoßfänger

### Stoßfänger

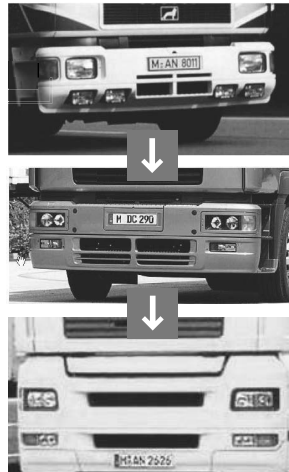
- **Stahl**
- bis 1986
- Baureihe F8
- Robustheit hohe Priorität
- Optik geringe Priorität
- Einfache Geometrie
  - geringe Umformgrade
  - geringe Bauteilhöhe



## Entwicklung vom Stahl zum Kunststoff im Bereich Stoßfänger

### Stoßfänger

- **Duroplast (SMC)**
- 1986 bis 2007
- Baureihe F90; F2000; TGA; TGS/TGX
- Robustheit hohe Priorität
- Optik immer höhere Priorität
  - Komplexere Geometrie
  - Größere Bauteilhöhe



## Entwicklung vom Stahl zum Kunststoff im Bereich Stoßfänger

### Stoßfänger Mittelbereich (schwarz)

- **Thermoplast (PET/PC)**
- 2012 bis 2016
- Baureihe TG Evolution
- Robustheit und Service hohe Priorität
- Optik hohe Priorität



- **Thermoplast (ASA)**
- ab 2017
- Baureihe TGS/X neu
- Robustheit und Service hohe Priorität
- Optik hohe Priorität
- Kostenreduktion (trotz erhöhter Bauteileanzahl)



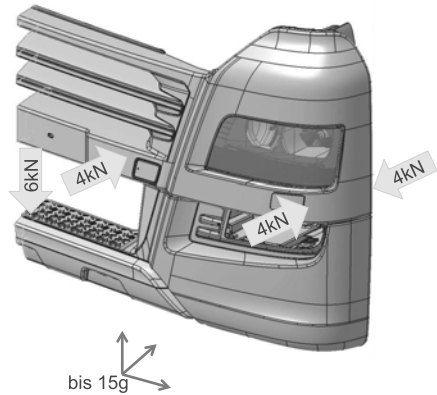
## ➤ Anforderungen

2

## Dynamisch und statisch höchstbelastet

### Stoßfänger

- Chassisfest
  - Harte Lagerung
    - hoher Unterschied zwischen Fahrt leer und voll ausgeladen.
- Hohe Beschleunigungskräfte  
15g in XYZ
- Auftrittslasten  
6kN
- Touchierlasten
- Einfädellasten



## Dynamisch und statisch höchstbelastet (Video)



## Kosten

# 3

### > Kosten

## Kostenaufstellung

### Stoßfänger Mittelbereich

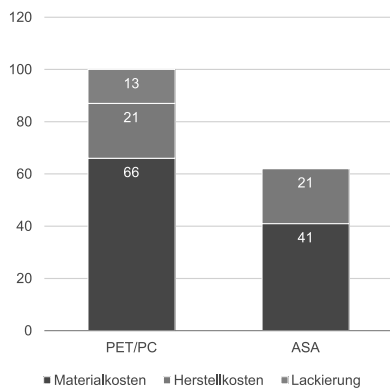
#### PET/PC

- Aufgrund ungenügender UV-Stabilität ist eine Lackierung notwendig
- Materialpreis höher als bei ASA

#### ASA

- UV-stabil → keine Lackierung notwendig
- Geringere Festigkeit/Steifigkeit als PET/PC → muss durch Bauteilauslegung/ Materialeinsatz kompensiert werden
- Materialpreis niedriger als bei PET/PC

### Vergleich Kosten [skaliert]



# 4

## Technische Auslegung

### > Technische Auslegung

#### Varianten

##### TGX mit Chromapplikation

###### Kunststoffstoßfänger

- Aufgrund der starken Identifikation der Fahrer mit den Trucks besteht der Wunsch der Individualisierung des Trucks bzw. der optischen Aufwertung  
→ Chromapplikation nicht nur für Editionsmodelle sondern auch als Sonderausstattung möglich



## Varianten

### TGS

#### Kunststoffstoßfänger

- Eine Lamelle
  - Optimierung Kühlluftanströmung
  - Optik



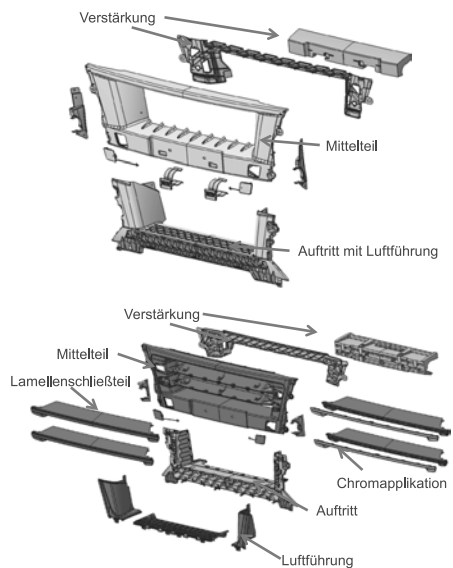
## Technische Details

### Stoßfänger Serie alt (PC/PBT)

- Sichtbauteile (gelb)
- Struktur- Funktionsbauteile (grau)

### Stoßfänger Serie neu (ASA)

- Sichtbauteile (rot)
- Struktur- Funktionsbauteile (grau)



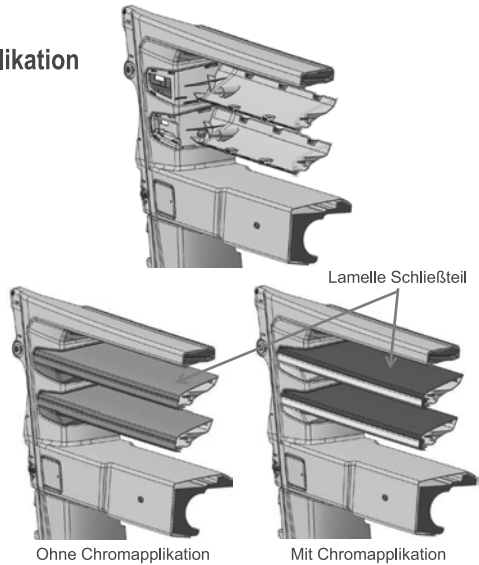
## Technische Details Chromapplikation

### Anforderung

- Gleiche Geometrie bei Variante mit/ohne Chromapplikation
- Möglichst geringer Werkzeuginvest

### Technische Lösung

- Verschiebung Werkzeuggrenzung
- Schließteil Lamelle wird als separates Sichtbauteil eingesetzt



## Technische Details Lamellen

### Verbindung Obergurt

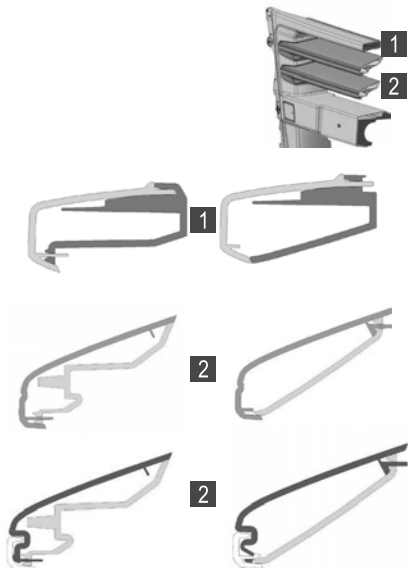
- An Oberkante in Nut gesteckt
- An Oberkante fügen mit Schweißlaschen
- An Unterkante fügen mit Schweißlaschen

### Verbindung Lamellen

- Lamellenoberbereich mit Schweißlaschen
- Lamellenunterbereich mit Schweißlaschen

### Verbindung Chromapplikation

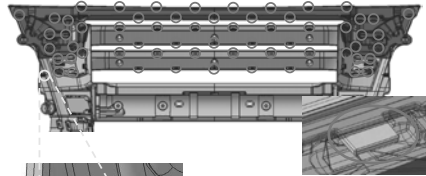
- Chromleiste in Lamellennut eingesteckt
- Chromleiste in Lamelle verclipst



## Technische Details Lamellen

### Schweißpunkte

- Verbindung Außenschale mit Innenschale
- Schweißstellen (rot markiert)
- Ultraschallschweißen



Schweißlasche

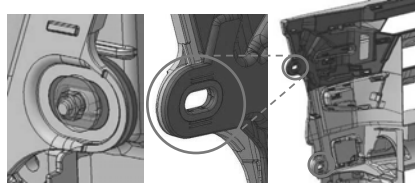
### Montagehilfe

- Vormontage Oberteil
- Vormontage Befestigung durch Aufsteckklammer



### Befestigung am Fahrzeug

- Vormontierter Stoßfänger wird auf Gewindebolzen (Träger) aufgesteckt und verschraubt
- Langlöcher mit Metalllochverstärkung



## Herausforderungen

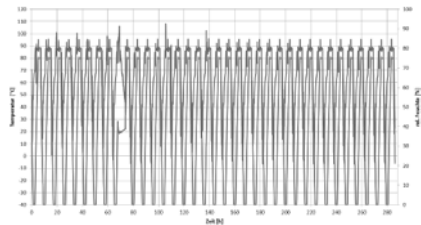
5

## Validierung

### Umweltqualifikation MAN M3516

- Fotogrammetrie vor und nach jedem Test
- Test Trockene Hitze  
→ 6h, 90°C
- Kondenswasserklimatest  
→ 240h, 40°C, 95% rel. Feuchte
- Kältetest  
→ 72h, -50°C
- Klimawechseltest  
→ 280h = 35 Zyklen,  $T_u = -40^\circ\text{C}$ ,  $T_o = +80^\circ\text{C}$

Beispiel für Klimaüberwachung



Quelle: EDAG / MAN Klimawechseltest

- Längenausdehnung über Temperatur

## Prüfergebnisse

### Umweltqualifikation M3516

- Trockene Hitze: 90°C
  - Stoßfängermittel dehnt sich aus
  - Und geht im Mittelbereich in Bombierung



- Kälte: -50°C
  - Stoßfängermittelteil verkürzt sich ungleichmäßig
  - Zug nach Fahrzeug links



Quelle: EDAG

## Prüfergebnisse

### Schadensbilder

- Risse nach -50°C



## Prüfergebnisse

### Schadensbilder

- Nach Kälte gelöste Schweißverbindungen



## Optimierungen

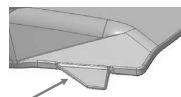
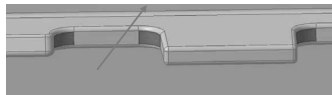
# 6

### > Herausforderungen

### Optimierung in technischen Details

#### Technische Überarbeitung

- Anbindung der Schweißrippen
  - Vergrößerung Radius im Rippenfuß
  - Reduzierung Kerbfaktor
- Verlängerung Langlöcher
  - Erhöhung Bewegungsweite
- Optimierung Schweißrippen
  - Bewegungsfreiraum gezielt schaffen

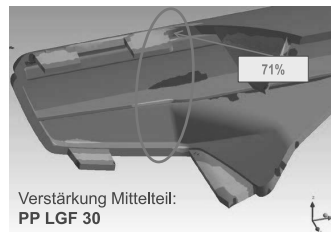
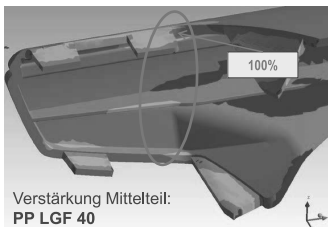
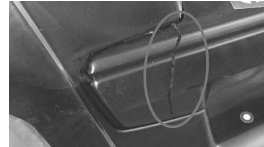
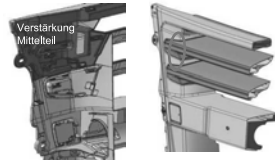


Quelle: MAGNA

## Optimierung Material

### Technische Überarbeitung

- Berechnung Spannung im Verbund Mittelteil mit Lamelle
- Reduzierung Glasgehalt von 40% auf 30% des Mittelteils  
→ Bi-Kunststoffeffekt vs. Festigkeitsanforderung  
Erhöhung der Durchbiegung des Obergurts um 10%

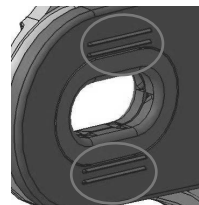
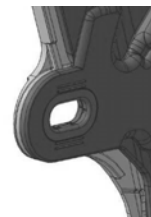
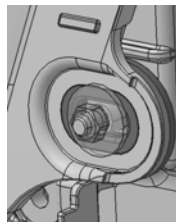
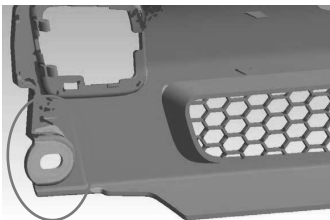


Quelle: MAN und MAGNA

## Optimierung Material

### Technische Überarbeitung

- Berechnung Spannung im Anbindungspunkt Mittelteil zu Chassisbefestigung
- Verbesserung Gleiteigenschaften in Langloch und Toleranzausgleich  
→ Gleitrippen



## Fazit

> Herausforderungen

## Fazit

Kosteneffizienz durch Einsatz von UV-stabilen Kunststoffen in dynamisch und statisch höchstbelasteten Bauteilen?

- **Kostenreduktion** ✓
  - Materialkosten ↓
  - Einsparung Lackierung ✓  
(Prozess, Qualität, Material)
- **Bedarf Know-how** ↗
  - Bauteilauslegungskomplexität ↗  
(Materialschwächen müssen durch Konstruktion ausgeglichen werden)
- **Robustes Konzept** ✓
- **Entwicklungsaufwand** ↗
  - Entwicklungskosten ↗
  - Validierungsaufwand ↗



# Leichtbauträgersystem für den Luftfilter des Mercedes-Benz Actros

## Kosten- und Gewichtsersparnis – Hohe dynamische Dauerbelastbarkeit

Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) **H. Hauke**,  
BBP Kunststoffwerk Marbach Baier GmbH, Marbach am Neckar;  
Dipl.-Ing., Dipl.-Wirt.-Ing. **J. Horstmann**,  
LanxessDeutschland GmbH

Effizienz, Emissionsreduzierung und Nutzlasterhöhung stehen im Zentrum der Anstrengungen in der Nutzfahrzeugindustrie. Konsequenterweise wird an allen Bereichen, welche zur Effizienzsteigerung moderner Nutzfahrzeuge dienen, entwickelt. Neben Optimierungen am Antriebsstrang, der Reduzierung des Roll- und Luftwiderstandes kommen in jüngster Zeit auch Fahrmanagementsysteme zur Kraftstoffeinsparung hinzu.

Eine wichtige Komponente im modernen Nutzfahrzeugverkehr ist das Leergewicht des Fahrzeugs. Ein niedriges Leergewicht trägt zur Kraftstoffreduzierung und gleichzeitig zur Erhöhung der Nutzlast bei.

Hier setzt das neue Leichtbauträgersystem für den Reinluftfilter des Mercedes-Benz Actros an. Ein bestehendes Trägersystem soll innerhalb einer Leichtbauinitiative durch innovativen Kunststoff ersetzt werden. 45% Gewichtseinsparung bei gleichzeitiger Kosteneinsparung ist das Ziel.

Das Trägersystem muss sowohl den 6,1 kg schweren Luftfilter tragen, welcher durch die Filtration noch bis zu 1,5 kg schwerer werden kann, als auch den Kotflügel aufnehmen, welcher durch Schnee und Matschbewurf bis zu 3,3 kg wiegen kann. In der Nähe des Trägersystems ist der Turbolader positioniert, welcher mit bis zu 135°C auf das Haltersystem abstrahlt. Statistisch müssen 100 kg Trittlast aufgenommen werden, falls der Luftfilter bei Wartungsarbeiten am Fahrzeug betreten wird.

Im Nutzfahrzeug mit deutlich höheren Kilometerleistungen, als im PKW sind Haltersysteme in dieser Größenordnung Neuland, welches es zu erschließen gilt.

Polyamide, die mit hohen Gehalten an Glasfasern verstärkt sind, eignen sich auch im Nutzfahrzeugbau zur Substitution von Metallen. Ausgehend vom zur Verfügung stehenden Baubereich werden mit einem Topologiemodell die Hauptlastpfade ermittelt. Damit lässt sich ein Schalenmodell und daraus abgeleitet ein erstes Strukturkonzept abbilden. Um alle Leichtbaupotenziale zu nutzen, wird mit dem Strukturmodell eine Wandstärkenoptimierung durchge-

führt. Kunststoff soll vor allem entlang der hoch belasteten Zug- und Druckflächen eingesetzt werden. Die Verrippung soll so dünn wie möglich ausgeführt werden.

Der Ausarbeitung des Schalenmodells folgt die kunststoff- und werkzeuggerechte Auslegung des Bauteils. Beschnitte durch angrenzende Bauteile, sowie Toleranzkonzepte und entformungstechnische Randbedingungen müssen beachtet werden. In einem Optimierungskreislauf entsteht die 3D-Geometrie, welche parallel Simulationsläufen unterzogen wird, um die Lastfälle auch mit der konstruktiv ausgeführten Geometrie abzusichern. Ein ebenfalls parallel laufendes Kostencontrolling garantiert das Erreichen der Zielkosten.

Als ideal für die Gestaltung der Leichtbauträger in dem zur Verfügung stehenden Bauraum hat sich das Polyamid 66 Durethan AKV 50 H2.0 von LANXESS herausgestellt. Dieser Konstruktionswerkstoff erfüllt sowohl die hohen Anforderungen an die dynamische Dauerbelastbarkeit unter Wärmeeinwirkung, als auch die entsprechenden Rohstoffeigenschaften für eine wirtschaftliche Produktion.

Während der Entwicklungsphase wurden konsequent die Vorteile des Kunststoffes genutzt. So konnte eine Kunststoffdirektverschraubung realisiert werden. Kostenintensive Metallinserts, welche in einem zusätzlichem Prozessschritt eingebracht werden müssten, entfallen. In Zusammenarbeit mit einem Spezialist für Kunststoffschrauben wurde eine Lösung erarbeitet, die ein mehr als 50-faches Verschrauben des Filters, etwa nach Wartung und Austausch, ermöglicht. Die Vorspannkkräfte der Schrauben in den Trägern bleiben so hoch, dass sich das Filterelement nicht von selbst lösen kann. Weiterhin wurden in der Konstruktionsphase Blechhalter integriert und direkt am Bauteil angespritzt. Dies dient ebenfalls der Reduzierung von Material- und Montagekosten.

Das Spritzgußwerkzeug wurde aus Wirtschaftlichkeitsgründen als Familienwerkzeug ausgeführt, so dass pro Schuss ein kompletter Satz der Leichtbauträger hergestellt werden kann. Das stark unterschiedliche Teilegewicht der beiden Halter erfordert bei der Werkzeugauslegung hohe Simulationskompetenz. Eine konturnahe Kühlung unter Einsatz von speziellen wärmeleitenden Schieberinserten ermöglicht wirtschaftliche Zykluszeiten.

Die Integration der Leichtbauträger in die bestehende Fertigung des Actros ist unter anderem gelungen, weil identische Buchsen für beide Halter zum Einsatz kommen und somit die Standardschrauben weiter verwendet werden können. Für die Befestigung des Kotflügels können durch den Einsatz gesteckter Blechmuttern auf den Kunststoffhaltern ebenfalls die erprobten Schraubensysteme beibehalten werden.

Die erreichte Gewichtseinsparung im Bauteil selbst liegt bei 54%. Weitere Gewichtseinsparungen werden durch Entfall von Montagematerial wie Winkelbleche und Schrauben und Muttern erreicht. Das Projekt zeigt, dass auch in der laufenden Serie Metallsubstitutionsprojekte wirtschaftlich erschlossen werden können. Das Projektziel geringeres Gewicht bei niedrigeren Kosten wurde erreicht.

## Inhalt

- Aufgabenstellung
- Entwicklungsziel
- Systemanforderungen
- Konzeptentwicklung
- Materialwahl
- Simulation
- Konstruktion
- Kunststoffdirektverschraubung
- Bestätigung / Versuch
- Industrialisierung /Werkzeug
- Zusammenfassung



## Effizienz, Emissionsreduzierung, Nutzlasterhöhung

Viele Innovationen – ein Ziel: Weniger Verbrauch.

- Antriebsstrang
- Luftwiderstand
- Rollwiderstand/Reifen
- Predictive Powertrain Control
- Eco-Training
- Gewicht



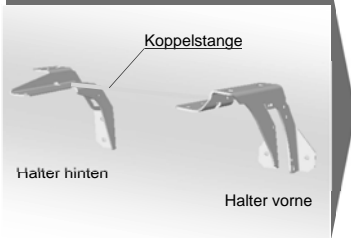
- Einfluss der Fahrzeugleergewichts
  - ➡ Direkter Einfluss auf CO2 Emission
  - ➡ Nutzlasterhöhung

Bild: Quelle: [www.mercedes-benz.de/...efficiency.html](http://www.mercedes-benz.de/...efficiency.html)

## Aufgabenstellung: Ersatz Metall durch Kunststoff

Im Zuge der Leichtbauoffensive bei DaimlerTrucks soll geprüft werden, ob Stahlhalter durch Kunststoffhalter ersetzt werden können.

### Serie



### Idee



## Trägersystem Einbausituation



Quelle: DaimlerTrucks Entwicklung

## Entwicklungsziele

### Funktionelle Ziele:

- **Befestigung des Luftfilters** an das Trägersystem.
- **Anbindung des Luftfilters** an den Fahrzeugrahmen.  
Definition neue Tragstruktur aus Kunststoff.
- **Befestigung Kotflügel** am Trägersystem.
- **Befestigung Akustikpaket** am Trägersystem

### Technische Ziele:

- **Gewichtsreduzierung** 45%.
- Ausführung in glasfaserverstärktem Thermoplast.
- Entfall Koppelstange bei Sondervarianten.
- **Integration** von angrenzenden Bauteilen (Halter).

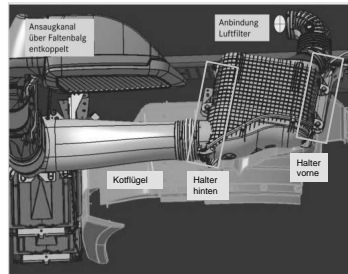


Bild: Quelle: Daimler Entwicklung

## Unser Leistungsversprechen vereint high-end Materialien und high-end Engineering Fachwissen in bester Form

### Expertise für alle Bereiche fortschrittlicher Bauteilentwicklung

X\_Durethan®  
X\_Pocan®  
X\_Tepex®

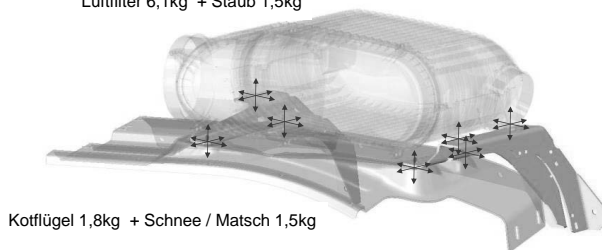


- **Material Entwicklung:**  
Maßgeschneiderte Lösungen
- **Konzept Entwicklung:**  
Führend in Leichtbauentwicklungen
- **Computer Aided Engineering:**  
Erstklassige Simulations Methoden
- **Bauteil Test:**  
State-of-the-art testing facilities
- **Prozess Unterstützung:**  
Entwicklung von Multimaterialprozessen für zukünftige Anwendungen

## Anforderungen

Beschleunigung 15g in XYZ

Luftfilter 6,1kg + Staub 1,5kg

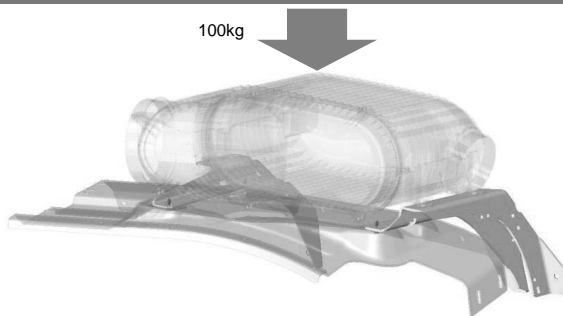


Kotflügel 1,8kg + Schnee / Matsch 1,5kg

## Anforderungen

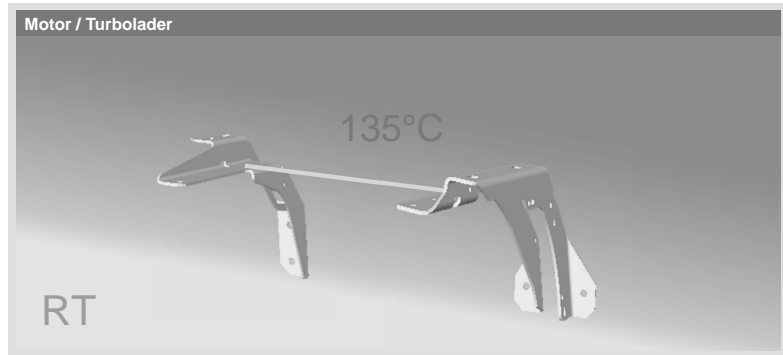
Missbrauch durch eine Person

100kg



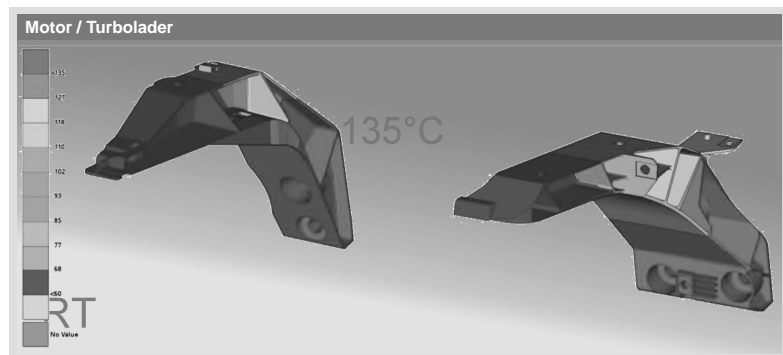
## Anforderungen

Wärmebeanspruchung



## Anforderungen

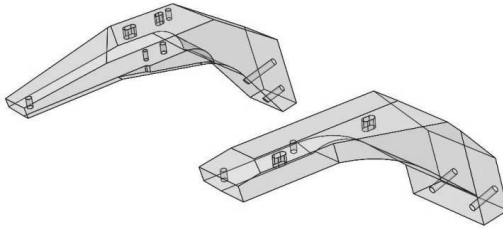
Wärmebeanspruchung



## Konzeptentwicklung

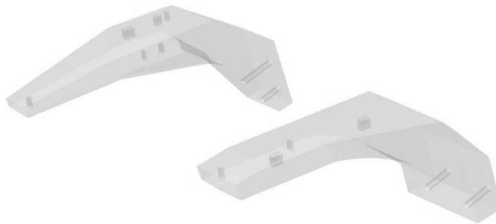
Strukturentwicklung mittels Topologieoptimierung im zur Verfügung stehenden Bauraum

Bauraum



## Konzeptentwicklung

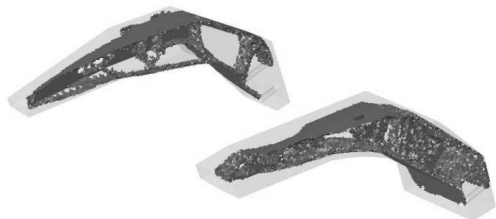
Strukturentwicklung mittels Topologieoptimierung im zur Verfügung stehenden Bauraum



## Konzeptentwicklung

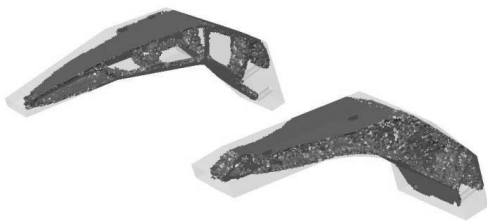
Strukturentwicklung mittels Topologieoptimierung im zur Verfügung stehenden Bauraum

### 15% Topologie Ergebnis



## Konzeptentwicklung

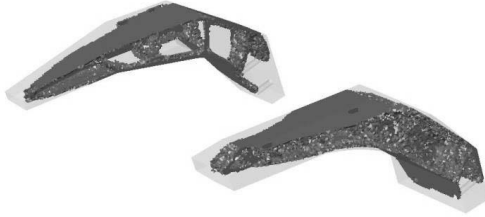
Strukturentwicklung mittels Topologieoptimierung im zur Verfügung stehenden Bauraum



## Konzeptentwicklung

Strukturentwicklung mittels Topologieoptimierung im zur Verfügung stehenden Bauraum

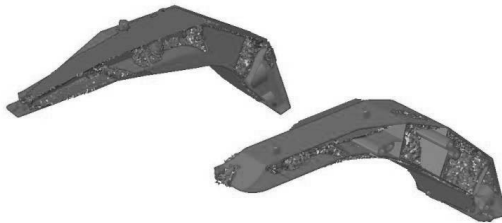
### 25% Topologie Ergebnis



## Konzeptentwicklung

Strukturentwicklung mittels Topologieoptimierung im zur Verfügung stehenden Bauraum

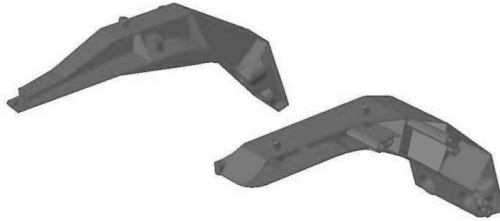
### Erstes Strukturkonzept



## Konzeptentwicklung

Strukturentwicklung mittels Topologieoptimierung im zur Verfügung stehenden Bauraum

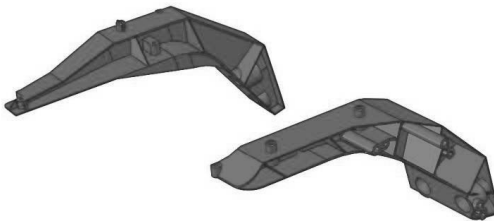
### Erstes Strukturkonzept



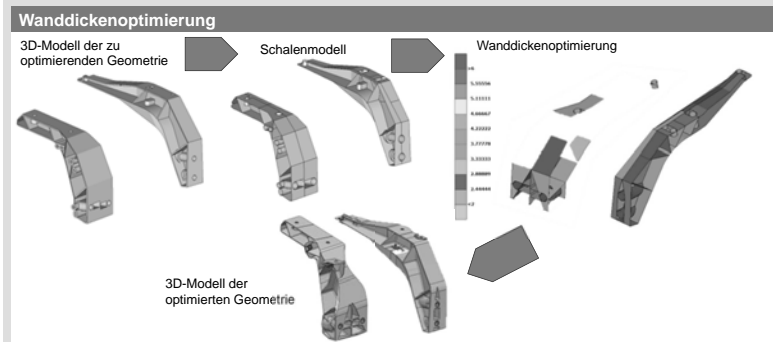
## Konzeptentwicklung

Strukturentwicklung mittels Topologieoptimierung im zur Verfügung stehenden Bauraum

### Erstes Strukturkonzept



## Mechanik, Optimierung



**Materialwahl**  
**Durethan AKV 50 H2.0 (PA6.6 GF50)**

### Materialbeschreibung

- Hohe Steifigkeit bei guter Zähigkeit
- Hohe Dauerfestigkeit
- Hohe Wärmeformbeständigkeit
- Breiter Temperatureinsatzbereich
- Gute Chemikalienbeständigkeit
- Breites Verarbeitungsfenster

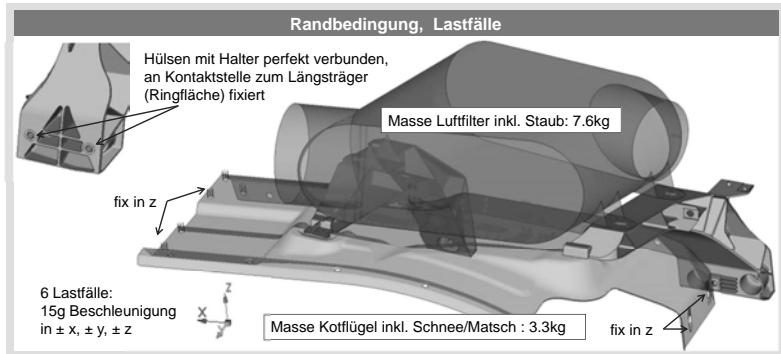
### Eigenschaftsvergleich

Legend:

- BKV 50 H2.0 901510
- BKV 60 H2.0 901510
- AKV 50 H2.0 901510

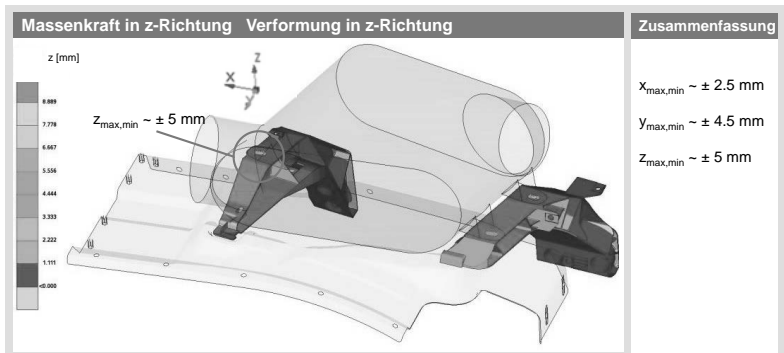
## Simulation

Mechanik, FE-Modell



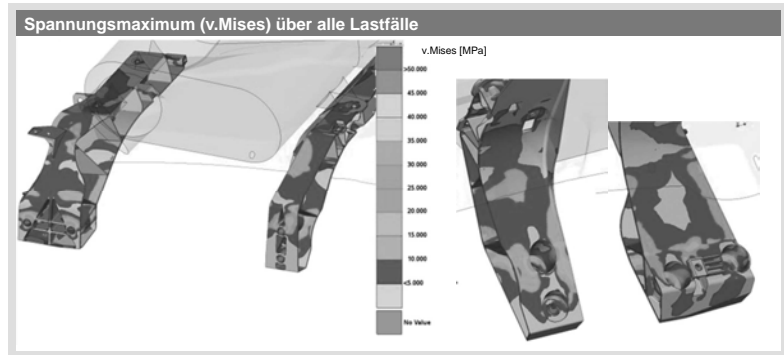
## Simulation

Mechanik, Steifigkeit

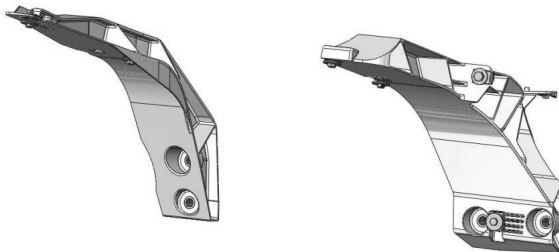


## Simulation

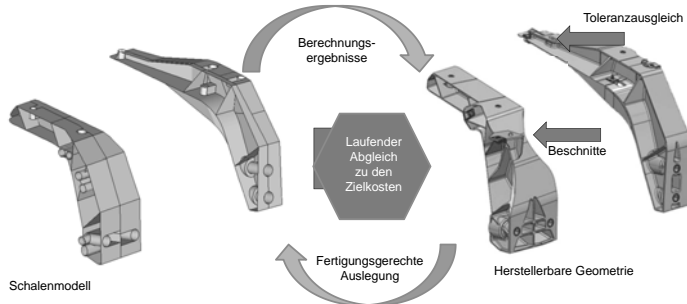
Mechanik, Festigkeit



## Konstruktion - Kunststoffgerechtes Design



## Konstruktion - Kunststoffgerechtes Design



## Konstruktion - Befestigung Luftfilter

- Anforderung: Im Servicefall wiederverschraubbar.
- Korrosionsbeständig.
- Lösung in Stahl:  
M12 Verschraubung.
- Anzugsdrehmoment  $92 \pm 18$  Nm
- Erster Ansatz: Gewindeeinsätze aus Metall.

### Nachteile:

- Hohe Kosten. Zusätzlicher Fertigungsprozess.
- Benötigte Auszugskräfte können evtl. nicht erreicht werden.
- Anzugsdrehmoment grenzwertig.

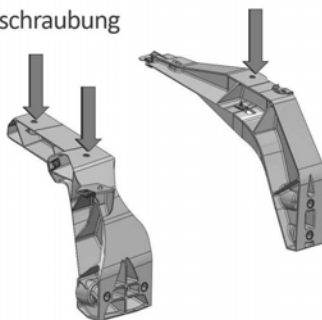
➔ Neuer Lösungsansatz notwendig.



Quelle: RVT Fastening

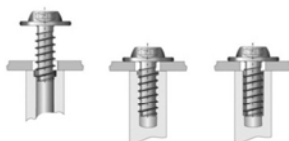
## Konstruktion - Kunststoffdirektverschraubung

- 8 mm Kunststoff-Direktverschraubung.



## Konstruktion - Kunststoffdirektverschraubung

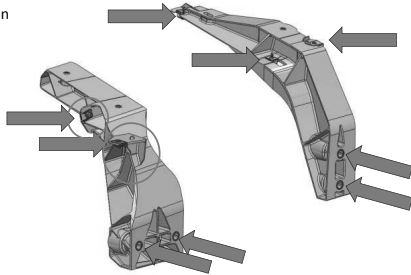
- 8 mm Kunststoff-Direktverschraubung.
- Einflussfaktoren:  
Schrauberdrehzahlen; Schrauber elektrisch,  
Drehmoment, Einschraubgeometrie.
- **Hürde:**  
Bisher keine Erfahrung in Nenngroße 8 mit  
Verschraubung in PA66 GF50.
- Untersuchung Drehmoment und Auszugskräfte in  
Abhängigkeit der Einschraubparameter.
- **Ergebnis:**  
Auszugskräfte bis 10,5 kN.  
Schraube ist selbsthemmend.



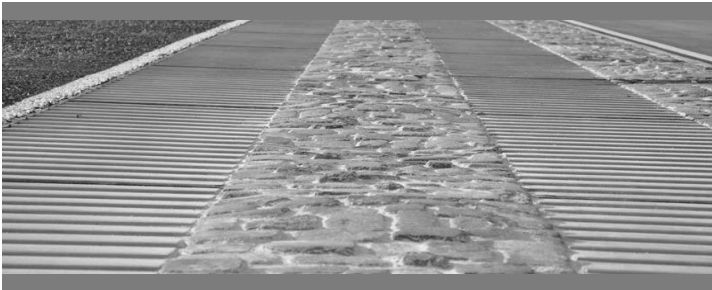
Quelle: www.ejpt.de/press

## Konstruktion - Montageoptimierung

- Einheitliche Buchsen zur Standardisierung in der Montage.
- Verwendung von Blechklammern zur Standardisierung Montage Kotflügel.
- Integration Blechhalter.

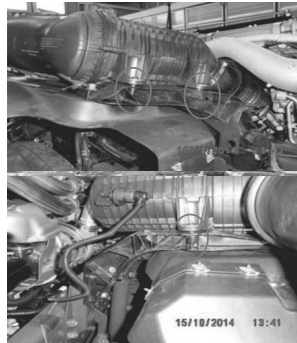


## Bestätigung / Versuch



## Bestätigung / Versuch

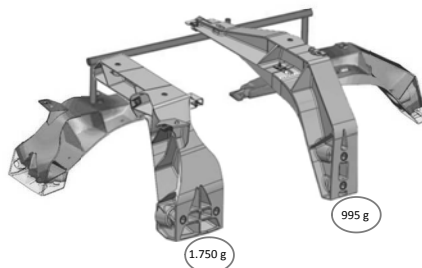
- Erprobung im Schlechtwegedauerlauf:  
Mehrere Fahrzeugvarianten  
(Fernverkehr/Bausteller)  
Aktuell 140% erzielt ohne Beschädigung.
- Sommererprobung zur Absicherung der  
Temperaturbelastung.
- Wiederholverschraubung  
>50 Mal realisiert
- Überprüfung Bauteilverformung unter der  
statischen Last von 100kg.



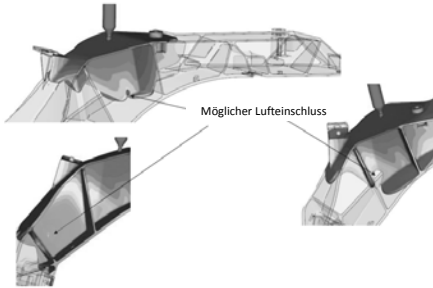
Quelle DaimlerTrucks Entwicklung

## Industrialisierung Werkzeug - Auslegung

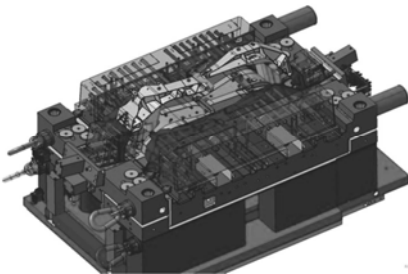
- Aus Wirtschaftlichkeitsgründen sollen  
die Bauteile in einem  
Familienwerkzeug hergestellt werden.
- Werkzeugkonzept 1+1 fach
- Herausforderung –  
Unterschiedliche Bauteilgewichte.
- Simulation Füllverhalten zur  
Optimierung der Anspritzpunkte  
und Heißkanalauslegung.



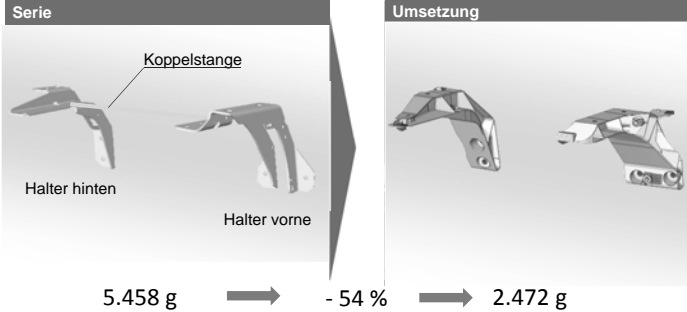
## Industrialisierung Werkzeug - Lufteinschluss



## Werkzeug - Fahrseite



## Zusammenfassung



## Zusammenfassung

### Gewicht:

Durch den Ersatz zweier lackierter Stahlträger mit Koppelstange durch zwei glasfaserverstärkte Kunststoffträger konnte eine Gewichteinsparung von 54 % gegenüber der herkömmlichen Serienlösung erreicht werden.

### Kosten:

Kostenreduzierung durch Nutzung des Potenzials von Kunststoffbauteilen.

- Entfall von „Mutter und Scheibe“ und Ersatz durch Kunststoffdirektverschraubung.
- Entfall von Blechhaltern durch Integration in das Spritzgußbauteil zu geringsten Kosten.
- Entfall der Lackierung, da kein Korrosionsschutz notwendig.
- Vereinfachung des Vormontageprozesses.

# Innovative Kunststoffanwendungen für ein kleines Stadtbuskonzept

## Innovative plastic applications for a small urban bus concept

**G. Kopp, O. Deißer**, DLR Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart;  
**A. Müller, S. Beyer**, Hochschule Esslingen

### Kurzfassung / Abstract

Das Projekt „Reallabor Schorndorf (BOOLEAN)“ ist eines von sieben Forschungsprojekten, die gefördert vom baden-württembergischen Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst zukunftsfähige Lösungen für Herausforderungen in Ballungsräume erproben. In Reallaboren bearbeiten dabei Wissenschaftler zusammen mit Kommunen, Unternehmen und Bürgern Veränderungen in der Stadt.

Um die besonderen Anforderungen für die zukünftigen, notwendigen Fahrzeugentwicklungen im ÖPNV zu berücksichtigen, wird im Rahmen des vorgestellten Vorhabens unter anderem ein innovatives, leichtes, urbanes Buskonzept entwickelt. In einem mehrstufigen Verfahren werden zuerst Skizzen und Grobentwürfe entwickelt. Diese kommen unter anderem im Rahmen der Bürgerbeteiligung zum Einsatz, um die weiteren Anforderungen an das Fahrzeug zu spezifizieren. In einem nächsten Schritt werden der Entwurf und die Fahrzeugarchitektur konstruktiv umgesetzt.

Eine besondere Herausforderung des Vorgehens liegt bei der Einbindung aller Beteiligten in die Konzeption und Umsetzung des innovativen Fahrzeugkonzepts und dessen technischen Darstellung in einem Fahrzeugmodell, das unter anderem die Themen „Umwelt-verträglichkeit, Sicherheit und Komfort“ adressiert.

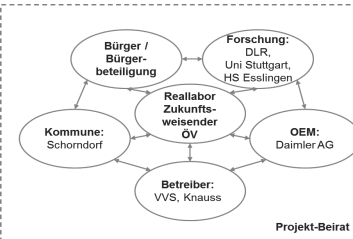
Diesen Anforderungen wird insbesondere durch einen systematischen Vergleich von Leichtbaupotentialen ausgewählter Bauweisen begegnet, die unterschiedliche Kunststoffanwendungen und Sandwichstrukturen beinhalten.

Neben der lastpfadoptimierte Rahmenstruktur werden die Hauptstrukturkomponenten Boden, Dach und Seitenwände mit unterschiedlichen Kunststoff- und Sandwichkonfigurationen (SMC, LFT, LFI, ...) ausgelegt und bezüglich Ihres Leichtbaupotentials verglichen.

## Projekt Reallabor Schorndorf

Zukunftsweisender ÖV – Bürgerorientierte Optimierung der Leistungsfähigkeit, Effizienz und Attraktivität im Nahverkehr

- Idee eines innovativen Konzepts zur Bedienung im ÖPNV
- Konzeption als haltestellenloses Quartiersbussystem
- Umsetzung der Ideen und Ansätze als Pilot in Realumgebung
- Gefördert vom Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg



## Projekt Reallabor Schorndorf - Fahrzeugkonzeption

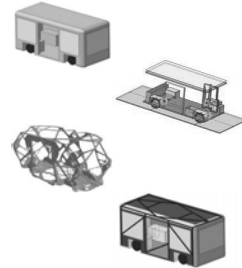
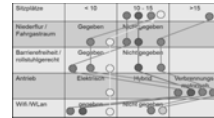
- Derzeit wird der Busverkehr in Schorndorf mit großen Omnibussen realisiert (>30 Sitzpl.)
- Schwache Auslastung der Busse außerhalb der Stoßzeiten.
- Im Rahmen des Reallabors wird der Einsatz kleinerer Bus-Konzepte erprobt.
- **Aus den Anforderungen und Erfahrungen aus dem Projekt wird ein neues, innovatives Fahrzeugkonzept für den Einsatz in dem neuen Bedienkonzept entwickelt.**
- Neben der digitalen Entwicklung wird ein Mock-Up im Maßstab 1:5 aufgebaut.



Bildquellen: eigene Aufnahmen und Darstellungen, Daimler AG

## Projekt Reallabor Schorndorf – Vorgehensweise Fahrzeugkonzeption

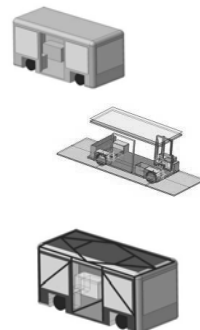
1. **Anforderungsanalyse** aus Kunden / Busnutzer, Betreiber, Bedienkonzept, Stadt / Infrastruktur, Gesellschaft / Trends, Gesetzgebung / Umwelt, Fahrzeugtechnik / Innovationen
2. **Definition** der funktionalen und technischen **Anforderungen** an das **Gesamtkonzept** (z.B. Sitzplatzanzahl, Barrierefreiheit, ...)
3. Ableitung des **Fahrzeugkonzepts**, der Fahrzeugarchitektur und des Packages (Maßkonzept)
4. Analyse der optimalen Strukturlastpfade mittels **Topologieoptimierung**
5. **Bauweisenkonzeption**, Simulation und Dimensionierung der Fahrzeugstruktur



## Anforderungen und Zielsetzung des Buskonzepts

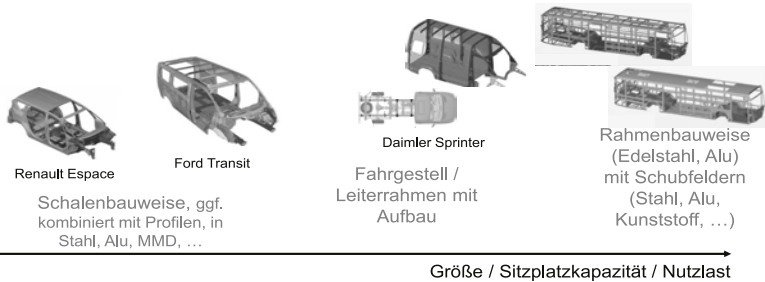
### • Hauptanforderungen:

- Kapazität: 6 Sitzplätze und 4 Stehplätze, inkl. Multifunktionsfläche für Kinderwagen und / oder Rollstuhl
- Antriebsstrang: Elektromotorisch
  - Maximalgeschwindigkeit: 80 km/h,
  - Reichweite: Soll: 12 h pro Tag; Min.: 3 h pro Tag
- Fahrbetrieb: hochautomatisiert/autonom
- Karosserie: barrierefreier Zugang, Länge: < 5000 mm, Wendekreis: < 12 m



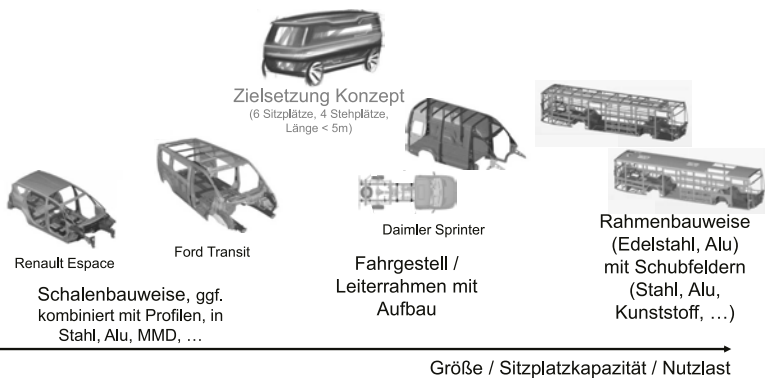
## Anforderungen und Zielsetzung des Buskonzepts

- Karosserie:
  - Bauweisen aktueller Fahrzeuge sehr unterschiedlich (auch abhängig von Einsatz, Modularisierungsvarianten und Stückzahlen)



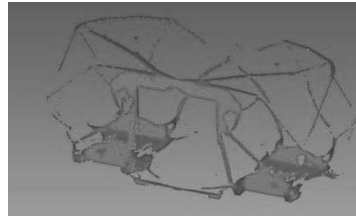
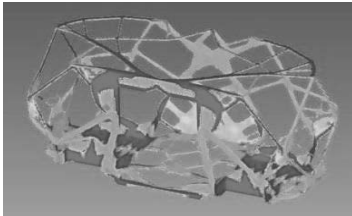
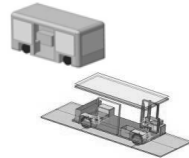
## Anforderungen und Zielsetzung des Buskonzepts

- Karosserie:



## Fahrzeugkonzept, Fahrzeugarchitektur und Strukturoptimierung

- Analyse von unterschiedlichen Anordnungen der Hauptkomponenten (Antriebsstrang, Speicher, Fahrwerk, Klimaanlage, Interieur, ...)
- Ableitung von Lastpfaden in der Struktur, abhängig von Komponentenanzordnung und Package



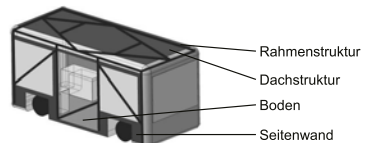
## Strukturoptimierung und Bauweisenkonzeption

- Ableitung von Konzepten für die möglichen Bauweisen

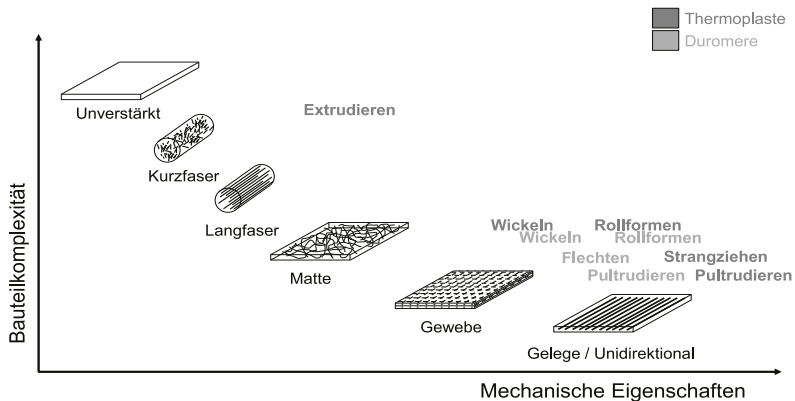


	Profil - Metalle	Profil - FVK	Kurzf. Kunststoff	Langf. Kunststoff	FVK Gewebe / Gelege	Sandwich Komb.
Rahmenstruktur	●	●				
Dachstruktur						● ●
Boden						● ●
Seitenwände				● ●	●	● ●

- ● FVK-Profil-Sandwichkonzept
- ● Metall-Profil-Langfaserkonzept 1
- ● Metall-Profil-Langfaserkonzept 2
- ● Metall-Profil-FVK-Konzept
- ● Metall-Profil-Sandwichkonzept 1 und 2

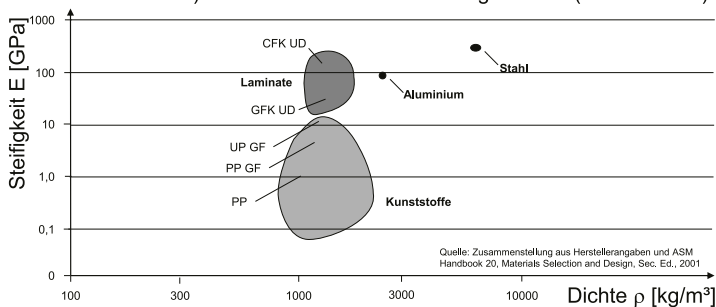


## Varianten für faserverstärkten Kunststoffen für „profil-artige Bauteile“ (Auszug)

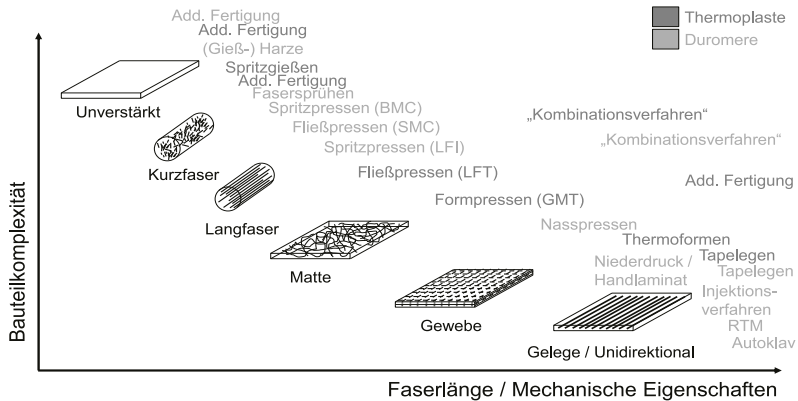


## Bauweisenkonzeption, Simulation und Dimensionierung der Fahrzeugstruktur

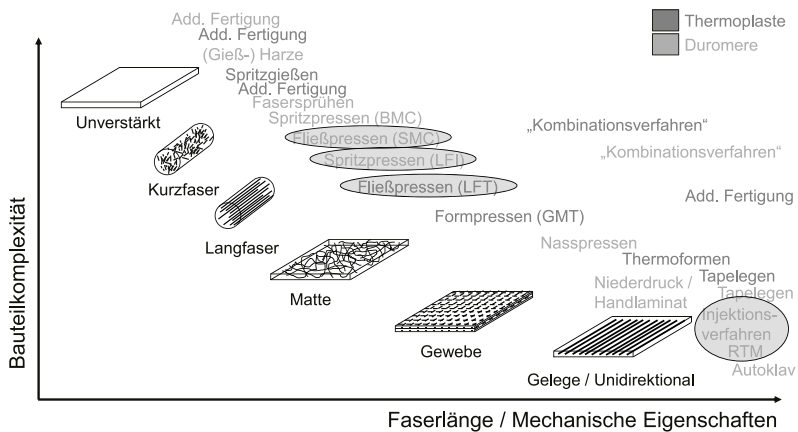
- Auswahl:
  - Edelstahlgerippe auf Grund der Bauraumbeschränkungen („absolute Steifigkeit relevant“, der Skalierbarkeit / Modularisierbarkeit, der Korrosionsbeständigkeit, der Krafteinleitungspunkte (z.B. im Fahrwerks- und Türbereich) und der einfachen Verbindungstechnik (ohne Knoten))



## Varianten für faserverstärkten Kunststoff für „flächige, komplexe Bauteile“ (Auszug)

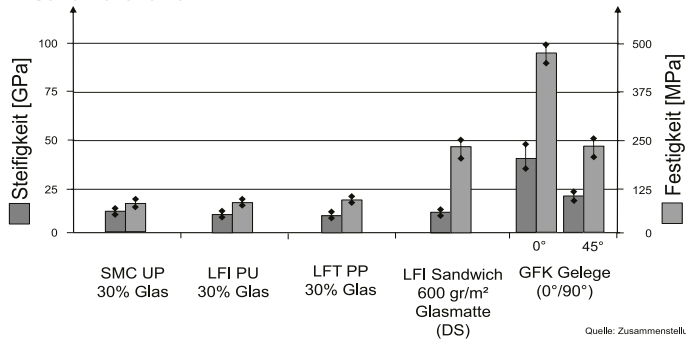


## Varianten für faserverstärkten Kunststoff für „flächige, komplexe Bauteile“ (Auszug)



## Analyse von Materialeigenschaften

- Zugeigenschaften ausgewählter Materialien
- Notwendige Biegesteifigkeit aus doppelschaliger Bauweise oder Sandwichstruktur



## Zusammenfassung und Ausblick

- Ableitung eines Fahrzeugkonzepts für einen kleinen Stadtbus
- Systematischer Vergleich von Leichtbaupotentialen ausgewählter Bauweisen zur Erhöhung der Nutzlast und Einhaltung der Achslasten
- Signifikanter Einfluss der ausgewählten Werkstoffe, Fertigungsverfahren und Bauweisen (einschalig, zweischalig, Sandwich) auf die Struktureigenschaften (insbesondere Torsionssteifigkeit)
- Analyse von Funktionsintegrationsmöglichkeiten in die Seiten und Frontenelemente (z.B. Sensoren, Aktuatoren, Sicherheitskomponenten für Mobilitätsteilnehmer (Fußgänger, Fahrradfahrer, ...))
- Integration z.B. von passiver Wärmeisolation oder Heizungselementen in die flächigen Strukturbauteile
- Alternative Sandwich-/ Schaumstrukturen und Fertigungsverfahren



## Quellen

### ARL2016

N.N.: Aufbaurichtlinien Transporter Neuer Sprinter BM 906, Stand  
31.01.2016, Mercedes Benz

### Buechner2013

Büchner, J.; Dogan, G.; Yilmazer, E.: Ford Transit & Tourneo Custom, Euro  
Car Body 2013, 15th Global Car Body Benchmarking Conference,  
22.-24. Oktober 2013, Bad Nauheim, Deutschland

### Greutling2015

Geutling, P.: Sandwich-Strukturen im Nutzfahrzeugbereich –  
Herausforderungen und Potentiale, Vortrag Landshuter  
Leichtbaukolloquium, 2015, Landshut

### Renault2015a

N.N.: Renault Espace, Euro Car Body 2015, 17th Global Car Body  
Benchmarking Conference, 2013, Bad Nauheim, Deutschland





# Innovativer Leichtbau für leichte Nutzfahrzeuge am Beispiel der GFK-Blattzugfeder

Dr.-Ing. **J. Stimpfl**, Dr.-Ing. **J. Asbeck**,  
Mubea Fahrwerksfedern GmbH, Attendorn

## Kurzfassung

Das 100-jährige inhabergeführte Unternehmen Muhr und Bender KG aus Attendorn (Mubea) ist Weltmarktführer in der Entwicklung und Herstellung von Automobilkomponenten, wie z.B. Achsfedern, Stabilisatoren, Federbandschellen oder Ventulfedern. Der bisherige Unternehmenserfolg ist auch dem frühen Fokus auf Leichtbau in Kombination mit einer hohen vertikalen Integration vom Rohstoff bis zum Endprodukt sowie der internen Entwicklung von Produktionsprozessen geschuldet.

Basierend auf dem Fertigungs- und Produkt-Knowhow zu Automobilkomponenten aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) der Tochter Mubea Carbo Tech GmbH, in Kombination mit der langjährigen Erfahrung im Bereich Fahrwerk, entwickelt die Geschäftseinheit Fahrwerkstechnologien seit 2008 Fahrwerksfedern aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK). Ein besonderer Meilenstein ist die erste Serienfertigung von GFK-Längsblattfedern für angetriebene Hinterachsen seit dem Jahr 2016.

Als besondere Innovation gilt die Mubea GFK-Blattzugfeder, bei der nicht nur Stahl durch den Leichtbauwerkstoff GFK ersetzt wird, sondern ein neues patentiertes faserverbundgerechtes Design zum Einsatz kommt. Mit Hilfe des Blattzugfeder-Designs ist es erstmals möglich mehrlagige Stahlfedern für leichte Nutzfahrzeuge durch einlagige GFK-Blattfedern zu ersetzen. Das neuartige Design und der Entfall des Längenausgleichs in Form des Schäkels führen zu einer zunehmenden Überlagerung des Biegeanteils mit einem Zuganteil beim Einfedern. So wird erstmalig eine kontinuierlich progressive Federkennlinie trotz einlagigem Federdesign möglich.

Die Mubea GFK-Blattfedern und Blattzugfedern werden mit Hilfe der Fertigungstechnologie Prepreg-Pressen in Serie hergestellt. Das Besondere hierbei ist der Einsatz eines bandförmigen Halbzeugs, des sogenannten Prepregs (vorimprägnierte Fasern). Hierdurch ergeben sich einige Vorteile in Bezug auf den Fertigungsprozess sowie das Produkt GFK-Feder. Zum einen werden bei der kontinuierlichen Prepreg-Herstellung alle Fasern in der Feder optimal getränkt und unidirektional (in eine Richtung) ausgerichtet. Zum anderen passen sich die gestreckten und seitlich nicht beschnittenen Fasern beim Pressen, trotz Dicken- und Breitenvariation der Federgeometrie, optimal an die Kontur an. Des Weiteren erfolgt die chemische Vernetzung des Kunststoffs vollständig unter hohem Druck. Dadurch werden Porenbildung,

Mikrorisse oder Unebenheiten an der Oberfläche, durch Materialschrumpf oder Dehnungsunterschiede, beim Aushärten vermieden.

Insgesamt bieten die Mubea GFK-Blattzugfedern nicht nur eine sehr hohe Gewichtsersparnis von bis zu 50 kg pro Achse bei marktgerechten Leichtbaukosten, sondern auch eine deutliche Steigerung des Fahrkomforts.

## Agenda

---










1. MUBEA COMPOSITES – MOTIVATION & ZIELSETZUNG
2. FAHRWERKSFEDERN AUS FASERVERSTÄRKTEM KUNSTSTOFF
  - Erfolgreiche Integrationen von GFK-Federn
  - Innovation Blattzugfeder
  - Serienproduktion von GFK-Federn bei Mubea
3. ZUSAMMENFASSUNG

## Fakten und Kernkompetenzen

---

- *Weltmarktführer in der Entwicklung und Herstellung von Automobilkomponenten*
- *Inhabergeführtes Familienunternehmen seit 1916*
- *Leichtbauspezialist*
- *Vertikale Integration vom Rohstoff bis zum Endprodukt*
- *Interne Entwicklung von Produktionsprozessen*

## Produkte

Achsfedern		Flexibel gewalzte Platinen		Ventilfedern		
Stabilisatoren		Flexibel gewalzte Pressteile		Riemenspann- systeme		
Flexibel gewalzte Fahrwerks- komponenten		CFK- Produkte		Federband- schellen		
Faserverbund- federn		Kopfstützbügel		Getriebeteller- federn		
Mubea Perform. Wheels®		Flexibel gewalzte Sitzstrukturteile		Getriebe- und Antriebswellen		
Fahrwerk		Karosserie/Interieur		Antrieb		Industrie

## Kennzahlen 2015

- 10.500 Mitarbeiter weltweit
- 29 Produktions-, Entwicklungs- und Vertriebsstandorte
- Investitionsquote von 10%
- Umsatz von 1,8 Milliarden Euro
- Jährliches Wachstum > 10%

## Motivation und Zielsetzung

**Mubea**  
**CARBO**  
**TECH**

&

**Mubea**  
*Fahrwerks-  
technologien*



### Motivation

- Erster TIER1 mit umfassendem Engagement in der Industrialisierung von FVK im Automobil
- Entwicklung der nächsten Generation von Leichtbau

### Zielsetzung

- Kompetenter, unabhängiger Partner für innovativen Leichtbau mit FVK
- Konsequente Nutzung von Synergien zwischen Technologien für CFK und GFK
- Markterfolg durch innovativen Leichtbau und wirtschaftliche Fertigungsprozesse

## Erfolgreiche Integrationen von GFK-Federn



Volvo XC90, seit 2015



MB Sprinter, ab 1.7.2016

### GFK-Querblattfedern

- + Geeignet für Vorder- und Hinterachse
- + Substitution von Schraubenfeder und Stabilisator
- Frühzeitige Entscheidung über angepasste Achskonzepte

### GFK-Längsblattfedern

- + Geeignet für angetriebene Starrachsen mit Radführung (bei leichten NFZ)
- + Sehr gut integrierbar
- + Serieneinsatz als Sonderausstattung möglich

## Mubea GFK-Längsblattfedern

### **Blattfeder** (lineare Federkennlinie)



### **Blattzugfeder** (progressive Federkennlinie)



#### **Blattfeder**

- Substitution von einlagigen Stahlfedern
- Längenausgleich (Schäkel) am hinteren Federende
- Gleiche Funktion wie einlagige Stahlfeder
- Gewichtsersparnis von bis zu 60% bzw. 17kg/Achse
- Unkritisches Versagensverhalten

#### **Blattzugfeder**

- Substitution von mehrlagigen Stahlfedern
- Beide Federenden verschiebungsfest gelagert
- Biegebelastung überlagert mit einer mit dem Einfederweg zunehmenden Zugbelastung
- Stetige progressive Federkennlinie bei einlagigem Design

## Blattzugfeder – innovativer Leichtbau in GFK



### **Konventionelle Blattfeder**



- mehrlagig
- Federstahl
- $m = 23 \text{ kg}$

### **Blattzugfeder** (Mubea Patent)



- einlagig
- GFK in UD
- $m = 6 \text{ kg}$

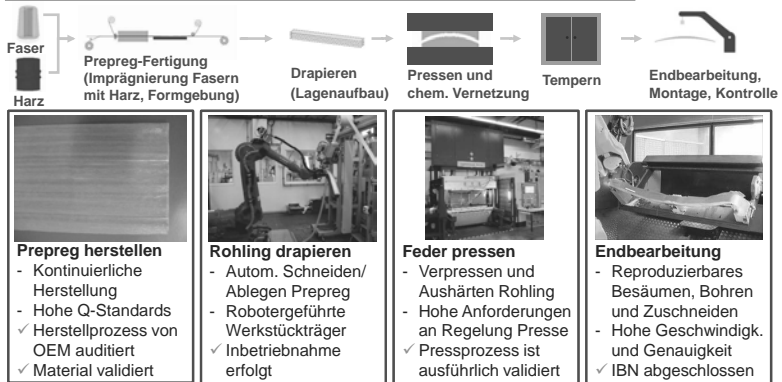
#### **Innovation**

- Gewichtsreduzierung bis zu 50kg/Achse
- Verbesserung des Fahrkomforts insbesondere im teilbeladenen Zustand
- Marktgerechte Leichtbaukosten
- Einfache Integration in aktuelle NFZ und Pickups
- Entfall Längenausgleich

#### **Reifegrad**

- Serienentwicklung und Aufbau  
Serienproduktion läuft
- Serieneinsatz ab 2018

## Prepreg-Fertigungsverfahren - Einzelprozesse

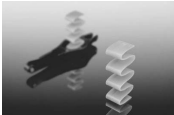
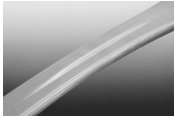
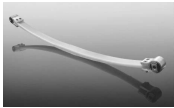


## Serienproduktion von GFK-Federn in Attendorn



## Zusammenfassung

---



### Produktportfolio

- Längs- & quereingebaute GFK-Blattfedern
- GFK-Mäanderfedern
- CFK-Stabilisatoren
- Kundenspezifische Entwicklungen von Faserverbundfedern (z.B. Querblattfeder für alternative Achskonzepte)

### Marktposition

- Mubea ist "der" Federspezialist
- Hohe Kompetenz in der Unternehmensgruppe
- Serienlieferant für GFK-Blattfedern

### Innovation Blattzugfeder

- bis zu 50kg Gewichtseinsparung pro Fahrzeug
- Hoher Fahrkomfort

**... aber die Herausforderungen müssen wir gemeinsam angehen!**

# Industriegetriebene Initiative zur Standardisierung endlosfaserverstärkter Thermoplaste für den Einsatz in der Automobilindustrie

Dr.-Ing. **S. Schmeer**, Dr.-Ing. **D. Scheliga**,  
Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern

Die Eigenschaften von endlosfaserverstärkten Thermoplasten werden wie bei anderen Werkstoffen auch in experimentellen Untersuchungen charakterisiert. Dabei wird teilweise auf einheitliche, oft aber auch auf unterschiedliche Normen zurückgegriffen. Um eine gute Allgemeingültigkeit zu garantieren, bleiben in den Details der Anwendung häufig Freiräume und Interpretationsspielräume offen. Das führt besonders bei endlosfaserverstärkten Thermoplasten zu Fehlinterpretationen und damit zu unterschiedlichen Kennwerten, auch weil die Normen oftmals für duromere Verbundwerkstoffe entwickelt wurden. In einigen relevanten Bereichen existieren gar keine Normen oder brancheneinheitlichen Standards. Vor diesem Hintergrund soll in diesem Arbeitskreis eine transparente, einheitliche und effiziente Charakterisierungsstrategie zur Beschreibung von endlosfaserverstärkten Thermoplasten (Organobleche und Tapes) entwickelt und im Folgenden standardisiert werden. Im Fokus stehen dabei die Werkstoffcharakterisierung, Kennwerte für Werkstoffvergleiche sowie Qualitätssicherungskonzepte. Insbesondere soll eine über das aktuelle Maß hinausgehende Versorgung der Werkstoffanwender mit nutzbaren und ausreichenden Werkstoffkennwerten für die Werkstoffsimulation erreicht werden.

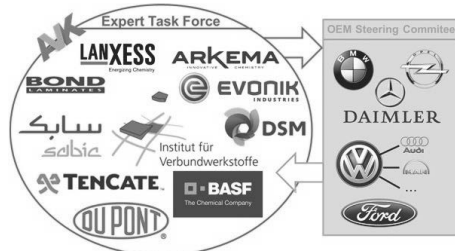


Bild 33: Zusammensetzung des Arbeitskreises sowie des begleitenden OEM-Komitees

Dieser Arbeitskreis wird vom IVW geleitet und wird unter dem Dach der AVK von folgenden Firmen getragen: Arkema, BASF, Covestro, Dupont, DSM, Evonik, Lanxess/Bond Laminates, Sabic und Tencate. Diese erarbeiteten Lösungen werden zudem eng mit einem OEM-Komitee diskutiert, in dem die Firmen BMW, Daimler, Ford, Opel und der VW-Konzern vertreten sind.

