

VDI

International Congress



March 25-26, 2020, Mannheim, Germany

Top topics

- Innovative structural components made of polyamide
- Improving CO₂-efficiency through resource-saving plastics
- Plastic components designed specifically for electric vehicles
- Integrative lightweight construction and functional integration
- Crash simulation of composite components
- Surfaces and coatings

#EngineeringTomorrowsMaterials

with friendly support of:



BMW
GROUP



DAF
A HINOCE COMPANY



VOLKSWAGEN
www.volkswagen.com

An event organized by VDI Wissensforum GmbH - www.piae-europe.com - Photo

<https://doi.org/10.51202/9783191023893> - Generiert durch IP 216.78.216.36, am 21.01.2026, 02:21:42. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede Urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts in Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

VDI-BERICHTE

Herausgeber:

VDI Wissensforum GmbH

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek (German National Library)

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at www.dnb.de.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2020

Alle Rechte vorbehalten, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, auszugsweise oder vollständig.

Der VDI-Bericht, der die Vorträge der Tagung enthält, erscheint als nichtredigierter Manuskriptdruck.

Die einzelnen Beiträge geben die auf persönlichen Erkenntnissen beruhenden Ansichten und Erfahrungen der jeweiligen Vortragenden bzw. Autoren wieder. Printed in Germany.

ISSN 0083-5560

ISBN 978-3-18-092369-7

Content/Inhalt

► Innovative structural components/*Innovative Strukturbauteile*

Development of an energy-absorbing structural element made of polyamide integrated in the plastic front-end carrier of the new Mercedes S-Class.	1
<i>Entwicklung eines energieabsorbierenden Strukturelements aus Polyamid integriert im Kunststoff-Frontendträger der neuen Mercedes S-Klasse</i>	<i>5</i>
A. Wüst, BASF SE, Ludwigshafen;	
T. Metzner, Mercedes-Benz AG, Sindelfingen	

Composite space frame: structural reinforcement for automotive liftgates/tailgates	9
R. Chaaya, Magna Exteriors, Troy, Michigan, USA;	
J. Puta, P. Hasl, Magna Exteriors, Liberec, Czech Republic;	
J. Goetzelmann, Magna Exteriors, Sailauf	

► CO₂-efficiency/*CO₂-Effizienz*

Process-integrated material compounding for the sustainable manufacture of high-strength components	15
<i>Prozessintegrierte Werkstoffaufbereitung für eine nachhaltige Fertigung hochfester Bauteile</i>	<i>29</i>
M. Hoyer, ARBURG GmbH + Co KG, Loßburg	

► Simulation/*Simulation*

Crash simulation of the new TNGA intake manifold in glass-fiber-reinforced polyamide	43
J. De Boever, Toyota Motor Europe, Zaventem, Belgium;	
G. Spingler, Novares, Lens, France	

The all-new MAN high-roof cab: epoxy-sandwich RTM – simulated using FEM and crashed under real conditions	61
<i>Epoxid-Sandwich-RTM – FEM gerechnet und real gecrasht</i>	<i>77</i>
A. Schmitz, MAN Truck & Bus SE, Munich	

THERMOFIL HP® – pushing the boundaries of highperformance glass-coupled polypropylene using the latest development in CAE to accelerate part development	93
N. Schlutig, SUMIKA Polymer Compounds France, Saint Martin de Crau, France;	
J. Oliver, SUMIKA Polymer Compounds UK, Havant, UK	

► **Plastics for e-mobility/ *Kunststoffe für Elektrofahrzeuge***

Increasing the safety of battery modules in electric vehicles with polyurethane pultrusion . . . 105
G. Greene, B. Kilian, R. Reithmeier, Covestro Deutschland AG, Leverkusen, Germany

Innovative large-scale production application of thermoformed parts for electric vehicles . . . 115
Innovative Großserienanwendung von Thermoformteilen für Elektrofahrzeuge. 123
J. Rosenberger, PARAT GmbH + Co. KG, Neureichenau

New solutions for e-mobility: thermally conductive thermoset plastics 133
Neue Lösungen für E- Mobilität – Thermisch leitfähige duroplastische Kunststoffe 141
M. Walcher, Raschig GmbH, Ludwigshafen

► **Emissions and odor/ *Emissionen und Geruch***

Emissions and odor under control – Thermoplastic elastomers for the vehicle interior 149
Emissionen und Geruch unter Kontrolle – Thermoplastische Elastomere für den Fahrzeuginnenraum. 165
F. Vetter, Product Development Automotive, Waldkraiburg

► **Manufacturing technology/ *Fertigungstechnik***

Additive manufacturing based on screw extrusion: machines, material and applications in the automotive industry 181
T. Stier, Akro-Plastic GmbH, Niederzissen;
N. Lammert, Yizumi Germany GmbH, Aachen;
C. Heinz, SMP Deutschland GmbH, Bötzingen;
N. Unger, German Aerospace Center (DLR), Institute of Vehicle Concepts, Stuttgart

Radiation cross-linking of plastics as a finishing process in series production. 197
Strahlenvernetzung von Kunststoffen als Veredelungsprozess in der Serienproduktion 207
S. Schmitz, D. Fischer, BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG, Wiehl

► Design and functional integration/ *Design und Funktionsintegration*

- „Electro Cult“ as a new design signature for e-mobility –
Chinese vs. European design identity. 219
*„Electro Cult“ als neue Design Signatur der E-Mobilität – Chinesische vs. Europäische
Designidentität. 221*
J. Friedrich, Car Men GmbH, Glashütten
- Highly integrative smart plastic shift fork 223
Hochintegrative smarte Kunststoff-Schaltgabel 235
J. Horn, GK Concept GmbH, Dresden;
B. Schulze, R. Kolmorgen, KOKI TECHNIK Transmission Systems GmbH, Niederwürschnitz

► Surfaces/ *Oberflächen*

- New class-A sheet molding compounds for automotive exterior components using a
single-step surface hybridization 249
M. Kardos, O. Täger, E. Körner, Volkswagen AG, Wolfsburg
- HiPIMS technology opens up new possibilities for decorative plastic coating 265
*Neue Möglichkeiten für die dekorative Kunststoffbeschichtung durch die
HiPIMS-Technologie. 273*
C. Schulz, M.Sc., Kunststoff-Institut Lüdenscheid
- Haptic structures of interior decorative bezels in the new Ford Puma utilizing the
three-dimensional overlay method (TOM) 281
*Haptische Strukturen auf Innenraum Zierblenden des neuen Ford Puma im
Three-Dimensional-Overlay-Method- (TOM)-Herstellungsverfahren. 295*
S. Bürger, T. Voigt, A. Kaplangiray, Ford Werke GmbH, Cologne

► Integrative lightweight construction/ *Integrativer Leichtbau*

Group Renault Plastic Material Vision for New Mobility Trends 311
Z. D. Cigdem, Renault SAS, Paris, France

GFRP-X springs – development, testing and manufacturing techniques 317
GFK-X-Feder – Entwicklung, Erprobung und Fertigungstechniken 333

S. Fiebig, Volkswagen AG, Braunschweig;
T. Kersten, B. Mennenga, Volkswagen AG, Wolfsburg;
K. Dröder, IWF, TU Braunschweig, Braunschweig;
J.-J. Härtel, Open Hybrid Lab Factory e.V., Wolfsburg

► Materials/ *Werkstoffe*

Thermoplastics in electric-vehicle battery applications – A lightweight and efficient
EV battery concept. 349

A. Tiwari, D. Brands, SABIC, Geleen, The Netherlands;
D. Pelletier, SABIC, Bergen op Zoom, The Netherlands;
C. Pereira, SABIC, Selkirk, New York, USA

Improving efficiency and quality in color matching in the car interior through digital color
matching 365

*Effizienz- und Qualitätsverbesserung bei der Farbabstimmung im PKW Innenraum durch
Digitales Color Matching*. 371

W. Franz, NCS Colour AB, Stockholm, Sweden

New possibilities for graphites and minerals in the design of composites with high
thermally conductive plastic 377

J. Crépin-Leblond, Imerys Graphite and Carbon, Toulouse, France

Development of an energy-absorbing structural element made of polyamide integrated in the plastic front-end carrier of the new Mercedes S-Class

Dipl.-Ing. **Andreas Wüst**, BASF SE, Ludwigshafen;
Dipl.-Ing. **Thomas Metzner**, Mercedes-Benz AG, Sindelfingen

Abstract

Body systems must satisfy numerous new requirements regarding safety and stability. With the new S-Class, this is achieved, among other things, with a crash-optimized front-end carrier made of short-glass-fiber-reinforced polyamide.

Optimization of the deformation zone at the front of the vehicle

A front-end carrier is responsible for the modular design of the front structure of a vehicle. At the same time, additional crash levels in the front-end carrier deliver a homogeneously large-area energy absorption and also an early energy absorption in the front of the car and significantly improve passive safety with regard to driver and passenger protection.

One challenge is to create an equivalent risk of injury in the event of a crash of two vehicles of different weights, with differences in energy absorption for the occupants of the lighter vehicle.



Fig. 1: Crash situation

The integration of additional large-area crash levels with no hard structures creates an occupant-friendly deformation zone with uniform energy distribution throughout the front of the car. However, this shield of the entire front of the vehicle not only protects possible accident

parties but also relieves own vehicle occupants, especially in unfavourable accident situations.

This significantly reduces the severity of accidents for the occupants, which further improves child safety in particular.

Glass-fiber-reinforced polyamide for crash absorbers

The innovation here is using crash-relevant components made of glass-fiber-reinforced polyamide.



Fig. 2: Polyamide crash absorber

Until now, energy-absorbing plastic components have not been able to meet crash requirements in the automotive industry because calculations involving complex load requirements could not deliver reliability. An additional challenge is to integrate an additional effective deformation zone into the tight installation space in the front of the car.

A cross-divisional development project involving Group Research, Passive Safety, Series Development Exterior, the Technology Factory and BASF SE as well as the system supplier HBPO GmbH was launched for tackling these tasks.

The FE software LS-Dyna® and the established Ultrasim® from BASF SE were used as the basis for the crash absorber calculations.

FE software LS-Dyna® with Ultrasim®

At its core, this method is based on the coupling of the FE software LS-Dyna® with Ultrasim®, a software tool developed by BASF for numerical mapping of complex non-linear material models. Ultrasim is able to take into account the properties characteristic of thermo-plastic materials all in a single numerical approach. These include variables such as

- Anisotropy - induced by the use of fiber-filled materials
- Strain rate - important in the case of crash-loaded components
- Failure behavior - plastic is completely different from metals here
- Tension-compression asymmetry – in strength and in the event of failure
- Temperature - non-linear beyond the glass transition
- Moisture - especially in the case of PA-based materials

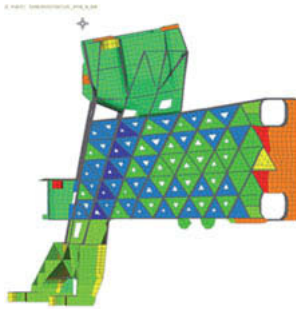


Fig. 3: The crash absorber FE model

The material models realized in Ultrasim have proven themselves in numerous component developments and even in the case of the present crash element allow the evaluation of robustness and controlled failure. In particular, prediction of the forces occurring in the crash element, the dissipated energy and the stresses acting on the residual structure are valuable findings that enable a simulative overall vehicle design using plastic elements. The simultaneous and coordinated use of Ultrasim is indispensable here for all parties involved in the development: OEM, Tier 1 and material supplier.

In addition to numerical mapping, the right choice of component geometry is an equally important aspect. Hardly any purely thermoplastic, short-fiber-reinforced component is designed in its main function for a controlled energy absorption. The design guidelines for this complex type of load were not only determined in preliminary studies at BASF and validated with component crash tests but also refined during the development of the first prototypes in order to optimize the crash elements for the tight installation space. In addition, manufacturability in the injection-molding process was always ensured by accompanying rheological filling studies.

Validation and implementation

With the subsequent real vehicle crash tests, the behavior of the simulatively pre-designed crash absorbers was fully confirmed.

A simple scalability of the required load and energy levels enables optimized, adapted use in a wide range of model series. It is also possible to take account of country-specific adjustments without any problems. For example, compatibility requirements on the part of Euro NCAP are fully integrated from 2020 into an existing component concept. The developed material models and calculation methods can also be applied in future to other load requirements in the vehicle (battery protection, for example).

All in all, this technology opens up a great potential regarding costs and lightweight construction and also significantly reduces development times. The introduction of the 'crash-optimized front-end carrier made of short-glass-fiber-reinforced polyamide' technology starts with the market launch of the new S-Class in 2020. This technology has been transferred to all subsequent C-Class and E-Class vehicles as well as the EQC platform.

Entwicklung eines energieabsorbierenden Strukturelements aus Polyamid integriert im Kunststoff-Frontendträger der neuen Mercedes S-Klasse

Dipl.-Ing. **Andreas Wüst**, BASF SE, Ludwigshafen;
Dipl.-Ing. **Thomas Metzner**, Mercedes-Benz AG, Sindelfingen

Kurzfassung

Karoseriesysteme müssen zahlreiche neue Anforderungen an Sicherheit und Stabilität erfüllen. Bei der neuen S-Klasse gelingt dies unter anderem mit einem crashoptimierten Frontendträger aus kurzglasfaserverstärktem Polyamid.

Optimierung Deformationszone in der Fahrzeugfront

Ein Frontendträger (FET) ist für den modularen Aufbau der Frontstruktur eines Fahrzeugs verantwortlich. Zugleich erzielen zusätzliche Crashebenen im FET eine homogen großflächige sowie frühzeitige Energieaufnahme im Vorderwagen und verbessern die passive Sicherheit bezüglich Eigen- und Partnerschutz signifikant.

Eine Herausforderung besteht darin, bei einem Crash zweier verschieden schwerer Fahrzeuge, mit Unterschieden bei der Energieabsorption für die Insassen des leichteren Fahrzeugs ein gleichwertiges Verletzungsrisiko zu realisieren.



Bild 1: Crashesituation

Durch die Integration zusätzlicher großflächiger Crashebenen ohne harte Strukturen entsteht eine partnerfreundliche Deformationszone mit gleichmäßiger Energieverteilung im gesamten

Vorderwagen. Dieser Schutzschild der gesamten Fahrzeugfront schützt aber nicht nur mögliche Unfallgegner, sondern entlastet auch die eigenen Fahrzeuginsassen besonders bei ungünstigen Unfallsituationen.

Dadurch wird die Unfallschwere für die Insassen deutlich reduziert, wodurch besonders die Kindersicherheit weiter verbessert wird.

Glasfaserverstärktes Polyamid für Crashabsorber

Die Innovation besteht darin, crashrelevante Bauteile aus glasfaserverstärktem Polyamid einzusetzen.



Bild 2: Polyamid Crashabsorber

Bisher konnten energieabsorbierende Kunststoffbauteile für Craschanforderungen nicht im Automobilbau zum Tragen kommen, da eine Berechnung mit komplexen Lastanforderungen nicht verlässlich möglich war. Eine zusätzliche Herausforderung besteht darin, in die angespannte Bauraumsituation im Vorderwagen eine zusätzliche effektive Deformationszone zu integrieren.

Für die Bearbeitung der gestellten Aufgaben wurde ein bereichsübergreifendes Entwicklungsprojekt mit Konzernforschung, passiver Sicherheit, Serienentwicklung Exterieur, Technologiefabrik und der BASF SE sowie dem Systemlieferanten Fa. HBPO GmbH ins Leben gerufen. Als Basis für die Berechnung der Crashabsorber wurde die FE-Software LS-Dyna® und das etablierte Ultrasim® der BASF SE verwendet.

FE-Software LS-Dyna® mit Ultrasim®

Im Kern basiert diese Methode auf der Kopplung der FE-Software LS-Dyna® mit Ultrasim®, einem von der BASF entwickelten Software-Tool zur numerischen Abbildung komplexer nicht-

linearer Materialmodelle. Ultrasim® ist in der Lage, die für thermoplastische Werkstoffe charakteristischen Eigenschaften allesamt in einem einzigen numerischen Ansatz zu berücksichtigen. Hierzu zählen Größen wie

- Anisotropie – induziert durch Verwendung fasergefüllter Werkstoffe
- Dehnrate - wichtig bei crashbelasteten Bauteilen
- Versagensverhalten – Kunststoff ist hier völlig anders als Metalle
- Zug-Druck Asymmetrie – in Festigkeit und beim Versagen
- Temperatur – nichtlinear über den Glasübergang
- Feuchte – insbesondere bei PA basierten Werkstoffen

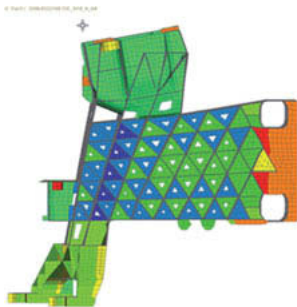


Bild 3: Darstellung FE-Modell des Crashabsorbers

Die in Ultrasim® realisierten Materialmodelle haben sich in zahlreichen Bauteilentwicklungen bewährt und gestatten auch beim vorliegenden Crashelement die Bewertung von Robustheit und kontrolliertem Versagen. Insbesondere die Vorhersage der auftretenden Kräfte im Crashelement, der dissipierten Energie und der auf die Reststruktur einwirkenden Belastungen sind wertvolle Erkenntnisse, die eine simulative Gesamtfahrzeugauslegung mit Kunststoffelementen ermöglichen. Unabdingbar ist hierbei die simultane und abgestimmte Verwendung von Ultrasim® bei allen an der Entwicklung beteiligten Parteien: OEM, Tier 1 und Materiallieferant.

Neben der numerischen Abbildung ist die richtige Wahl der Bauteilgeometrie ein ebenso wichtiger Aspekt. Kaum ein rein thermoplastisches, kurzfaserverstärktes Bauteil ist in der Hauptfunktion für eine kontrollierte Energieaufnahme ausgelegt. Die Gestaltungsrichtlinien für diese komplexe Art der Belastung wurden sowohl in Vorstudien bei der BASF ermittelt und mit Bauteil-Crashtests validiert als auch bei der Entwicklung erster Prototypen verfeinert, um die

Crashelemente für den engen Bauraum zu optimieren. Daneben wurde durch begleitende rheologische Füllstudien stets die Herstellbarkeit im Spritzgussprozess sichergestellt.

Validierung und Umsetzung

Mit den nachfolgenden realen Fahrzeug Crashversuchen wurde das Verhalten der simulativ vorausgelegten Crashabsorber vollumfänglich bestätigt.

Eine einfache Skalierbarkeit der benötigten Last- und Energieniveaus ermöglicht den optimiert angepassten Einsatz in verschiedensten Baureihen. Auch die Berücksichtigung von länderspezifischen Anpassungen ist problemlos möglich. Zum Beispiel wurden die Kompatibilitätsanforderungen durch Euro-NCAP ab 2020 vollumfänglich in ein bestehendes Bauteilkonzept integriert. Die entwickelten Materialmodelle und Berechnungsmethoden können zukünftig auch auf andere Lastanforderungen im Fahrzeug angewendet werden (z.B. Batterieschutz).

In Summe erschließt diese Technologie ein hohes Kosten- und Leichtbaupotenzial und reduziert ebenfalls deutliche die Entwicklungszeiten. Die Einführung der Technologie "crashoptimierter Frontendträger aus kurzglasfaserverstärktem Polyamid" wird mit der Markteinführung der neuen S-Klasse 2020 starten. In allen Folgefahrzeugen C-Klasse und E-Klasse sowie der EQC Plattform wurde diese Technologie übertragen.

Composite space frame: structural reinforcement for automotive liftgates/tailgates

R. Chaaya, Magna Exteriors, Troy, Michigan, USA;
Dr. J. Puta, P. Hasl, Magna Exteriors, Liberec, Czech Republic;
J. Goetzelmann, Magna Exteriors, Sailauf

Abstract

The space frame is used to reinforce a vehicle's structure. The first applications of this technology in the automobile is for tailgates and liftgates. The Magna Exteriors engineering team, with the help of several machine, material and tool suppliers, combined its unique knowledge of design, materials and processing to address the challenge of reducing weight using composite materials and manufacturing processes. The composite space frame achieves a 10% reduction in mass over the equivalent steel reinforcements, the overall liftgate module achieves a 20% saving in mass compared to the equivalent steel liftgate while meeting all OEM performance requirements.

To date several composite space frame designs have been produced by Magna and have successfully passed all component and vehicle-level testing at multiple OEMs. The first serial production began in 2019 for the 2020 model year Toyota Supra.

1. Innovation drivers

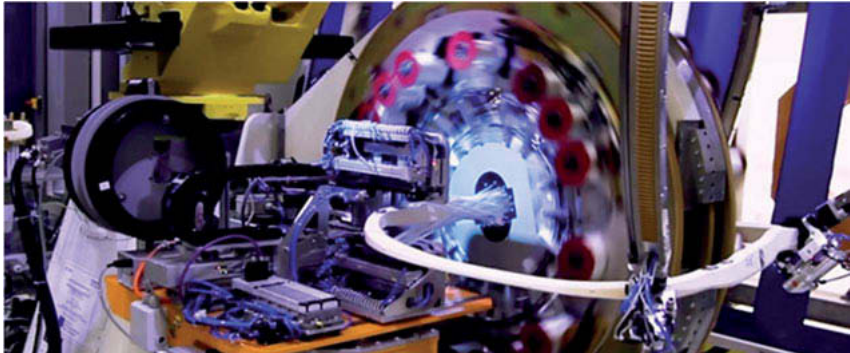
The main drivers were to find a reinforcement that could fulfil the customers' requirements in very difficult packaging situations and kinematic scenarios, coupled with high dimensional stability.

Magna had also previously manufactured a space frame for a liftgate in 2006 using a free-form bent steel tube. This was a low-volume production scenario where 6000 liftgates were produced.

2. Key innovation: winding

The team started with a mind-mapping exercise of possible processes on the market. Many technologies, such as extrusion, blow-molding, etc. were tested for production of the composite space frame. However, no suitable technology was found for producing of the particular space frame desired. Magna would have to have modified existing processes and technology or develop something completely new.

One example is the unique filament-winding technology developed by the team and several partners. The goal of the project was to find technology for placing the roving of glass fiber or any other fiber material on a closed-shaped core with faster cycle times. There was no suitable technology on the market, and Magna had to develop the process itself with external partners. Magna has patents for unique filament-winding machines that are suitable for the requirements of OEMs. It is possible to wind three layers simultaneously with up to 40 rovings per layer. The orientation of rovings is programmable in each position, and as a result, it is possible to also wrap rovings over complex shapes with varying cross-sections. A universal gripper enables winding of different projects with only minor tooling changes.



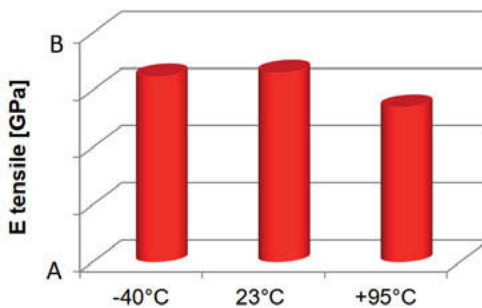
3. First prototype

During the development stage, it was necessary to develop a part for process verification and mechanical analyses. An L-shaped profiled part was chosen as the best option. This L-shaped profile part was chosen since it served not only as a demonstrator part, but the shape was also suitable for several load case analyses in order to get information about material properties and part structure. It was used as the basis for CAE model tuning as well. By

joining four L-profiles it was possible to obtain a closed-shape space frame. All new possible materials, including polyurethane and epoxy, were tested with this part.



Mechanical properties at different temperatures



4. Production process

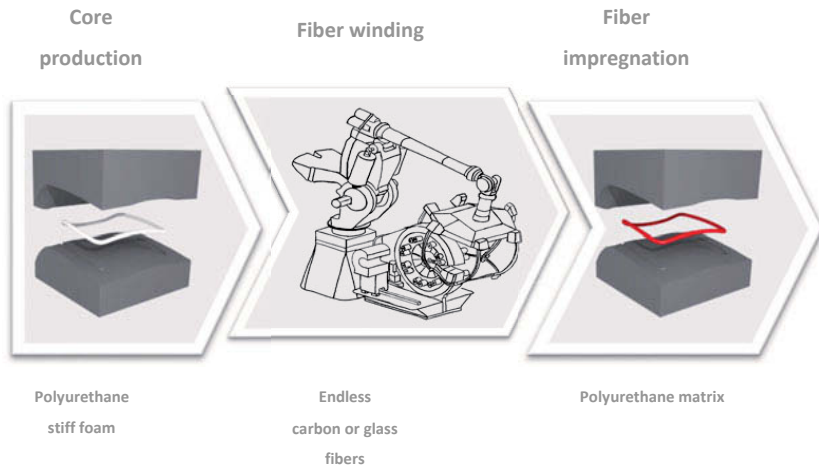
The space-frame production process consists of three main steps. In the first step, the polyurethane foam core is produced. The core has the shape of the final part but with an offset creating a gap for the composite material. In the second step, the core is wound by rovings. In the third step, the fibers are infused with a polyurethane matrix by high-pressure RTM technology.



For production, all the processes were optimized to obtain a competitive overall process for the mass production needed in the automotive sector. For the core, up to 600,000 pieces per year can be produced by one metering unit. Self-clamping molds are used for production without presses.

Filament winding is a fully automated process. The machine was designed to be a universal machine able to run different projects.

For the skin, one press handles up to six molds simultaneously in order to accommodate high-volume production. New material concepts were verified with a focus on foams with low curing times. For the skin, special release agents are used for demolding up to 20 pieces after one application of external release agent to the mold.



5. Competitive impact

This innovation has changed the view of standard rear-door production. It has given room for new design features, more complicated and bolder shapes, and last but not least, reduced weight. Although the competition also offers plastic rear doors, they do not have a continuous load-path reinforcing element such as in our case a composite space frame. Our offering has become much more flexible, providing our end customers much more freedom and customization.

6. Patents

It was known at the time of development that this kind of technology is not on the market anywhere in the world. Several key partners, including VUTS and the Technical University of Liberec helped us develop some elements of the process, which was a key for this particular technology. Every step is automated and the step chain is linked very closely together. The main and key device for laying-up fibrous rovings has been patented worldwide since it includes many process steps, making this device very unique.

Patents include:

Composite stiffener

Device for laying-up a composite product with fibrous rovings

Composite frame of a motor vehicle tail door

Method for automatic rewinding of fiber strips or fiber strands



Process-integrated material compounding for the sustainable manufacture of high-strength components

Fiber direct compounding for economical and resource-saving production

Dipl.-Ing. **Martin Hoyer**, ARBURG GmbH + Co KG, Loßburg

Abstract

The fiber reinforcement of plastics has long been an elementary process in automotive engineering for the targeted modification of component properties. As a result, the range of uses of plastics has been substantially expanded in recent years and further developments have been pushed forward continuously. The main areas of development include cost savings through the substitution of metallic materials, but also typical engineering plastics such as PA with PP, the improvement of sustainability factors such as recyclability, CO₂ footprint and energy consumption as well as increasing the economic efficiency of the production processes. The process presented here for the direct compounding of thermoplastic fiber-composite plastics on an injection-molding machine covers all of the development areas just mentioned.

1. Possible uses of long glass fibers and processing methods

Adapting materials as precisely as possible to component requirements is a basic prerequisite for an ideal component design and a high productivity. Particularly in the case of reinforced plastics, which are often used in technical applications or in automotive engineering, there thus is a desire not only for a flexible adjustment of material and processing parameters but also at the same time for stable and fully traceable processes. The use of fiber-reinforced materials in automotive engineering, whether with short or long glass-fiber reinforcement, has long been 'state of the art'. Above all, the use of materials with the longest possible fibers in order to improve the material properties offers potential in lightweight applications and in the improvement of sustainability indicators. The basic mechanisms and factors influencing the material properties are shown in Fig. 1.



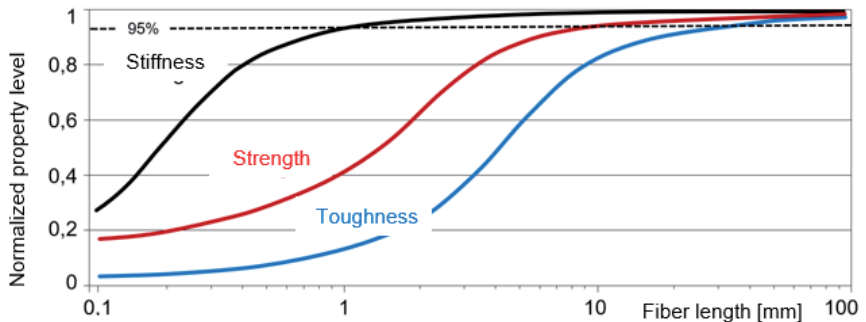
Fig. 1: Dependence of the component mechanical properties on fiber length (source: SKZ)

In addition to reducing weight, fiber reinforcement can also be used specifically to improve component quality and mechanical properties with regard to strength and toughness (see Diagram 1).

Furthermore, the component can be given a different design during the design phase, thus laying the foundation for future developments of automotive components. Specifically, long glass fiber reinforced polypropylene (PP LGF) has, for example, material properties similar to aluminum together with a significantly reduced weight, which leads to material substitution and thus to lighter components. This also means that the long glass fiber reinforced polyamide (PA) previously used for metal substitution can in turn be replaced by long glass fiber reinforced polypropylene. Another advantage of polypropylene is its significantly lower water absorption compared to polyamide and its lower specific weight. When replacing polyamide

with polypropylene, the focus is however less on weight reduction and more on the economic efficiency of the production processes. These economic considerations usually go beyond the injection-molding or compounding process per se and also include areas such as material selection, quality control and documentation. For this reason, processes that are of particular interest are those that can be easily integrated into the existing manufacturing process.

Diagram 1: Quantitative change in mechanical properties stiffness (black), strength (red) and toughness (blue) as a function of fiber length



There are various methods of obtaining longer fibers in components. Either prefabricated long glass fiber granulates are processed or raw glass fibers, usually off a spool of continuous glass fibers, are fed directly into the plastic melt by direct compounding (see Fig. 2).

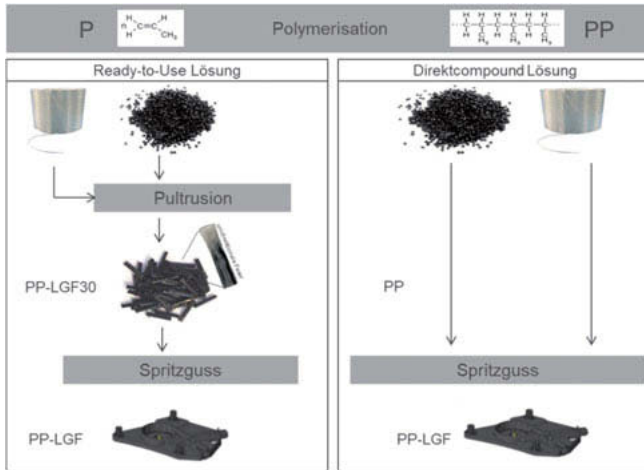


Fig. 2: Schematic of different processes for the fiber reinforcement of polypropylene (PP) (source: SKZ)

In the pultrusion of long glass fiber granulate, continuous glass fibers are embedded or coated in a matrix material. If a thermoplastic matrix material is used, it must be melted before the glass fibers are embedded. Compared to direct compounding, additional energy is therefore required for the melting and the material is subjected to an additional thermal load with possible molecular chain degradation.

The advantages of long glass fiber granulate are their easy handling, as is generally the case when using plastic granulates, and in terms of material quality that the granulates are manufactured on an industrial scale under constant conditions. However, the wide range of long glass fiber granulates makes it necessary for the component design and the entire injection-molding process to be specifically tailored to the respective long glass fiber granulate. In addition, the long glass fiber granulate in question must also be stored in appropriate quantities. With direct compounding, on the other hand, only the basic materials, i.e. the matrix material and raw glass fibers, need to be procured and stored. The process allows great degrees of freedom with regard to fiber quantity and fiber length, since all important parameters can be set directly at the control unit of the injection-molding machine and can thus be individually adapted to the component in question.

It is possible to use a melt compounder in combination with an injection-molding machine for the in-line production of long glass fiber compounds. This type of compounding is an established process and is often used for the production of standardized parts in mass production.

The fiber direct compounding (FDC) process presented here is, on the other hand, a flexible and efficient process that feeds raw glass fibers directly into the plasticizing unit of the injection-molding machine. This makes the process particularly economical and, in addition, there is no need to use an additional compounder. The FDC process is therefore predestined for the production of challenging components in a wide range of variants.

The functional principle of fiber direct compounding (FDC)

In direct fiber compounding, long glass fibers are fed directly to the melt in the plasticizing cylinder of the injection-molding machine during the dosing process (see Fig. 3).

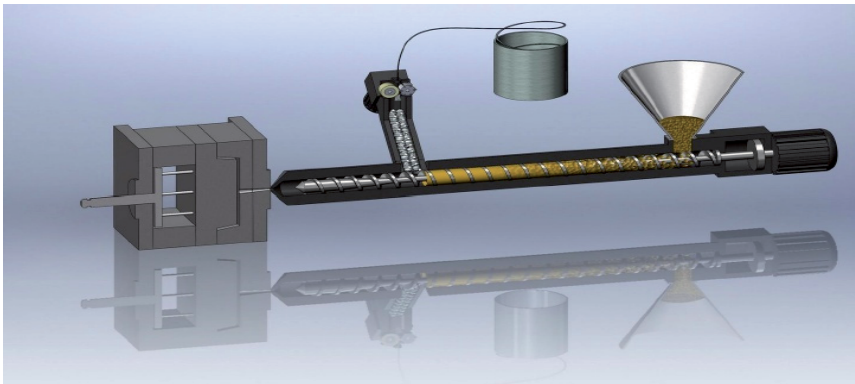


Fig. 3: Schematic of the FDC process (source: SKZ)

One or more strands are drawn off a spool of continuous fiber and fed to a fiber trimming unit. The continuous glass fibers are cut to the desired fiber length in the fiber trimming unit and fed into the plasticizing cylinder of the injection-molding machine via a twin-screw conveyor. The fibers are then worked into the plastic melt by the rotational movement of the plasticizing screw and homogenized. A special plasticizing screw with an adapted geometry is used for direct fiber compounding. This is significantly longer than a standard screw and has a relief area in which the fibers are fed to the screw.

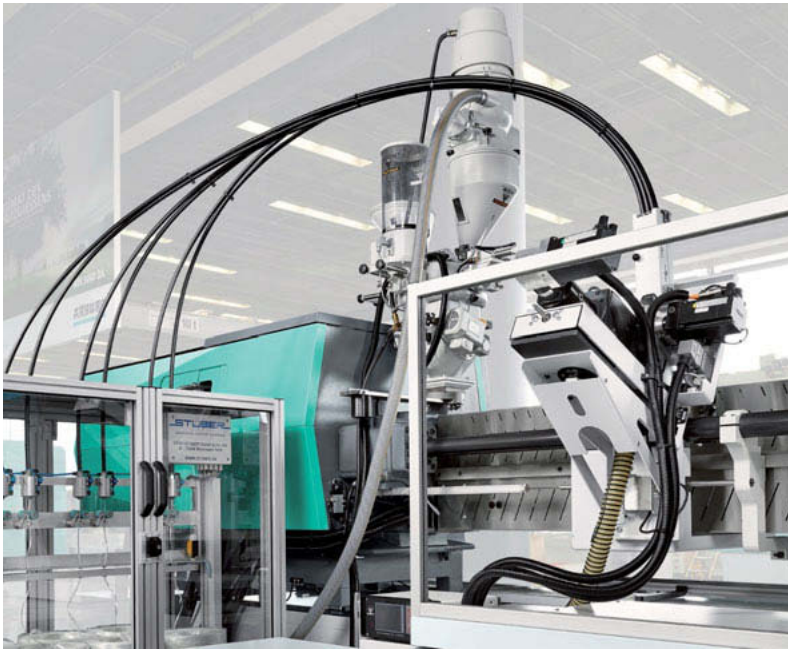


Fig. 4: The compact FDC unit contains the continuous fiber feed, trimming unit, suction system and twin-screw conveyor (source: ARBURG GmbH + Co KG)

The fiber trimming unit is equipped with suitable sensors and control technology to ensure the exact fiber length and quantity. The fiber trimming unit is integrated in the control system of the injection-molding machine and is functionally thus fully integrated into the plasticizing process of the machine (Fig. 4).

With the FDC process from ARBURG fibers with a length between 6 and 217 mm can be processed. Injection units adapted for this process are available for shot weights of 150 - 950 grams (PP GF 30).

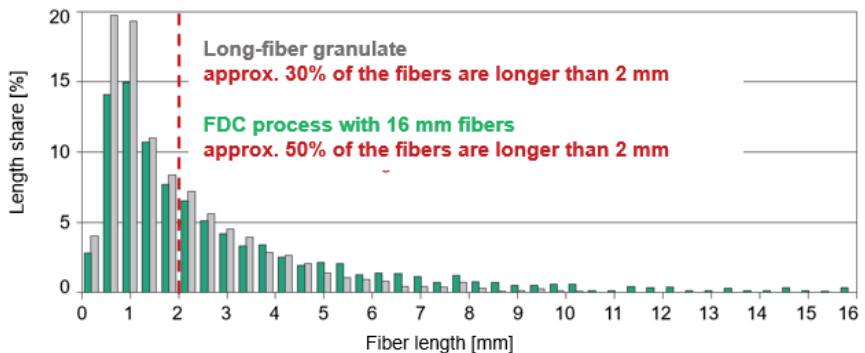
2. Material quality and characteristics

The fiber length and its connection with the matrix plastic is of decisive importance to the quality and the physical properties of the component. In order to assess the quality of a material produced in the FDC process, it is compared with a material consisting of long glass fiber granulate.

In the FDC process it is therefore important for the fulfillment of quality and stability requirements to ensure a melt quality over different process conditions that is comparable to the pultrusion of long glass fiber granulates.

This is achieved by optimizing the molding process and by adapting fiber-direct compounding to the particular process conditions. Predefined sequences are available for controlling the injection-molding machine, and it is also possible to set different parameters individually, such as the fiber content in the component. This is effected, for example, by a process-dependent adjustment of the fiber feed during the dosing process. Compared to long glass fiber granulates, fiber direct compounding calls for a more detailed practical knowledge of the process and the relevant parameters. However, the time required for adjusting all of the parameters is manageable and can be divided into the sampling or setting-up processes that are necessary anyway.

Diagram 2: Comparison of the fiber lengths in the component in FDC and LGF (source: SKZ - excerpt from laboratory report on material testing)



The decisive factor for the quality and strength of the components is the mean fiber length and the fiber length distribution. In order to determine fiber lengths, the plastic portion of the components is removed thermolytically (ashing) and the remaining fibers are counted and measured in part by hand (see Fig. 5).



Fig. 5: Housing (right) and fiber content after ashing (middle)
(source: ARBURG GmbH + Co KG)

Such investigations show that the FDC process, despite plasticization and injection into the mold cavity, has a greater proportion of longer fibers in the component than is the case with long glass fiber granulates (Diagram 2).

An advantage with regard to the fiber length is that in the FDC process the trimmed fibers are fed into the already plasticized matrix material, thereby reducing the strain on the fibers. The loss of long fibers due to fiber breakage during conveyance through the plasticizing screw and injection into the mold cavity is relatively low. This loss can be further reduced by designing the entire melt path for the lowest possible shear and fiber stress.

Plant technology and quality assurance

In order to meet the high quality demands made of components manufactured by the FDC process, all sub-processes that are directly involved in the injection-molding process are monitored by the control unit of the injection-molding machines in every production cycle. This includes, in particular, monitoring the FDC parameters, such as the fiber quantity or the suction forces. Thanks to a modern machine control system, the FDC process is easy to monitor and control and can be individually adapted to individual requirements and production conditions. In addition, the process data of each individual manufacturing process are recorded and saved in relation to the particular component. This also includes the data from

weighing the components immediately after removal from the mold. This means that weight deviations can be detected immediately after injection molding, documented and subsequently sorted into good and bad parts.



Fig. 6: Production cell with FDC unit as well as automated handling and weighing of the fiber-reinforced components (source: ARBURG GmbH + Co KG)

In general, the modern control technology of the production cell allows all production parameters of the injection-molding machine and also the parameters of externally connected measuring systems to be evaluated, saved and assigned to the individual components using modern data acquisition tools. This ensures seamless documentation and process-independent traceability.

Possible applications for direct fiber compounding

Thanks to its characteristics, fiber direct compounding offers the possibility of fine-tuning parameters such as fiber length and fiber quantity to the individual component properties and requirements. In addition, this process also allows the flexible use of different matrix materials. The range of applications in the automobile now includes not only components in the vehicle interior, such as seat shells and door modules, but also components in the engine

area, such as housings, levers and joints. Taking a housing for the radiator as an example, the CO₂ footprint and energy requirements are considered in detail below.

CO₂ and energy analysis: a case study

In addition to cost considerations, the CO₂ footprint is an increasingly important factor in the selection of materials and processes. The total CO₂ balance of a plastic component depends on many parameters that are relevant during the production, use and disposal phases, each having very different proportions in the CO₂ balance. The energy requirements of plasticizing and mold temperature control as well as the compressed air and electricity requirements of the system technology used play an important role in the CO₂ balance of the production phase. The influence of the FDC process on the CO₂ balance of the production phase is considered in more detail below.

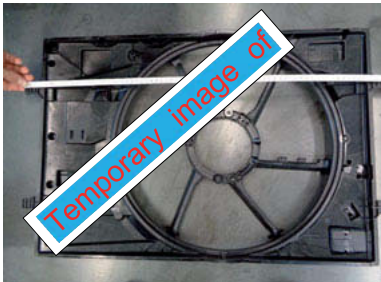
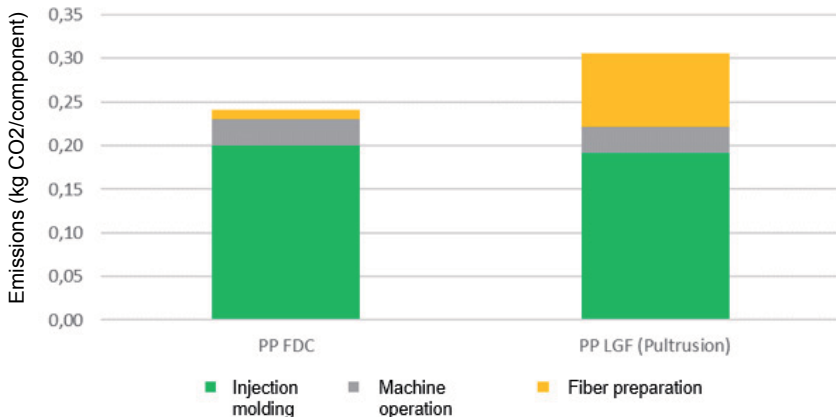


Fig. 6: Fiber-reinforced housing component for use in the automobile
(source: ARBURG GmbH + Co KG)

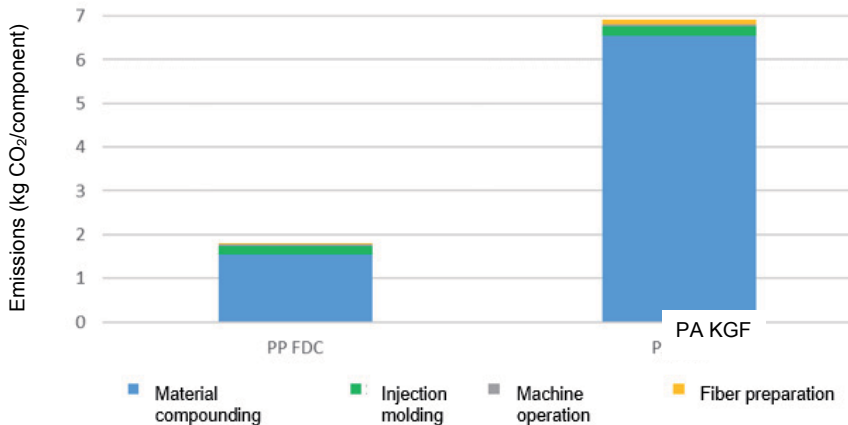
The two methods for producing a housing installed in the vehicle engine compartment are compared below. In the first method, the housing is produced in polypropylene (PP), which is fiber-reinforced by means of direct fiber compounding. In the second process, the component is made from PP long glass fiber granulate. The investigations show that the FDC process achieves a CO₂ reduction of approx. 5 - 10% compared to the long glass fiber granulate, which is largely due to the compounding and pelletizing process not being required (see Diagram 3).

Diagram 3: Comparison of CO₂ emissions in fiber processing by the FDC process and pultrusion



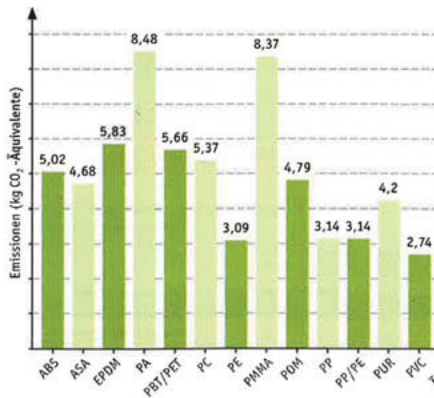
The matrix material used has a very great influence on the CO₂ balance of a component. The production of polyamide granulate thus has a CO₂ footprint of approx. 9 kg CO₂/kg. In contrast, the production of polypropylene only creates approx. 2 kg CO₂/kg in the production phase (see Diagram 5). If the entire CO₂ footprint of the housing component is now considered, the type and quantity of the matrix material used require the largest proportion of the energy required. This means that selection of the material is of enormous importance, since it has the greatest impact on the overall CO₂ balance (see Diagram 4). In addition to the significant reduction in emissions, the procurement costs for polypropylene are significantly lower than for polyamide. Both factors are of decisive importance in the component design and in material selection and must already be taken into account in this phase.

Diagram 4: Emissions arising from the compounding of polypropylene and polyamide



In the housing example the change from PA with short glass fibers to PP LGF reduces emissions by around 75% in the production phase. Additional potential savings result from the high global availability of polypropylene and the situation-related use of recycled matrix or fiber materials. These possible additional savings have not however been quantified for this particular application example. There is an additional CO₂ reduction during the utilization phase due to polypropylene having a lower specific weight than polyamide.

Diagram 5: Emissions during the production of various plastics (source: K-PROFI)



In summary, in the example described the substitution of polypropylene for polyamide in combination with the FDC process provides great advantages in terms of cost-effectiveness, as well as material and component properties. In addition, fiber direct compounding also enables component developers to improve the CO₂ footprint of production processes by using 'simple standard materials'.

Summary

In summary, the advantages of the method presented are:

1. Improved cost efficiency
2. Greater flexibility (materials / fibers / proportions)
3. Less dependence on material suppliers
4. Shorter transportation routes
5. Improved CO₂ balance

The FDC process is already being used successfully in high-volume series production. These FDC-optimized components meet or improve all quality requirements at significantly lower costs. The production processes can be fully automated and can be quickly integrated into the particular production environment thanks to networked control technology.

Outlook

The major trends in the automotive industry are electromobility, autonomous driving and, in recent years, requirements regarding resource efficiency and sustainability that have become increasingly important. In order to fulfill the latter and also to achieve the greatest possible

range, especially in electric automobiles, the use of fiber-reinforced plastics represents a good option. However, it is already possible in the design and production phases to probe energy and resource-saving processes and to consider the choice of materials with regard to their CO₂ balance (Table 5). This makes the planning and design phase even more important at the beginning. In the later production phase, these efforts pay off in the form of thrifty and cost-effective processes. The FDC process combines modular technology with flexible and simple options for process control. On the one hand, this enables easy integration into existing production processes and, on the other hand, a high level of flexibility, which is becoming more and more important in increasingly demanding and at the same time more volatile markets. The flexibility of the FDC process also enables it to be combined with other methods of plastics processing.

Prozessintegrierte Werkstoffaufbereitung für eine nachhaltige Fertigung hochfester Bauteile

Das Faser-Direkt-Compoundieren für eine wirtschaftliche und ressourcenschonende Fertigung

Dipl.-Ing. **Martin Hoyer**, ARBURG GmbH + Co KG, Loßburg

Kurzfassung

Die Faserverstärkung von Kunststoffen ist im Automobilbau schon seit langem ein elementares Verfahren, um Eigenschaften von Bauteilen gezielt zu modifizieren. Dadurch wurde in den letzten Jahren somit das Einsatzspektrum der Kunststoffe substantiell erweitert und kontinuierlich Weiterentwicklungen vorangetrieben. Zu den Entwicklungsschwerpunkten gehören Kosteneinsparungen durch Substitution von metallischen Werkstoffen aber auch typischer technischer Kunststoffe wie PA durch PP, Verbesserung der Nachhaltigkeitsfaktoren wie Rezyklierbarkeit, CO₂-Fussabdruck und Energieverbrauch sowie Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Produktionsprozesse. Das hier vorgestellte Verfahren zur direkten Aufbereitung von thermoplastischen Faserverbund-Kunststoffen auf einer Spritzgießmaschine deckt alle oben genannten Entwicklungsschwerpunkte ab.

1. Einsatzmöglichkeiten von Langglasfasern und Verarbeitungsverfahren

Werkstoffe möglichst genau an die Bauteilanforderungen anzupassen, ist eine Grundvoraussetzung für ein ideales Bauteiledesign und eine hohe Produktivität. Insbesondere bei verstärkten Kunststoffen, die häufig in technischen Anwendungen oder im Automobilbau Einsatz finden, besteht deshalb der Wunsch nach einer flexiblen Anpassung von Material- und Verarbeitungsparametern und gleichzeitig nach stabilen und lückenlos zurück verfolgbaren Prozessen. Der Einsatz von faserverstärkten Werkstoffen im Automobilbau, sei es mit Kurzglasfaser- oder Langglasfaserverstärkung, ist seit langem "Stand der Technik". Vor allem die Verwendung von Werkstoffen mit möglichst langen Fasern zur Verbesserung der Werkstoffeigenschaften bietet Potenzial bei Leichtbauanwendungen und bei der Verbesserung von Nachhaltigkeitskennzahlen. Die grundsätzlichen Mechanismen und Einflussfaktoren auf die Werkstoffeigenschaften sind in Bild 1 dargestellt.

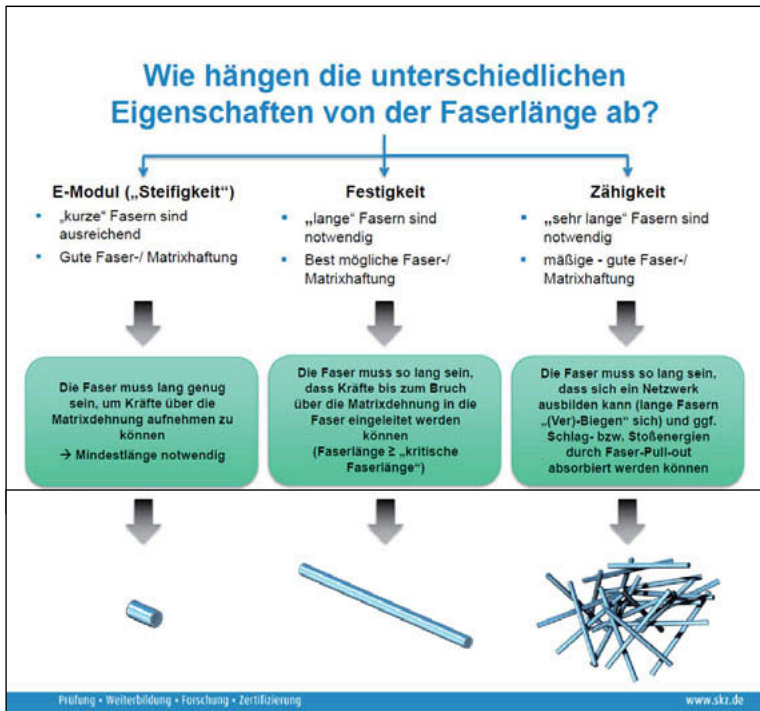


Bild 1: Abhängigkeit der mechanischen Bauteileigenschaften von der Faserlänge.

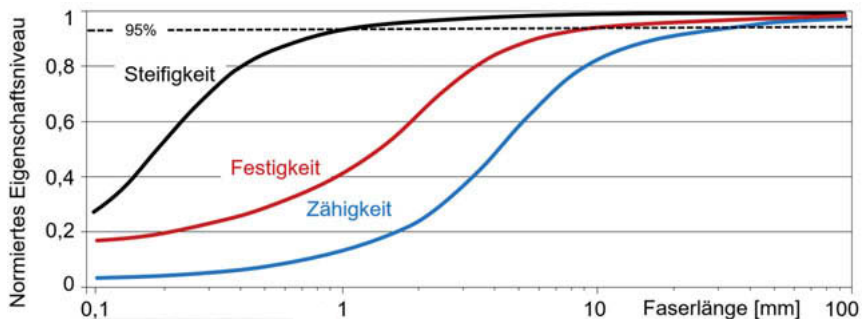
Bild: SKZ

Zusätzlich zur Gewichtsreduktion lassen sich mit der Faserverstärkung auch gezielt die Bauteilqualität und die mechanischen Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit und Zähigkeit verbessern (siehe Diagramm 1).

Weiterhin kann bereits in der Designphase das Bauteil anders konstruiert und somit der Grundstein für zukünftige Weiterentwicklungen von Automobil-Komponenten gelegt werden. Konkret hat beispielsweise langglasfaserverstärktes Polypropylen (PP LGF) ähnliche Werkstoffeigenschaften wie Aluminium bei wesentlich reduziertem Gewicht, was zu einer Materialsubstitution und somit leichteren Bauteilen führt. Das bedeutet auch, dass bisher für die Metallsubstitution eingesetzte langglasfaserverstärkte Polyamid (PA) ihrerseits durch langglasfaserverstärktes Polypropylen substituiert werden können. Weiterer Vorteil von Polypropylen: die im Vergleich zu Polyamid deutlich geringere Wasseraufnahme und das geringere spezifische Gewicht. Bei

der Substitution von Polyamid durch Polypropylen steht jedoch weniger die Gewichtsreduktion, sondern vielmehr die Wirtschaftlichkeit der Produktionsprozesse im Vordergrund. Diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen gehen meist über den bloßen Spritzgieß- oder Compoundierprozess hinaus und umfassen auch Bereiche wie Materialauswahl, Qualitätskontrolle und Dokumentation. Daher sind solche Verfahren besonders interessant, die einfach in den bestehenden Fertigungsprozess eingebunden werden können.

Diagramm 1: Quantitative Änderung der mechanischen Eigenschaften Steifigkeit (schwarz), Festigkeit (rot) und Zähigkeit (blau) abhängig von der Faserlänge



Es gibt verschiedene Methoden, um längere Fasern in Bauteilen zu erhalten. Entweder es werden vorgefertigte Langglasfaser-Granulate verarbeitet oder Rohglasfasern, meist von einer Endlosglasfaserspule, durch Direkt-Compoundieren der Kunststoffschmelze direkt zugeführt (siehe Bild 2).

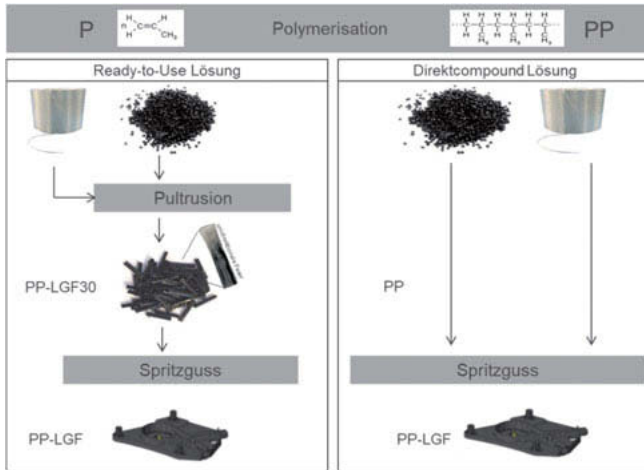


Bild 2: Schematische Darstellung unterschiedlicher Verfahren der Faserverstärkung von Polypropylen (PP). Bild: SKZ

Bei der Pultrusion von Langglasfasergranulat werden Endlosglasfasern in einen Matrixwerkstoff eingebettet oder ummantelt. Wird ein thermoplastischer Matrixwerkstoff eingesetzt ist es erforderlich, dass dieser vor der Einbettung der Glasfasern aufgeschmolzen wird. Somit ist, im Vergleich zum Direkt-Compoundieren, zusätzlicher Energieaufwand für das Aufschmelzen erforderlich und der Werkstoff wird einer zusätzlichen thermischen Belastung mit eventuellem Molekülkettenabbau ausgesetzt.

Vorteile bei Langglasfasergranulaten sind deren einfache Handhabung, wie generell bei der Verwendung von Kunststoffgranulaten, und in Bezug auf die Materialqualität, dass die Granulate unter konstanten Bedingungen großtechnisch hergestellt werden. Die große Bandbreite an Langglasfasergranulaten macht es jedoch notwendig, dass das Bauteildesign und der gesamte Spritzgießprozess spezifisch auf das jeweilige Langglasfasergranulat abgestimmt wird. Zudem muss das jeweilige Langglasfasergranulat auch in entsprechenden Mengen bevorratet werden.

Beim Direkt-Compoundieren müssen dagegen lediglich die Grundwerkstoffe, also der Matrixwerkstoff und Rohglasfasern, beschafft und gelagert werden. Das Verfahren lässt dabei große Freiheitsgrade hinsichtlich Fasermenge und Faserlänge, da alle wichtigen Parameter direkt an der Steuerung der Spritzgießmaschine eingestellt und so individuell an das jeweilige Bauteil angepasst werden können.

Der Einsatz eines Schmelzecomponders in Kombination mit einer Spritzgießmaschine zur Inline-Herstellung von Langglasfasercompounds ist möglich. Diese Art des Compoundierens ist ein etabliertes Verfahren und wird häufig für die Produktion standardisierter Bauteile in Massenproduktion eingesetzt.

Das hier präsentierte Verfahren des Faser-Direkt-Compoundierens (FDC) ist hingegen ein flexibel einsetzbarer und effizienter Prozess, der Rohglasfasern in die Plastifiziereinheit der Spritzgießmaschine direkt zuführt. Das macht dieses Verfahren besonders wirtschaftlich und darüber hinaus entfällt somit der Einsatz eines zusätzlichen Compounders. Das FDC-Verfahren ist daher für die Fertigung anspruchsvoller Bauteile mit hoher Variantenvielfalt prädestiniert.

Funktionsprinzip Faser-Direkt-Compoundieren (FDC)

Beim Faser-Direkt-Compoundieren werden Langglasfasern direkt der Schmelze im Plastifizierzylinder der Spritzgießmaschine während dem Dosiervorgang zugeführt (siehe Bild 3).

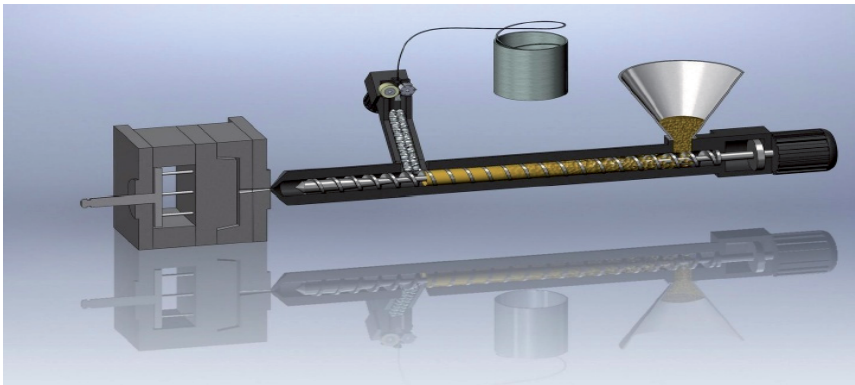


Bild 3: Schematische Darstellung des FDC-Verfahrens. Bild: SKZ

Hierbei werden von einer Endlosfaserspule ein oder mehrere Stränge abgezogen und einem Faserschneidwerk zugeführt. Im Faserschneidwerk werden die Endlosglasfasern auf die gewünschte Faserlänge abgeschnitten und über einen Doppelschneckenförderer in den Plastifizierzylinder der Spritzgießmaschine befördert. Die Fasern werden dann durch die Drehbewegung der Plastifizierschnecke in die Kunststoffschmelze eingearbeitet und homogenisiert. Für

das Faser-Direkt-Compoundieren wird eine spezielle Plastifizierschnecke mit angepasster Geometrie verwendet. Diese ist deutlich länger im Vergleich zu einer Standard-Schnecke und verfügt über einen Entlastungsbereich in dem die Fasern der Schnecke zugeführt werden.

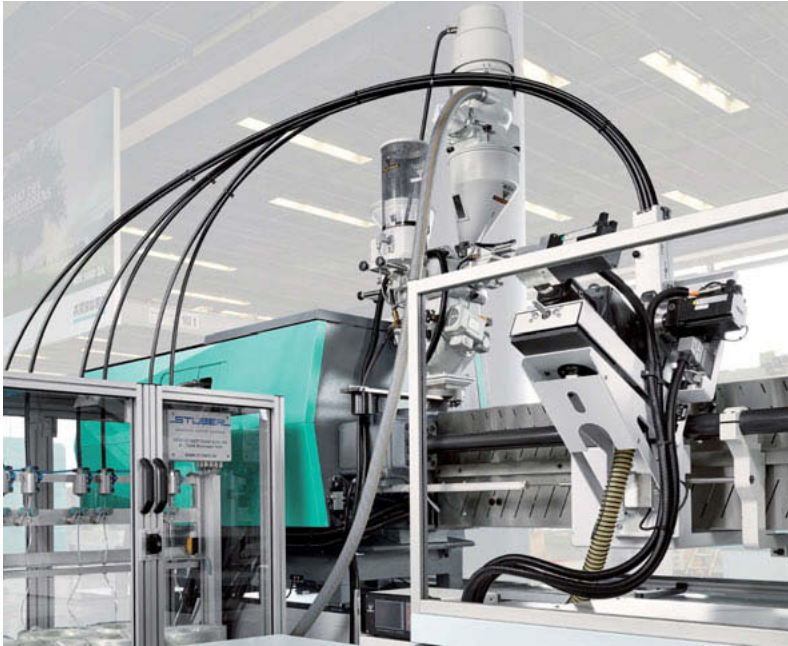


Bild 4: Die kompakte FDC-Einheit beinhaltet Endlosfaserzuführung, Schneidwerk, Absaugung und Doppelschneckenförderer. Bild: ARBURG GmbH + Co KG

Das Faserschneidwerk verfügt über geeignete Sensorik und Regelungstechnik um die exakte Faserlänge und Fasermenge sicherzustellen. Das Faserschneidwerk ist in die Steuerung der Spritzgießmaschine eingebunden und somit funktionell komplett in den Plastifiziervorgang der Maschine integriert (Bild 4).

Das FDC-Verfahren von ARBURG ermöglicht eine Verarbeitung von Fasern mit einer Länge zwischen 6 und 217 mm. Für dieses Verfahren angepasste Spritzeinheiten sind für Schussgewichte von 150 – 950 Gramm (PP GF 30) verfügbar.

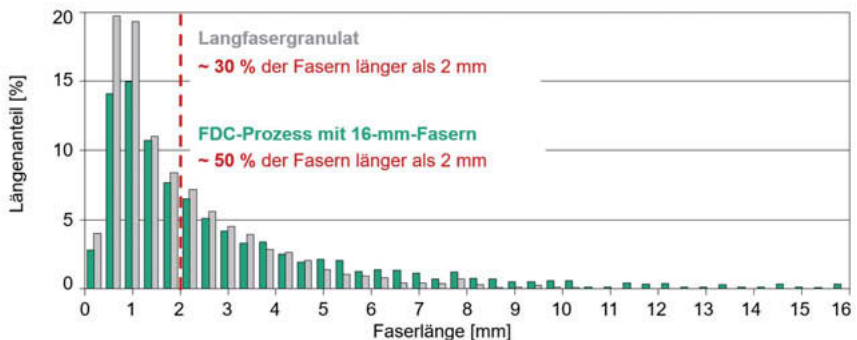
2. Werkstoffqualität und -charakteristika

Für die Qualität und die physikalischen Eigenschaften des Bauteils ist die Faserlänge und deren Verbindung mit dem Matrixkunststoff entscheidend. Um die Qualität eines im FDC-Verfahren hergestellten Werkstoffs zu beurteilen, wird dieser mit einem Langglasfasergranulat-Werkstoff verglichen.

Wichtig für die Erfüllung von Qualitäts- und Stabilitätsanforderungen ist daher, beim FDC-Verfahren eine der Pultrusion von Langglasfasergranulaten vergleichbare Schmelzequalität über unterschiedliche Prozessbedingungen hinweg sicherzustellen.

Das wird durch die Optimierung der Formteilbildung und durch die bauteilspezifische Anpassung des Faser-Direkt-Compoundierens auf die jeweiligen Prozessbedingungen erreicht. Für die Steuerung der Spritzgießmaschine stehen vordefinierte Abläufe zur Verfügung, zudem ist es möglich, unterschiedliche Parameter wie beispielsweise der Faseranteil im Bauteil individuell einzustellen. Dies wird beispielsweise durch eine prozessabhängige Einstellung der Faserzuführung beim Dosiervorgang erreicht. Im Vergleich zu Langglasfasergranulaten ist beim Faser-Direkt-Compoundieren ein detaillierteres Know-how des Prozesses und der relevanten Parameter erforderlich. Der zeitliche Aufwand für die Anpassung aller Parameter ist jedoch überschaubar und lässt sich in die ohnehin notwendigen Abmusterungs- bzw. Einrichtungsabläufe integrieren.

Diagramm 2: Vergleich der Faserlängen im Bauteil bei FDC und LGF
(Quelle: SKZ – Auszug aus Laborbericht zur Werkstoffprüfung)



Entscheidend für die Qualität und die Festigkeit der Bauteile ist mittlere Faserlänge und die Faserlängenverteilung. Um die Faserlängen zu ermitteln, wird der Kunststoffanteil aus den Bauteilen thermolytisch abgezogen (Veraschen) und die übrig gebliebenen Fasern teilweise manuell ausgezählt und vermessen (siehe Bild 5).



Bild 5: Gehäuse (Rechts) und Faseranteil nach dem Veraschen (Mitte).

Bild: ARBURG GmbH + Co KG

Solche Untersuchungen zeigen, dass beim FDC-Verfahren trotz Plastifizierung und Einspritzen in die Werkzeugkavität der Anteil längerer Fasern im Bauteil größer, ist als bei Langglasfasergranulaten (Diagramm 2).

Vorteil in Bezug auf die Faserlänge ist, dass die geschnittenen Fasern beim FDC-Verfahren dem bereits plastifizierten Matrixwerkstoff zugeführt werden, was die Belastung für die Fasern reduziert. Der Verlust an langen Fasern durch Faserbruch während der Förderung durch die Plastifizierschnecke und das Einspritzen in die Werkzeugkavität ist dabei relativ gering. Dieser Verlust lässt sich weiter reduzieren, indem der gesamte Schmelzpfad auf eine möglichst geringe Scher- und Faserbelastung ausgelegt wird.

Anlagentechnik und Qualitätssicherung

Um die hohen Anforderungen an die Qualität der mit dem FDC-Verfahren hergestellten Bauteile zu erfüllen, werden sämtliche Teilprozesse, die direkt am Spritzgießprozess beteiligt sind, von der Steuerung der Spritzgießmaschinen bei jedem Fertigungszyklus überwacht. Dazu gehört insbesondere die Überwachung der FDC-Parameter, wie Fasermenge oder Absaugkräfte. Durch eine moderne Maschinensteuerung ist das FDC-Verfahren leicht kontrollier- und indivi-

duell an die jeweiligen Anforderungen und Produktionsbedingungen anpassbar. Darüber hinaus werden die Prozessdaten jedes einzelnen Fertigungsvorgangs erfasst und bauteilbezogen gespeichert. Dazu gehören auch die Daten aus dem Wiegen der gefertigten Bauteile direkt nach dem Entformen. Somit können Gewichtsabweichungen direkt nach dem Spritzgießen erkannt, dokumentiert und nachgeschaltete Sortierung nach Gut- und Schlechteilen durchgeführt werden.



Bild 5: Produktionszelle mit FDC-Einheit sowie automatisiertem Handling und Wiegen der faserverstärkten Bauteile. Bild: ARBURG GmbH + Co KG.

Generell können durch die moderne Steuerungstechnik der Fertigungszelle sämtliche Produktionsparameter der Spritzgießmaschine sowie Parameter extern angeschlossener Messsysteme über moderne Datenerfassungstools zusammengeführt ausgewertet, gespeichert und den einzelnen Bauteilen zugeordnet werden. Das gewährleistet eine lückenlose Dokumentation und prozessunabhängige Rückverfolgbarkeit.

Einsatzmöglichkeiten für das Faser-Direkt-Compoundieren

Das Faser-Direkt-Compoundieren bietet aufgrund seiner Eigenschaften die Möglichkeit, die Parameter wie Faserlänge und Fasermenge detailliert auf die individuellen Bauteileigenschaften und Anforderungen abzustimmen. Darüber hinaus ermöglicht dieses Verfahren auch den

flexiblen Einsatz unterschiedlicher Matrixwerkstoffe. Das Einsatzspektrum im Automobil umfasst mittlerweile Bauteile im Fahrzeuginnenbereich wie Sitzschalen und Türmodule aber auch Bauteile im Motorbereich wie Gehäuse, Hebel und Gelenke. Anhand eines Gehäuses für den Motorkühler werden im Folgenden detailliert der CO₂-Fußabdruck und Energiebedarf betrachtet.

CO₂- und Energiebetrachtung an einem Fallbeispiel

Bei der Materialauswahl ist neben der Kostenbetrachtung der CO₂-Fußabdruck ein immer wichtiger werdender Faktor für die Auswahl von Werkstoffen und Verfahren. Die gesamte CO₂-Bilanz eines Kunststoffbauteils hängt von vielen Parametern ab, die während der Produktions-, der Nutzungs- und der Entsorgungsphase relevant sind und jeweils sehr unterschiedliche Anteile an der CO₂-Bilanz haben. Für die CO₂-Bilanz der Produktionsphase spielen maßgeblich der Energiebedarf der Plastifizierung und Werkzeugtemperierung sowie der Druckluft- und Strombedarf der eingesetzten Anlagentechnik eine wichtige Rolle. Welchen Einfluss das FDC-Verfahren auf die CO₂-Bilanz der Produktionsphase hat wird im Folgenden näher betrachtet.

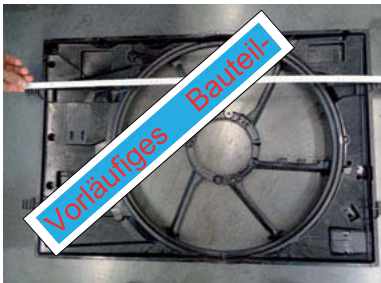
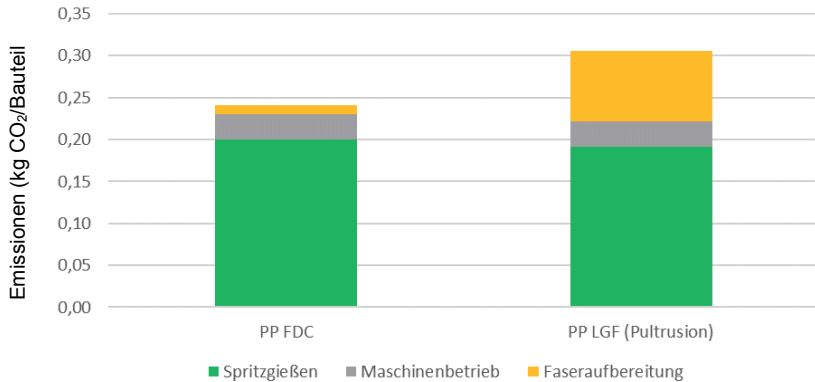


Bild 6: Faserverstärktes Gehäusebauteil für den Einsatz im Automobil.

Bild: ARBURG GmbH + Co KG

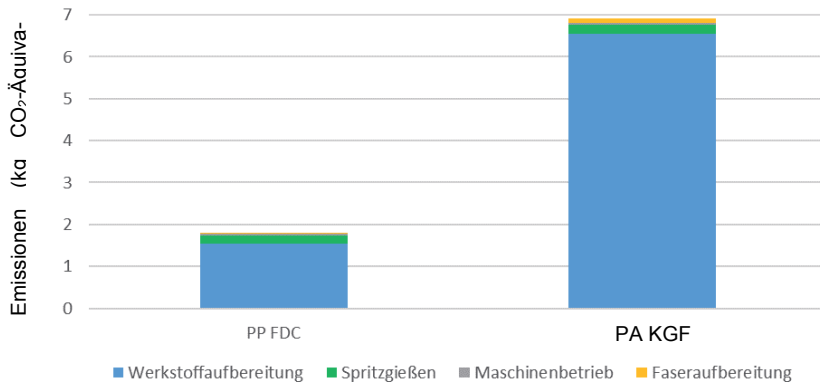
Im Folgenden werden die zwei Verfahren zur Herstellung eines im Kraftfahrzeug verbauten Aufnahmegehäuses im Motorraum verglichen. Beim ersten Verfahren wird das Gehäuse aus Polypropylen (PP) gefertigt, das mittels Faser-Direkt-Compoundieren faserverstärkt wird. Beim zweiten Verfahren wird das Bauteil aus PP Langglasfasergranulat gefertigt. Die Untersuchungen zeigen, dass mit dem FDC-Verfahren eine CO₂-Reduktion von ca. 5 – 10 % im Vergleich zum Langglasfasergranulat erzielt wird, welche größtenteils aus dem nicht benötigten Compoundier- und Granulierprozess resultiert (siehe Diagramm 3).

Diagramm 3: Vergleich der CO₂-Emissionen bei der Faseraufbereitung durch FDC-Verfahren und Pultrusion



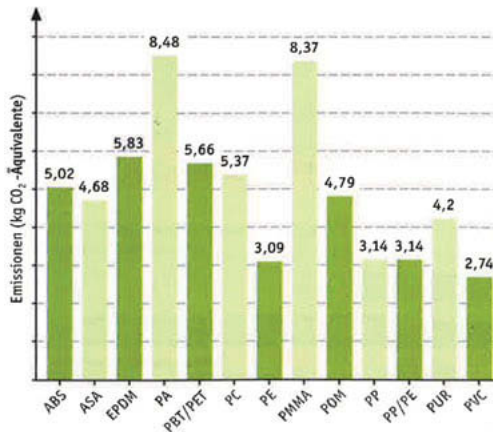
Sehr großen Einfluss auf die CO₂-Bilanz eines Bauteils hat der eingesetzte Matrixwerkstoff. So hat die Herstellung von Polyamid-Granulat einen CO₂-Fußabdruck von ca. 9 kg CO₂ /kg. Die Herstellung von Polypropylen verursacht hingegen nur ca. 2 kg CO₂ /kg in der Herstellungsphase (siehe Diagramm 5). Betrachtet man nun den gesamten CO₂-Fußabdruck des Gehäuse-Bauteils benötigen die Art und Menge des eingesetzten Matrixwerkstoffes den größten Anteil an der benötigten Energie. Das bedeutet, dass der Auswahl des Werkstoffes enorme Bedeutung zukommt, da dieser die Gesamt-CO₂-Bilanz am stärksten beeinflusst (siehe Diagramm 4). Neben der deutlichen Emissionsreduktion sind im Vergleich zu Polyamid die Beschaffungskosten für Polypropylen deutlich niedriger. Beide Faktoren sind bereits beim Bauteildesign und der Materialauswahl ausschlaggebend und müssen bereits in dieser Phase berücksichtigt werden.

Diagramm 4: Bei der Aufbereitung von Polypropylen und Polyamid entstehende Emissionen



Der Wechsel von PA mit Kurzglasfasern auf PP LGF bewirkt beim Beispiel des Gehäuses eine Emissionsreduktion um rund 75 % in der Produktionsphase. Zusätzliche Einsparpotenziale ergeben sich durch die hohe weltweite Verfügbarkeit von Polypropylen sowie dem situationsbezogenen Einsatz von rezyklierten Matrix- oder Faserwerkstoffen. Diese zusätzlichen Einsparpotenziale wurden für das gezeigte Anwendungsbeispiel jedoch nicht quantifiziert. Eine zusätzliche CO₂-Reduktion ergibt sich während der Nutzungsphase durch das niedrigere spezifische Gewicht von Polypropylen gegenüber Polyamid.

Diagramm 5: Emissionen bei der Herstellung verschiedener Kunststoffe
(Quelle: K-PROFI)



Zusammengefasst erbringt für das beschriebene Beispiel die Substitution von Polyamid durch Polypropylen in Kombination mit dem FDC-Verfahren große Vorteile in Bezug auf Wirtschaftlichkeit sowie Material- und Bauteileigenschaften. Darüber hinaus ermöglicht das Faser-Direkt-Compoundieren es den Bauteilentwicklern auch, die CO₂-Bilanz der Produktionsprozesse durch „einfache Standard-Werkstoffe“ zu verbessern.

Zusammenfassung

Zusammengefasst bestehen die Vorteile vorgestellten Verfahrens in:

1. besserer Kosteneffizienz
2. höherer Flexibilität (Werkstoffe / Fasern / Mengenverhältnissen)
3. mehr Unabhängigkeit von Werkstofflieferanten
4. kürzere Transportwegen
5. bessere CO₂-Bilanz

Das FDC-Verfahren wird bereits in der Großserienproduktion erfolgreich eingesetzt. Diese FDC-optimierten Bauteile erfüllen oder verbessern alle Qualitätsanforderungen bei deutlich niedrigeren Kosten. Die Herstellungsprozesse sind komplett automatisierbar und durch verteilte Steuerungstechnik schnell in die jeweilige Produktionsumgebung integrierbar.

Ausblick

Die großen Trends in der Automobilbranche sind Elektromobilität, autonomes Fahren sowie in den letzten Jahren immer wichtiger gewordenen Anforderungen hinsichtlich Ressourcen-Effizienz und Nachhaltigkeit. Um Letzteres zu erfüllen sowie um eine möglichst hohe Reichweite insbesondere bei E-Automobilen zu erzielen, bietet sich der Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen an. Doch bereits in der Design- und in der Herstellungsphase ist es möglich, energie- und ressourcenschonende Verfahren zu sondieren und die Materialauswahl auch im Hinblick auf deren CO₂-Bilanz zu betrachten (Tabelle 5). Damit gewinnt die Planungs- und Designphase zu Beginn noch mehr an Bedeutung. In der späteren Herstellungsphase zahlen sich jedoch diese Aufwände in Form von sparsamen und wirtschaftlichen Prozessabläufen aus. Das FDC-Verfahren vereint eine modulare Technologie mit flexiblen und einfachen Möglichkeiten der Prozesskontrolle. Das ermöglicht zum einen die einfache Integration in bestehende Produktionsprozesse und zum anderen eine hohe Flexibilität, die bei zunehmend anspruchsvolleren und gleichzeitig volatileren Märkten immer wichtiger wird. Die Flexibilität des FDC-Verfahrens ermöglicht darüber hinaus dessen Kombination mit anderen Verfahren der Kunststoffverarbeitung.

Crash simulation of the new TNGA intake manifold in glass-fiber-reinforced polyamide

Breakage-behavior optimization through crash-test-correlated simulation

Joachim De Boever, M.Sc., Toyota Motor Europe, Zaventem, Belgium;
Dr. Grégory Spingler, Novares, Lens, France

Abstract

In order to accelerate the 2050 challenge of 'New Vehicle Zero CO₂ Emission' Toyota is developing a new engine series for lower fuel consumption, higher performance and globally better productivity based on the 'Toyota New Global Architecture (TNGA) concept'. For the 1.5L gasoline engine a new intake manifold was developed in collaboration between Novares, Toyota Motor Corporation and Toyota Motor Europe. Many challenges arose in achieving a high performance, high function reliability, light and compact design whilst also fulfilling the severe strength requirements (vehicle crash and burst pressure). Toyota is committed to moving people in the safest and most responsible way. In order to better assess and represent people's safety in the event of a road accident, the Euro-NCAP¹ is implementing from 2020 a new frontal impact test called MPDB². In this new assessment, speed and vehicle overlap have increased, resulting in more strain on the engine compartment parts. For the TNGA engine the intake manifold is positioned in the front of the engine compartment and is impacted during a frontal crash test. This paper describes the philosophy and methodology used to prevent contact between the intake manifold and the fuel system in order to rule out fuel leakage during a crash test. From initial crash test simulations, the behavior and breakage mode of the intake manifold were analysed and an innovative design was selected. In this design the surge tank breaks off and is pushed under the ports at high impact forces. These ports were designed with a high rigidity in order to act as a barrier to prevent the intake manifold from coming into contact with the fuel system. The CAE model was then correlated with a component crash test to further improve its accuracy by optimizing the material model parameters: Young's modulus and the breakage strain rate. From this optimization, a good correlation of 'impactor force' versus 'impactor stroke' could be seen. Through subsequent CAE development, material was added to increase stiffness in the critical areas and a high degree of weight reduction was achieved by removing material in non-critical/non-functional areas. The final optimized design

results in a best-in-class strength-to-weight ratio intake manifold which has no contact with the low pressure fuel system during vehicle crash tests.

¹ New Car Assessment Program ² Mobile Offset Progressive Deformable Barrier

1. Introduction

In order to assist in achieving a sustainable society Toyota is continuously developing measures to contribute positively to the planet and our society. In October 2015, Toyota Motor Corporation published the 'Toyota Environmental Challenge 2050', which consists of six challenges. One of the challenges is the 'New Vehicle Zero CO₂ Emissions Challenge' whose target is to achieve by 2050 a reduction of vehicle CO₂ emissions by 90% in comparison with 2010 levels (Fig. 1). In order to reach the 2050 ideal, in September 2018 the target for 2030 was set: 'to reduce CO₂ emissions in g-CO₂/km from new vehicles by 35% or more'.

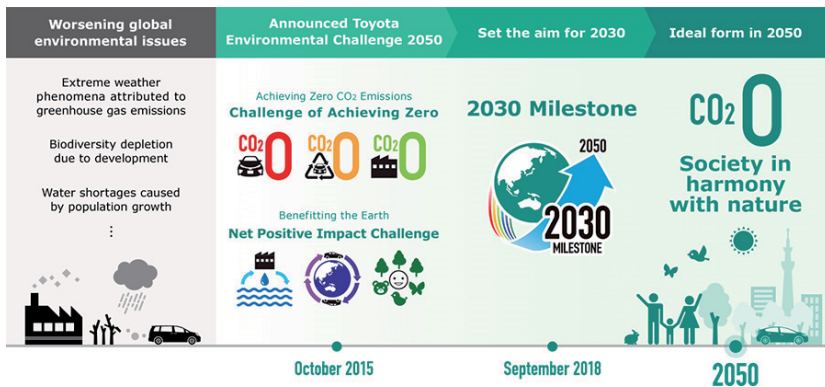


Fig. 1: Toyota Environmental Challenge 2050

In order to accelerate this challenge Toyota is developing a new engine series for lower fuel consumption, higher performance and globally better productivity based on the 'Toyota New Global Architecture (TNGA) concept'. For the 1.5L gasoline engine new intake manifolds were developed in collaboration between Novares, Toyota Motor Corporation and Toyota Motor Europe. Two variants were developed: one for the conventional and one for the hybrid 1.5L engine. Many challenges arose in achieving a high performance, high function reliability, light and compact design while also fulfilling the severe strength requirements (vehicle crash and burst pressure). For the TNGA engine the intake manifold is positioned in the front of the engine compartment and is impacted during a frontal crash test.

Up until 2019 there were two types of frontal impact crash test:

- Full-width rigid barrier (FRONT) : a crash against a rigid barrier with full overlap at a test speed of 50km/h.
- Offset-deformable barrier (ODB) : a crash with a 40% overlap into a deformable barrier at a test speed of 64km/h.

In 2020 the Euro-NCAP implemented an additional test:

- Mobile progressive deformable barrier (MPDB) : this simulates a head-on collision with a 50% overlap between the vehicle to be assessed and an approx. 1400kg moving trolley with a PDB, made of alloy, representing a typical, widely used small family car. The vehicle and the trolley are both travelling at the same speed of 50km/h (Fig. 2).

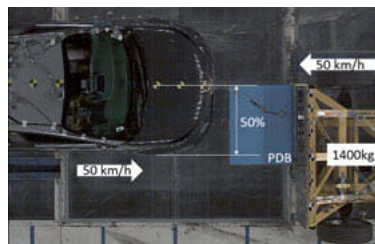


Fig. 2: Test set-up of the MPDB crash test

In order to reduce the development cost and time as much as possible a crash simulation model for the intake manifold with its surrounding components was developed in collaboration between Novares and Toyota. The boundary conditions, material model selection, validation of the simulation and finally breakage-behavior optimization, in order to prevent contact with the fuel system parts, are presented in this paper.

2. Overview

The TNGA naturally aspirated engine series utilizes an intake module positioned in the front of the engine compartment. The fuel system (fuel rail, injectors, pressure sensors, and so on) is positioned in close proximity above and/or below the intake ports of the manifold (Fig. 3). Due to this set-up, there is a risk that during a frontal impact the intake manifold will break and impact the fuel system resulting in a fuel leak.

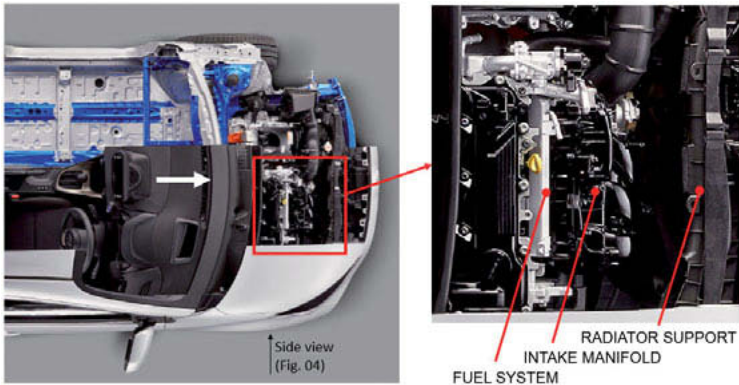


Fig. 3: Engine position in the vehicle (2020 Toyota Yaris Hybrid)

Fig. 4 shows the surrounding parts of the intake manifold of the 1.5L TNGA conventional engine. The hybrid version of this engine was developed through the same methodology as presented in this paper, so only the conventional version will be explained in detail. The 1.5L conventional engine is a direct-injection engine that has a high-pressure fuel rail below the ports and a low-pressure fuel sensor above the ports. The high-pressure fuel rail can withstand high impact forces from the intake manifold due to its high wall thickness and rigid structure so a certain contact force is allowed but the low-pressure fuel sensor which has a low wall thickness cannot have any contact with the intake manifold during the crash test in order to avoid the risk of fuel leakage.

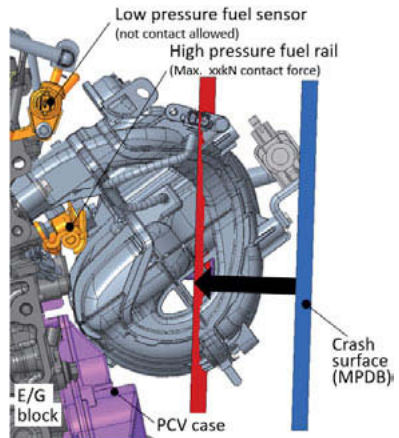


Fig. 04 : Intake manifold surrounding parts (side view)

The impact that the intake manifold experiences during the frontal crashes is derived and simplified from the full-vehicle crash test CAE (Fig. 5). The complex contact coming from the progressive deformable barrier and the contact between the intake manifold and its parts surrounding the engine compartment, such as the radiator support, is simplified to a flat rigid surface that intrudes into the intake manifold at a certain angle at a fixed speed and to a certain depth. These differ depending on the vehicle crash test (Fig. 6). Such an approach permits an

optimization of the intake manifold's crash performance as a component and speeds up the design iterations without the need to re-calculate the crash simulation for the full vehicle.

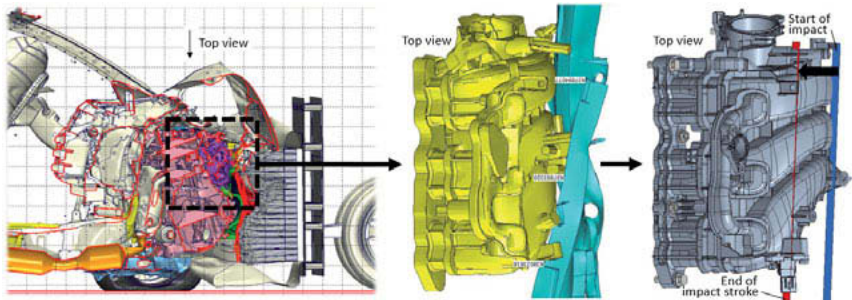


Fig. 5: Simplified impact surfaces derived from the vehicle crash CAE (MPDB example)

In addition, a component crash test set-up was designed to replicate vehicle crash test conditions in order to not only evaluate the part's crash performance without performing a full-vehicle crash test but also to validate the crash test simulation model of the intake manifold. In this component crash test the engine with the intake manifold is fixed at the impact angle and a weight is dropped on it from a height that generates the same energy as during a vehicle crash test. The dropped weight is stopped at the protruding depth derived from the full-vehicle crash test CAE.

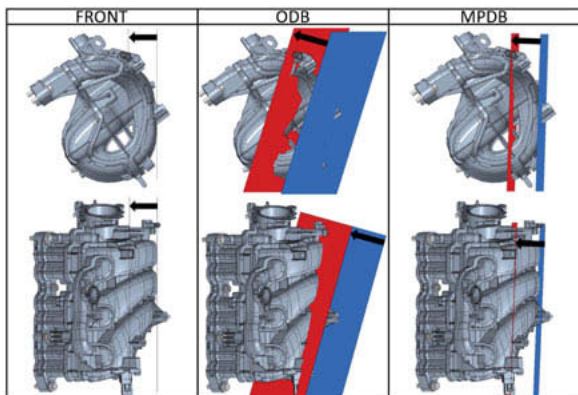


Fig. 06: Simplified impact surfaces for each frontal impact crash test. In this component crash test the engine with the intake manifold is fixed at the impact angle and a weight is dropped on it from a height that generates the same energy as during a vehicle crash test. The dropped weight is stopped at the protruding depth derived from the full-vehicle crash test CAE.

3. Methodology

The intake manifold is a highly functional component for the engine and the solutions applied to prevent contact with the low-pressure fuel system during the crash test cannot have a negative effect on its main functional and durability requirements in order to retain a high performance, high functional reliability, a light and compact intake manifold design. Hence the goal

of Novares is to offer a solution achieving not only crash performance but also fulfilling the requirements for burst pressure, NV, component vibration and sealing without impacting pressure loss. To ensure FEA models are predictive, different laws of behavior are used to both describe static and dynamic behavior. In the automotive industry in mass-production development, this is a real challenge for the development of plastic parts because the most commonly used CAE mechanical softwares are based on metallic deformation algorithms and the methods used for material characterization are the key to getting predictive CAE results.

At Novares, plastic materials are characterized by means of a video tensile test machine and samples are taken from injected plates. Samples are cut by a water jet process in order to avoid the heating which would arise from machining. The objective of this method is to set up a material database and to compare material data for the same geometry (ISO R527 sample sizes). The same measurement system is used to rule out any effect arising from different systems as it is not specified in the normative document.

The polymer material used to design the intake manifold is a 30% glass-fiber-reinforced polyamide 6 (PA6-GF30) and different strategies can be used in Tier 1 companies to take internal and external parameters such as temperature, humidity ratio, strain rate, fiber orientation, etc., into account. It is important to consider the effect of each parameter, as shown on Fig. 7 :

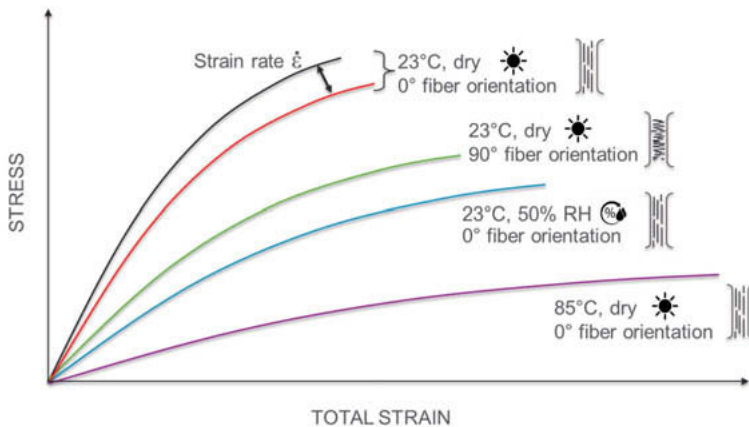


Fig. 7: Influence of external parameters on polymer behavior

In the Novares testing methodology for creating the material database, fiber orientation is taken into consideration for reinforced materials while all materials are tested for low, room and high temperatures, at dry and conditioned 50% RH in case of polyamide materials. Additionally, different speeds are used to determine the strain rate effect for the speed range under consideration.

When focusing on fiber-reinforced polymers, different approaches can be taken during the design phases. In the plastic industry, one method consists of making an injection process simulation to determine the fiber orientation resulting from the flow, the injection parameters and so on. Once this step is completed, the fiber orientation can be transferred to mechanical software in order to map orthotropic properties in mechanical simulations. This method is the best theoretical approach, but it does take time and is not often convenient for the automotive industry for several reasons. The main problems are both development time and task scheduling. Development time, because several CAE loops are launched to control, improve and change the part design during development, and if process simulation is added for each loop, it would have an impact on time directly. Task scheduling, because at the early phase of the development the injection-tool architecture and mainly the exact injection locations are not yet decided, and without these data, the injection-process simulation cannot be accurate.

For these reasons, the industry method shown in Fig. 8b is applied to develop the intake manifold in a shorter time.

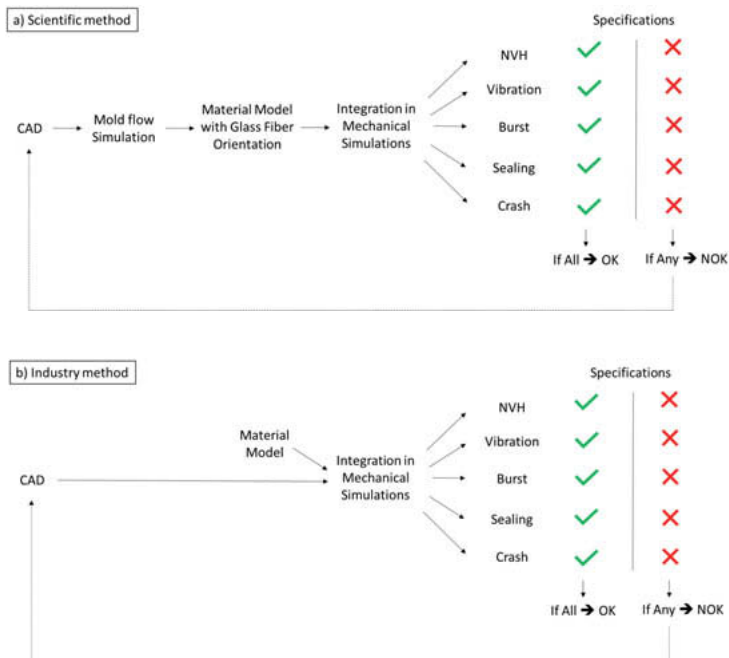


Fig. 8: Comparison of methods used for part design

Novares developed a material model to identify convenient laws of behavior for glass-fiber-reinforced polyamide materials for the first design step which do not take into account fiber orientation. It enables customers to be offered more flexibility by getting results in a short time. When the design is completed, requirements are defined in the tooling engineering so as to avoid any negative impact on part behavior which would give worse results than calculations. This industry method gives a better match in both the predictiveness of the model and the project development time needed to deliver the mechanical requirements.

4. Simulation model

The intake manifold consists of four vibration-welded parts and is regarded as a single global part. Its 2D-mesh model contains about 105,000 shell elements and 100,000 nodes, as can be seen in Fig. 9. The mesh size is around 3mm and refinements are made where needed.

Contact interfaces with surrounding parts are created and it also contains a self-impact interface including edge-to-edge treatment in order to allow the part to crush itself. The software used is Altair Radioss™.

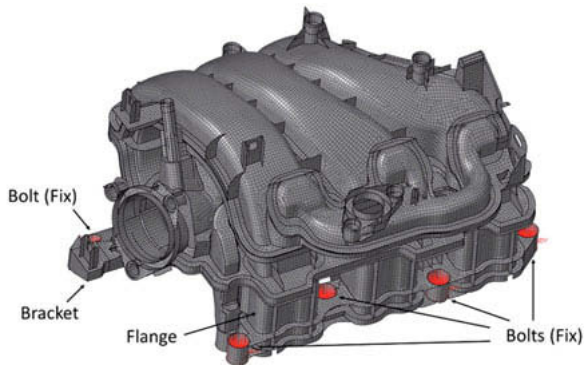


Fig. 9: CAE model of intake manifold for crash simulation

Surrounding parts, such as the engine block, cylinder head, fuel rail, fuel sensor, PCV case, etc., which could have an effect on the crash behavior, are modelled to match reality correctly. The engine block and cylinder head are modelled with 3D tetra elements and considered to be rigid. The throttle body, PCV case, fuel rail and fuel sensor are modelled with 2D shell elements and considered to be rigid. The full model has about 280,000 elements and 192,000 nodes. The intake manifold is mounted to the engine with five bolts with no displacement permitted between the manifold and the engine. All contact areas with surrounding parts and the impactor are set up.

The impactor is a flat rigid surface that intrudes into the intake manifold at a certain angle at a fixed speed and to a certain depth. The constant speed applied to the impactor is between 15 – 30 m/s, depending on the crash test (FRONT, ODB or MPDB). The high impact speed is a challenge for model stability during the simulation because the time step control has to be tuned to ensure calculation convergence. The full model and boundary conditions are shown in Fig. 10.

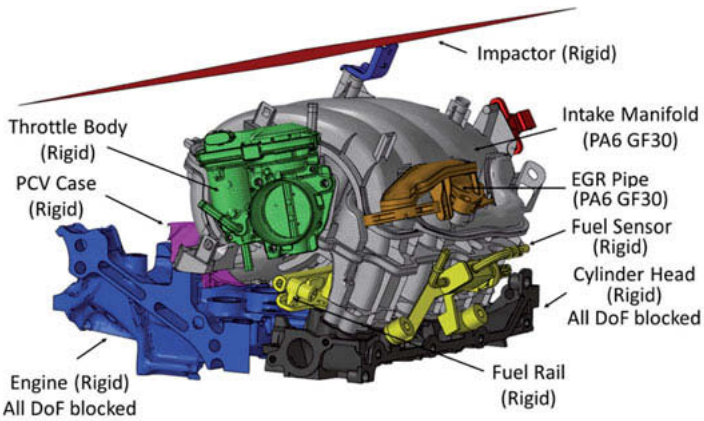


Fig. 10: CAE model of intake manifold and surrounding parts for crash simulation

5. Initial design: CAE result

During the prototype design phase, several iteration loops had to be made in order to optimize the design so as to achieve both burst pressure and crash performance while still respecting the weight target of the part. Burst pressure and crash performance are the most severe requirements linked to the strength/stiffness of the part. Throughout the initial CAE design iteration loops, the contact with the fuel pressure sensor could not be completely prevented but the degree of contact was significantly improved. A prototype part was produced during the development phase in order to evaluate actual part performance and simulation accuracy. The comparison between the component crash test and the CAE result can be seen in Fig. 11.

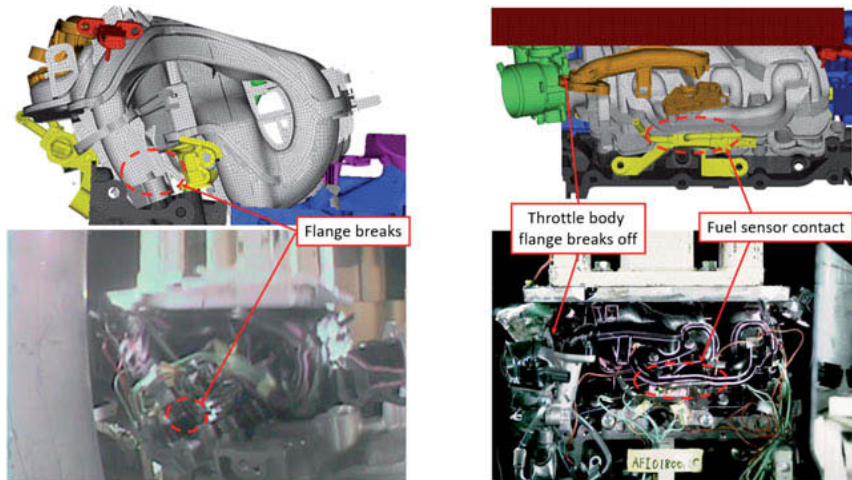


Fig. 11: Intake manifold breakage behavior: test versus CAE (contact fuel sensor)

In Fig. 11, when the crash simulation animation is compared to the component crash test slow-motion video, we can see a correlation of the breakage behavior. First of all the bracket breaks off (fifth attachment point), then the throttle body flange, and later the port flange, resulting in a forward movement of the intake manifold towards the fuel pressure sensor leading to contact between the two parts.

Fig. 12 shows the different breakage times with the impactor force (intake manifold resistance to collision) plotted against stroke (intrusion depth). A correlation can be made between test and CAE at the start of the impact. However the bracket (fifth attachment point) located on the side of the air intake manifold is breaking earlier in the CAE model than during the test. Due to this failure, the deformation kinematic is different during the crushing of the air intake manifold, and the CAE curves cannot no longer match the testing curves. In addition, the numerical model shows an early breakage of the base of the port flange, the fracture making the intake manifold move towards the fuel sensor. This means the flange is the only part to absorb the energy and there is no participation of the full intake manifold in crush absorption. The main conclusion is that during the test, the intake manifold deforms in the same way and the breakage is similar, resulting in contact with the fuel pressure sensor, but the breakage takes place later in the actual part than in the CAE, resulting in a lower force curve.

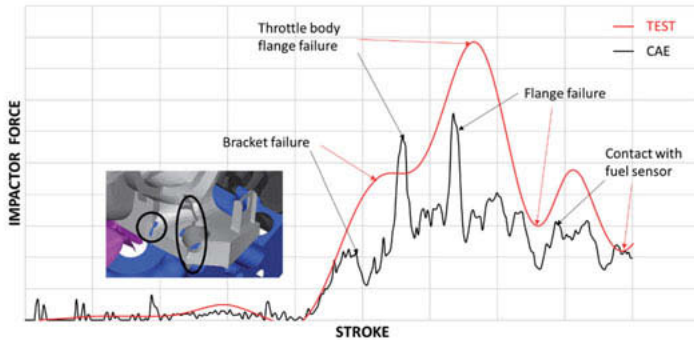


Fig. 12: Breakage time and impactor force: component test versus CAE (initial material model)

After this comparative analysis, it was decided to adjust the break criteria used in the material model (law of behavior). In the law used for polyamide material for crash loading the breakage criterion is key. In the Novares methodology, the breakage criterion is identified on 3mm-mesh tensile bars. The breakage criterion being used as the maximum plastic strain in FEA is linked to the element size and for this reason it

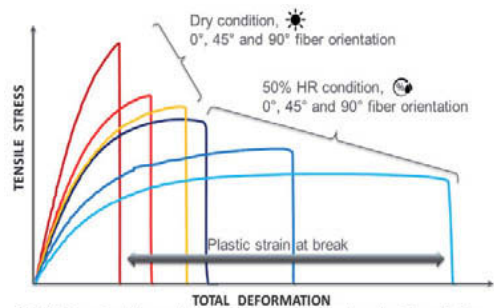


Fig. 13: Experimental max plastic strain range according to material conditioning

was revised according to mesh size in different areas of the manifold. The maximum plastic strain is very sensitive to the humidity ratio and to strain rate effects, as shown in Fig. 13. The prototype intake manifold made of polyamide is tested several days after injection and the condition (moisture absorption) is not monitored.

The adjustment made to the failure criterion in the polyamide material data card enables an improvement to be made in the correlation in breakage time and impactor force as shown in Fig. 14 :

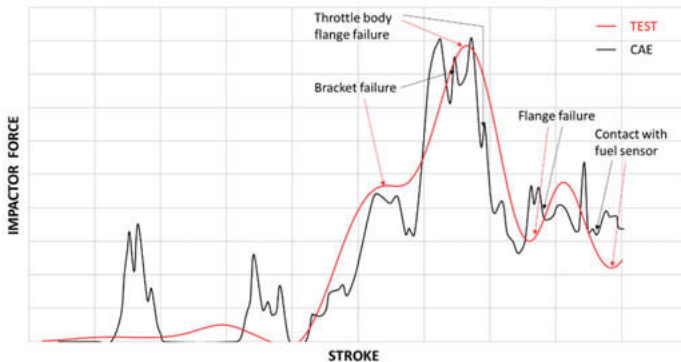


Fig. 14: Breakage time and impactor force : component test versus CAE (breakage criteria adjusted)

6. Final improved design – CAE results

Based on the initial CAE and test result taking into account the structure and position of surrounding components, an improved and smart design of the intake manifold was made.

1. The stiffness of the ports around the flange was increased to avoid or to delay the breakage seen before.
2. The bracket (fifth attachment point) stiffness was increased so that more of the crash energy could be absorbed before breakage, thus putting less force onto the port flange.
3. A triangular cut-out was made in the ribs between the ports and the surge tank in order to initiate a breakage line (Fig. 15),

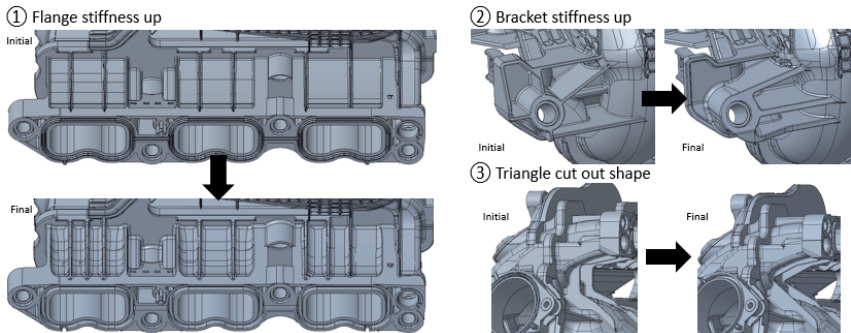


Fig. 15: Intake manifold design improvement

Fig. 16 shows the targeted breakage behavior. Due to the stiffer bracket more of the upper ports are broken and thanks to the triangular cut-out the stress is concentrated at the corner and a breakage line is formed between the upper ports and the triangular cut-out. The surge tank breaks off and is pushed under the ports at high impact forces. Because the ports are designed with a high rigidity they act as a barrier to prevent the intake manifold from coming into contact with the fuel system and prevent any risk of fuel leakage (a patent application has been filed).

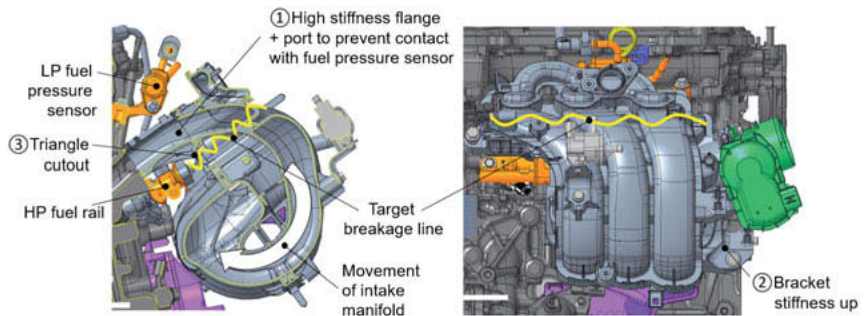


Fig. 16: Innovative design philosophy for breakage behavior during frontal impact

The above innovative design and breakage behavior could be proven by crash test simulation which revealed no contact between the intake manifold and fuel pressure sensor (see Fig. 17).

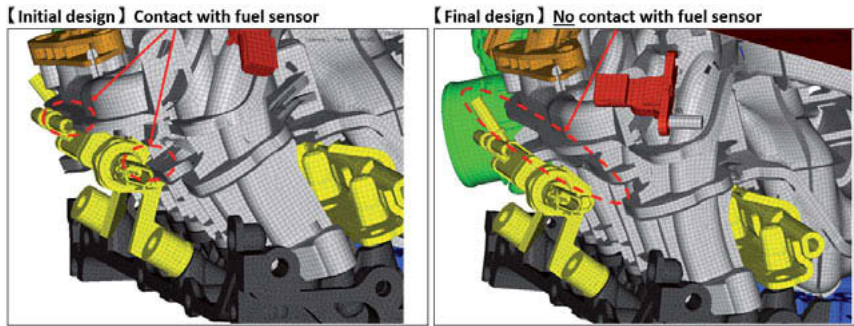


Fig. 17: Breakage behavior optimization through crash simulation

Once the design had been confirmed by simulation a component crash test was carried out for a final judgment. Again, breakage behavior correlated well with the simulation and no contact with the fuel pressure sensor was confirmed in the test. Comparative results for the component test and CAE are presented in Figs. 18 and 19.

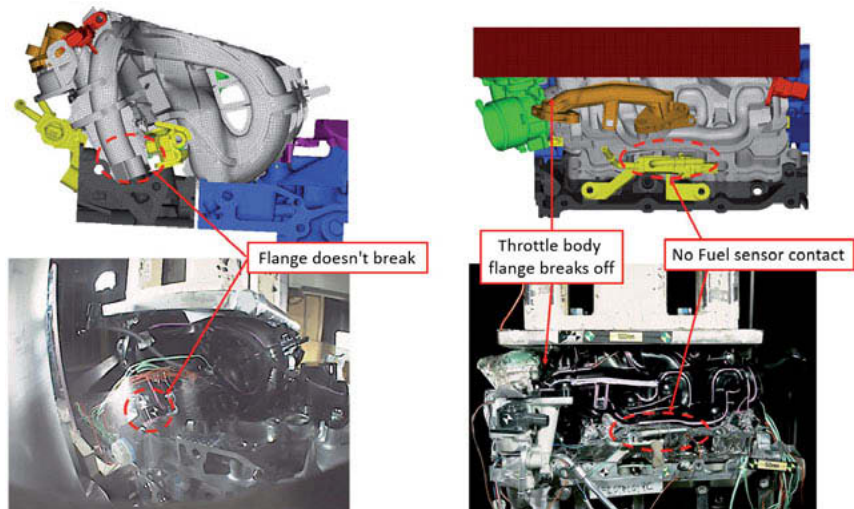


Fig. 18: Intake manifold breakage behavior: component test versus CAE
(no fuel sensor contact)

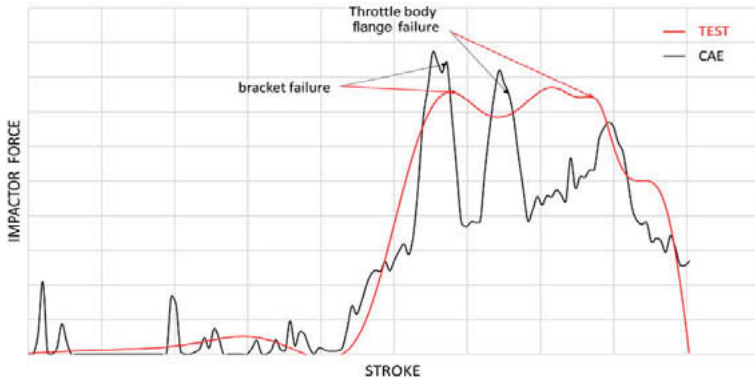


Fig. 19: Breakage time and impactor force : component test versus CAE
(final intake manifold design)

Test results show a better energy absorption at the beginning of the crash compared to the initial design. The intake manifold bracket is stiffer, and deformation of the intake manifold is optimized. The simulation shows the upper part of the intake manifold breaks in order to participate in the energy absorption and forward movement of the intake manifold toward the fuel sensor is reduced. This is due to the load transmitted to the flange being lower and because of its increased stiffness it shows no failure at the base. The flange acts as a protector to the fuel sensor and there is no contact between the intake manifold and the fuel sensor.

7. Conclusion

The material model developed by Novares used for the crash simulation of the intake manifold can well predict breakage behavior and the probability of contact with the fuel sensor, as shown in Figs. 11 and 18. Differences still appear for the exact breakage time of critical areas and for matching in the impactor force graph (Fig. 19). These differences are mainly due to test variability, part condition (moisture uptake monitoring) and limitations in the material model's complexity (effect of glass-fiber orientation) but the global trend of the intake manifold crushing is well predicted by the simulation model. This CAE model was used during the development of the new 1.5L TNGA intake manifold for optimizing the design within a short time frame. Material was added to increase stiffness in the critical areas and a high degree of weight reduction was achieved by removing material in non-critical/non-functional areas. This optimized design results in a best-in-class strength-to-weight ratio intake manifold which has no contact with the low-pressure fuel system during vehicle crash tests.

8. Future scope

Once the intake manifold was judged as acceptable from the results of the final component crash test, full-vehicle crash tests were performed. The result was OK as no fuel leakage nor any contact with the fuel sensor occurred. When comparing the breakage of the intake manifold between the component crash test and the full-vehicle crash test, it can be seen that the component test is more severe. This can be explained by the impact speed difference (Fig. 20) since the component requirements are set with a constant impact speed but during a vehicle crash test the impact speed will fall as the barrier intrudes into the vehicle and the intake manifold. The decrease in impact speed depends on the stiffness of the crushed component and is difficult to estimate at an early stage. Nevertheless for future projects Toyota wants to set component requirements more precisely in order to achieve a better match with the final vehicle crash test.

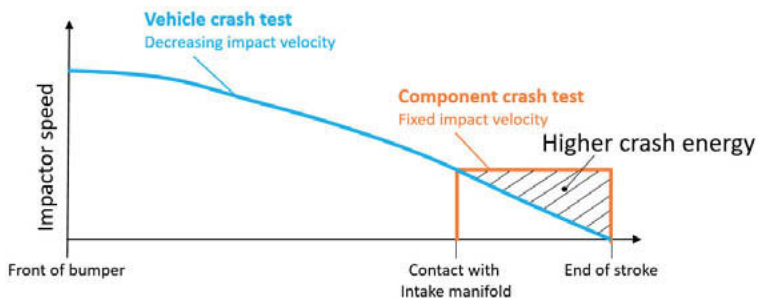


Fig. 20: Impactor speed : vehicle crash test versus component requirements setting

The ultimate goal is not only to avoid the need for a component crash test so as to reduce costs by dispensing with additional prototype loops, but also to speed up global project development time. In order to further improve the simulation model, the first step for Novares consists of making CAE take the variability of polyamide conditioning into account. Results could be drawn as a pair of curves in order to reveal the conditioning effect and to better anticipate and control this effect during project development. The second aspect to be improved once again focuses on material breakage criteria that could take the loading direction into account. In this way, shear, tensile or bulk loadings would lead to different breakage criteria and the model would be much more predictive. A failure criterion depending on the principle stress directions could be implemented in CAE software in order to better predict the failure of glass-

fiber-reinforced polymer. This needs some more scientific and theoretical model developments aimed at increasing the accuracy of CAE results in crash simulations of polymer materials.

9. References

- [1] Tadashi Toda, Mitsuto Sakai, Masashi Hakariya, Toshikazu Kato Toyota Motor Corporation; '*The new inline 4-cylinder 2.5l gasoline engine with Toyota new global architecture concept*' presented at the 38th International Vienna Motor Symposium 2017, Austria, 2017.
- [2] Volker Sandner, Andreas Ratzek ADAC e.V, '*MPDB - Mobile offset progressive deformable barrie*', paper no. 15-0389.
- [3] Hyperworks Altair Engineering. Altair Radioss Theory Manual, on-line documentation, 2017

The all-new MAN high-roof cab: epoxy-sandwich RTM – simulated using FEM and crashed under real conditions

Dipl.-Ing. (FH) **Andreas Schmitz**, MAN Truck & Bus SE, Munich

Abstract

This article describes the development and design of the new high-roof generation from MAN. Customer requirements have changed and legal requirements such as crash guidelines and CO₂ limits have been raised significantly. To meet these new requirements, MAN decided to develop the new high-roof for its top-of-the-range XXL long-haul cab, which offers maximum comfort.

In addition to geometric changes that improve comfort and optimize the c_w -value, compliance with the ECE R29-3 crash directive, which will come into force from 2021, presents the greatest challenge. The loads required by the new ECE R29-3 crash directive have been significantly increased from those in the previous directive.

The article describes the benefits of the chosen material and the collection of the data needed for design using simulation. Finally, the comparison of the simulation with real component and crash tests is shown. The goal was to demonstrate to the approval authorities by means of a very precise simulation that simulated comparisons are a sufficient basis for future type approvals for vehicle type changes and that no expensive real crashes are required for releases.

1. MAN high-roofs

In its portfolio MAN Truck & Bus SE has three cabs with high-roof options for the long-haul trucking segment: a 2240mm wide cab with a medium-height roof (LX), a 2440mm wide cab with a medium-height roof (XLX) and a 2440mm wide cab (XXL) with a high roof. All three cabs are of the same length. In the new generation of vehicles from MAN, the high-roof of the XXL has been replaced by a new high-roof, as described below. The two medium-height roofs have been modified and continue in series production (Fig. 1).



Fig. 1: LX cab XLX cab XXL cab

This high-roof system has been installed in series production at MAN since 1999. In March of this year, MAN can look back on more than 580,000 TG series high-roofs manufactured. The flattened surfaces of the outer and inner shells cover approximately 6.2km², corresponding to approximately 800 FIFA-standard football fields.

The new high-roof replaces the XXL roof which has been manufactured since 1999. This cab with a large panoramic windshield and fixed side glazing over the cab doors caused a great stir at the market launch. At that time such a light-filled interior did not yet exist in the truck sector. In the meantime, the demands for more storage space and reduced heat input into the cab have increased and the large window surfaces are in conflict with these requirements (Fig. 2).

By dispensing with the large windshield and the new geometric design of the roof, a storage volume in the new luggage rack above the windshield of around 354 liters was obtained, thus representing the best value amongst the competition. The c_w value was further reduced compared to the previous model.

The following requirements were made of high-roof development:

- Compliance with crash directive ECE R29-3, along with the cab bodyshell
- Cost optimization
- Maximum storage capacity → BID (best-in-dimension)
- Maximum standing height
- Improved energy efficiency (reduction of window surfaces)

- Improvement in the c_w value
- Optimization of weight (10% lower than the predecessor)
- Optimization of water management
- Direct connection of the upper bed in the roof

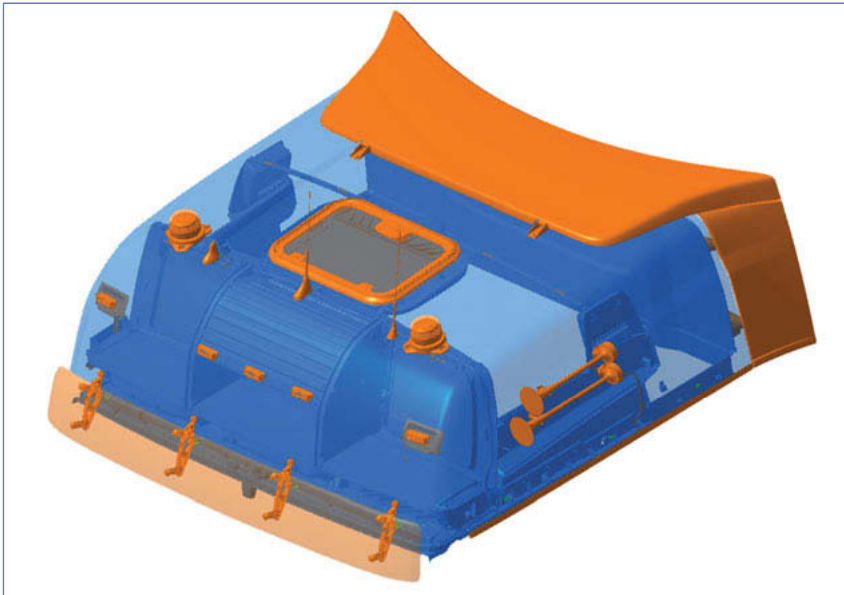


Fig. 2: XXL high-roof with all add-ons and fittings

2. ECE R29-3 crash directive

As of 31st January 2021 the new ECE R29-3 crash directive will apply to all new registrations of commercial vehicles. This is considerably stricter than the previous crash directive ECE R29-2. In particular, the roof load test C is now carried out in two stages, once dynamically (C1) and once statically (C2), as opposed to the purely static loading in ECE R29-2 (Fig. 4).

The cab is thus subjected first to a dynamic load of 17.6kJ from a pendulum and the now damaged cab then subjected to a static load of 9.8kN. After the test, the dummy is placed in the driver's seat (unlike the car test where the dummy is inside the vehicle during the crash). In this sitting position, it must not be in contact with any component. Nor should any larger components in the cab that could injure the occupants have become detached. This new test

definition better reflects reality since it simulates a tipping or rollover of the truck. Fig. 5 shows possible accident scenarios that are now reproduced in Test C.

The front impact Test A was increased by 11kJ to 55kJ so that 25% more energy input has to be dissipated. The new Test B, which describes an impact of 29.4kJ of a cylindrical impactor on the A-pillars, replaces the old rear panel test in which a static load of 70kN was applied to the cab rear panel (Fig. 3).

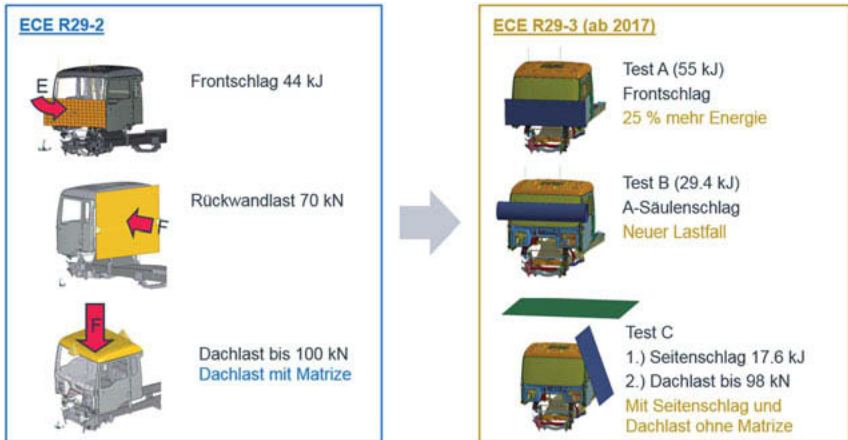


Fig. 3: Changes in the crash directive from ECE R29-2 to ECE R29-3

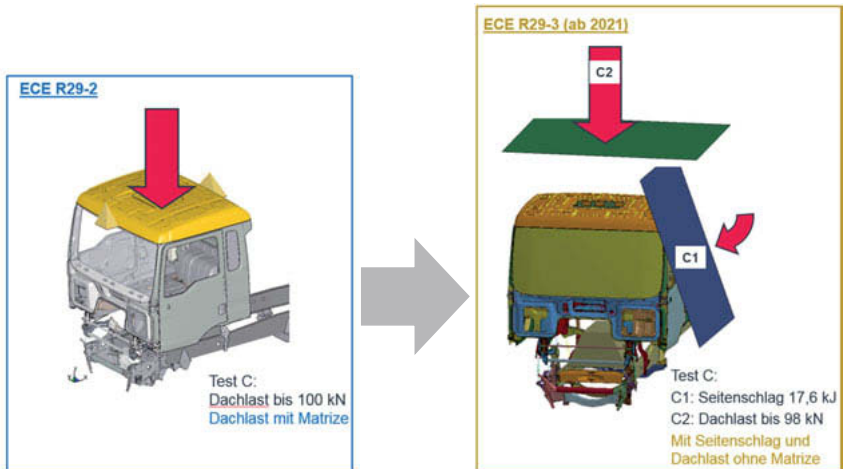


Fig. 4: Changes in Test C of the crash directive from ECE R29-2 to ECE R29-3



Fig. 5: Pictures of accidents corresponding to cases in crash directive ECE R29-3

3. High-roof facts

The new high-roof measures 2326 x 2016 x 770 mm, which corresponds to a total laminate surface of 17.25m². The weight of the unfinished structure is 81.4kg. The fiber-composite construction thus fully exploits its lightweighting potential as compared to a sheet-metal high-roof by being 30% to 35% lighter (Fig. 6).

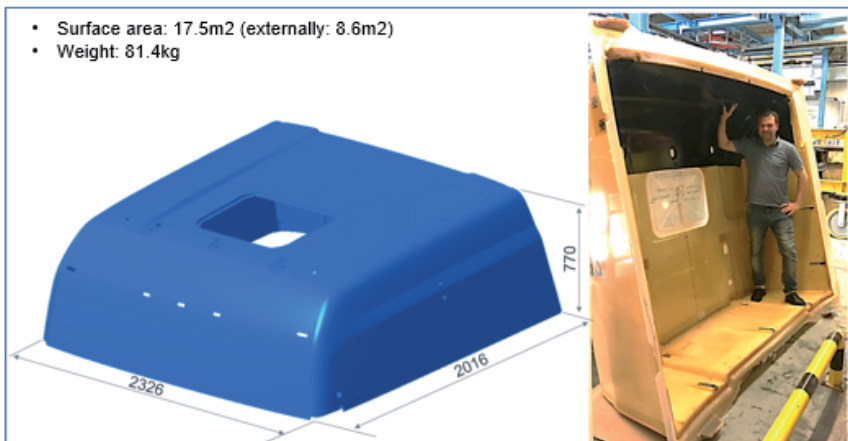


Fig. 6: Size of the XXL high-roof

3. Structure / epoxy sandwich RTM process

The structure of the high roof using epoxy-sandwich technology is depicted in Fig. 7 with the aid of a cross-section. Basically, a minimum total wall thickness of 20mm is sought, but this is sometimes even exceeded or fallen short of. In certain areas, the inner and outer top-layer laminates, each about 1.5mm thick, are brought together to then form a monolithic layer with a wall thickness of about 3mm. Components such as antennas, the roof hatch or aeropack-age components can then be attached in these areas.

The foam-molded PUR foam blanks with a density of 120kg/m³ (Fig. 8) are simply covered with glass-fiber mats with a weight per unit area of 650g/m². Depending on the loading case, additional layers of glass fiber are sometimes added. The covered foam cores are then inserted in the cavity side of the mold. The mold is closed and the epoxy resin then injected, approx. 40 kg in the case of the XXL high-roof. After a curing time of approximately 20 minutes, the component can be demolded and sent for further processing. Fig. 9 depicts the manufacturing process at our suppliers Fritzmeier Composite in Bruckmühl.

For the connections that require a direct attachment to the component, sheet metal inserts are used which are foamed into the foam core. In addition, the opportunity is taken to insert glass-fiber-reinforced epoxy resin blocks into the foam cores. These blocks form an excellent connection to the two top-layer laminates, such that both top-layer laminates are used in the event of a load. With these, heavily loaded components such as the upper bed or aeropack-age parts are connected to the roof.

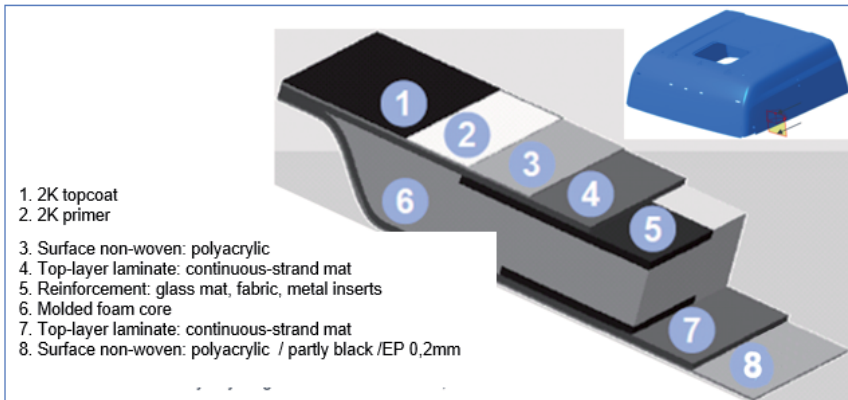


Fig. 7: Structure of the layers

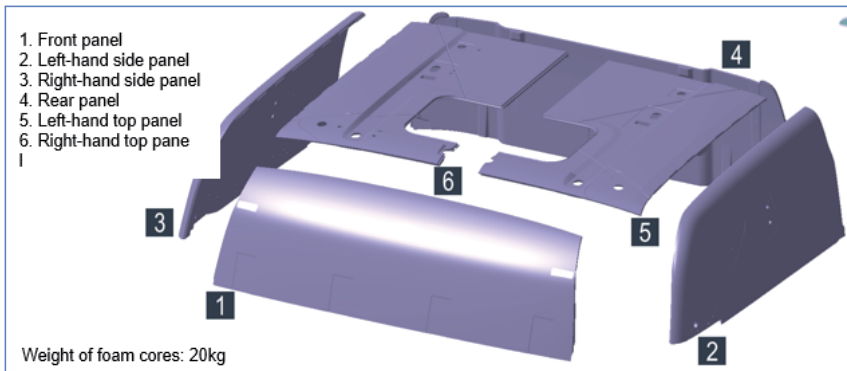


Fig. 8: Foam core division

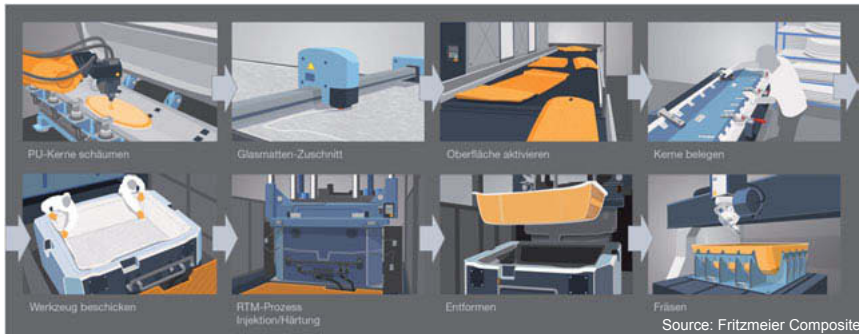


Fig. 9: Manufacturing process at Fritzmeier Composite in Bruckmühl

4. RTM tool

The special feature of the RTM tool lies in the structure of the surface layer. This layer, that is at least 20mm thick, consists of 99.9% nickel and is deposited by chemical condensation from $\text{Ni}(\text{CO})_4$ in a vacuum furnace onto an oil-heated so-called mandrel and there forms a very resistant layer. The steel frame base gives a tool weight of 22.4t which is relatively light for this size (Fig. 10).

The long tool life of more than 200,000 pieces is a major advantage of this structure. The high dimensional accuracy and dimensional stability throughout the temperature changes and the tool life also speak in favor of this process. The good heat transfer coefficient of $88\text{W/m}^2\text{K}$ is another advantage for the efficient temperature control of the tool. The tool in its

open state is shown in Fig. 10. The tool with the highest output has produced approx. 120,000 high-roofs since 1999.



Fig. 10: RTM tool with 100% nickel surface

2. Comparison of simulation and real tests

To be able to carry out a precise simulation that is comparable to the real crash, a precise inventory of the capabilities of the materials used is required. For this purpose, the medium-height XLX high-roof, which is already in series production, was used as a reference and examined in closest detail. Sample pieces were taken and the following quasi-static test series were carried out:

- Tensile test
- Tension/compression test
- Shear test
- 4-point bending test without shim
- 4-point bending test with shim
- C2 pre-tests

On this basis, material cards could be drawn up which formed the basis for the first simulations. The individual tests – see, for example, the 4-point bending test in Fig. 11 or the shear test in Fig. 12 – were then simulated in the FEM calculation and deviations corrected.

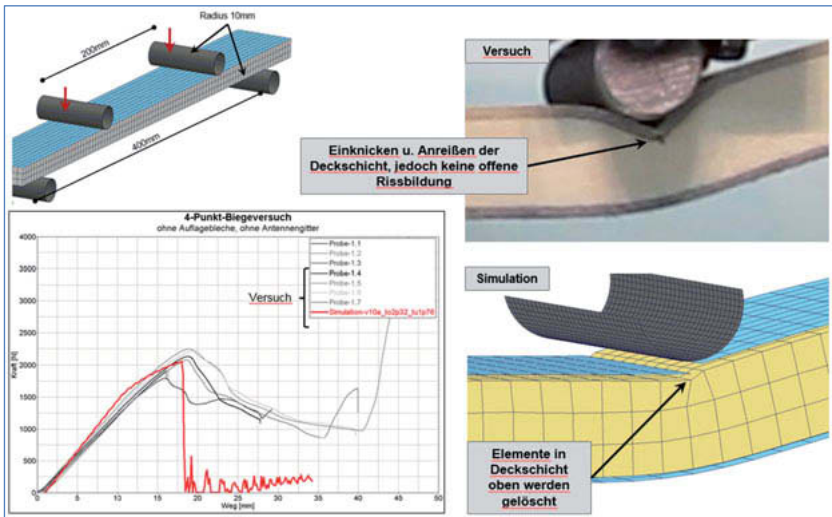


Fig. 11: Sandwich composite: validation of shear and 4-point bending tests without sheet metal

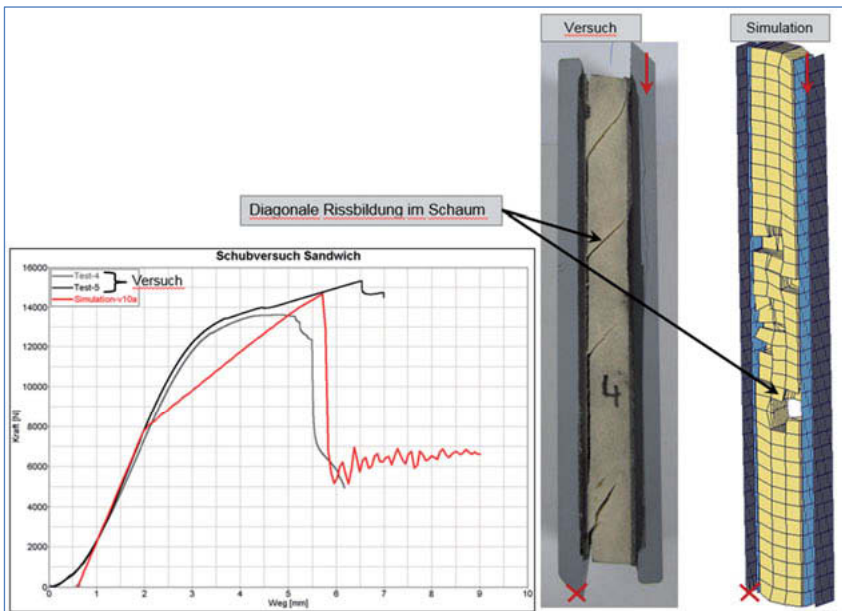


Fig. 12: Sandwich composite: validation of shear test

The simulation was set up with all details (Fig. 13). Accordingly, the outer and inner shells, the so-called laminate, the foam core and all glass-fiber double layers, metal inserts, openings and holes were reproduced.

The calculations are carried out with LS-Dyna. To run the complete C1/C2 test program eight days are needed with eight CPUs while with prioritized calculations and an available capacity with 16 CPUs four days are needed. This means that variant calculations with the associated lead time for networking can be delivered much faster than comparable real crashes.

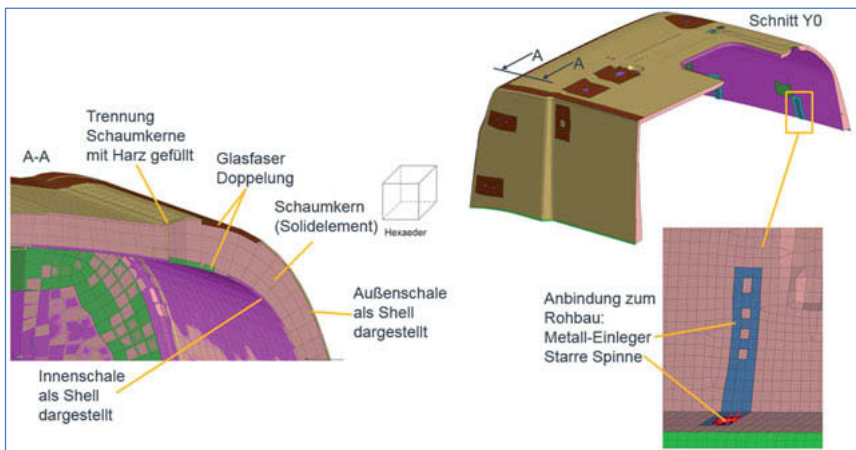


Fig. 13: Structure of the models for simulation

In the next step, a cab with the XLX roof was rigidly anchored at its base and a load was gradually applied until the structure failed. This is intended to simulate Test C2 but without the pre-damage from Test C1 since Test C1 cannot be easily set up and repeated at short notice. After approx. 133 kN, the roof failed at the C-pillar by tearing open vertically. Here the buckling of the bodyshell in the area of the shaft for the untreated air intake plays a crucial role since the roof is no longer supported here (Fig. 14).



Fig. 14: First component test with anchored body

A disadvantage of this simplified test is that the load is introduced into the structure entirely via the C-pillar which means that this load in the area of the C-pillar is very much higher than the real load in Test C2.

This disadvantage appeared in the simulation even this early and the damage visualized relatively well in comparison.

For this reason, a component test was developed that includes only a section of the cab bodyshell. Here the roof surface is horizontal and therefore parallel to the plate which distributes the test force evenly over the roof surface. The component test thus behaves similarly to the real test. In the real test, when the force is applied the cab is only pressed into the rear support, and the load is thus introduced almost uniformly into the structure. The influence of the windscreen was simulated by means of a glued-in aluminum plate (Fig. 15).

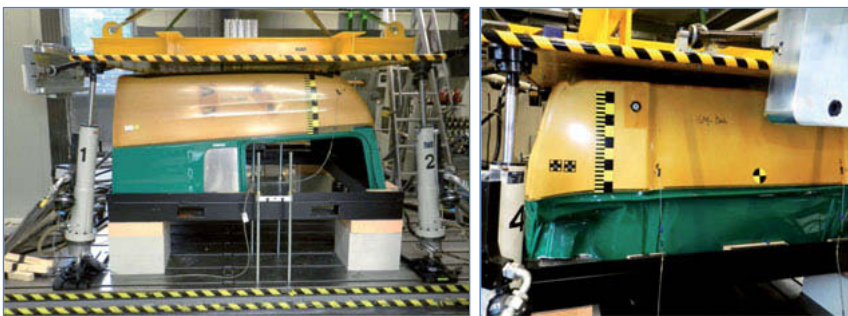


Fig. 15: Simplified component test with the roof aligned with the test force

Direct bolting points in the high-roof were simulated and confirmed in the experiment. Here glass-fiber-reinforced epoxy resin blocks were inserted into the foam core and embedded in the RTM process. These cores form a very good connection between the outer and inner laminates, have a very high pull-out strength and show significantly fewer marks on the surface than the sheet metal inserts previously used. With a pulsating load of 10,000 cycles no damage was detected and a pull-out strength of approx. 10 kN was demonstrated. This is far higher than the required pull-out strength. Fig. 16 shows the testing of the connection of the upper bed once in the complete roof and once in cut-out sections. In this way various embodiments could be tested both with and without pre-aging.

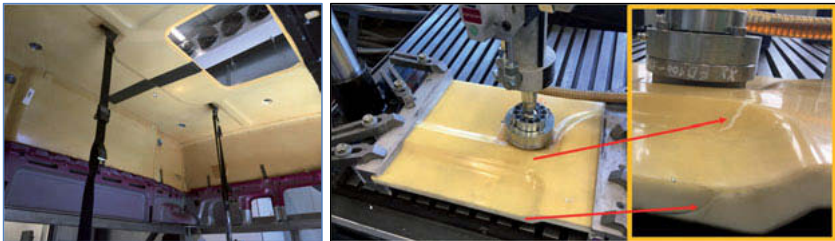


Fig. 16: Testing the bed connection in the cab and in cut-out sections (new and aged)

The test as set up in Fig. 17 was used, among other things, to check the load that occurred when loaded facing backwards on a railroad car. When a train passes an oncoming train in the tunnel, very high forces can occur on the aeropackage, corresponding to a wind speed of 250km/h - Formula 1 speed, so to speak. Here too, after a damage-free test cycle, a load that was far higher than required was applied until failure occurred.



Fig. 17: Testing the connection of the aeropackage (new and aged); railroad reverse loading

Finally, the real tests could be predicted very well in the simulation from various simulation loops and test series. In addition to the component tests, in which we were able to simulate the adjustment with and without additional reinforcements, these findings were then also confirmed by severe real crashes. The acceptance crash could then be predicted 1:1 in advance in the simulation. Fig. 18 shows a B-pattern pre-crash according to C1 from July 2017.

Fig. 19 shows a B-pattern pre-crash according to C2 from October 2017 in comparison with the simulation. It can be clearly seen here that a good prediction of cracking at the rear left-hand edge of the roof was possible. Also coming from this pre-crash, Fig. 20 very clearly shows the buckling of the roof in the drop-away area of the body shell.

Figs. 21, 22 and 23 show the C-pattern crash according to C1 and C2. Fig. 21 shows the comparison of the damage to the left-hand rear edge of the roof according to C1 in which there is a slight tear in the top laminate. The same area according to C2 can then be seen in Fig. 22 with a strengthening of the crack. Fig. 23 again shows a comparison of the roof buckling in the drop-away area of the body shell.

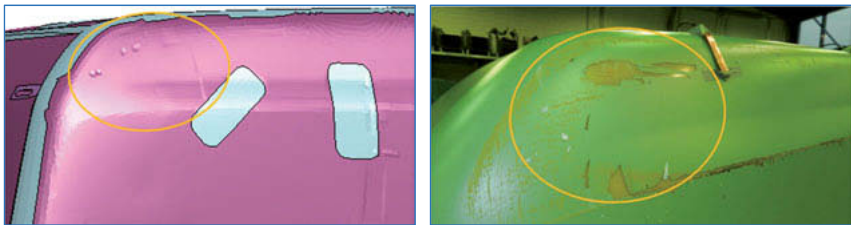


Fig. 18: Comparison simulation for B pattern - real crash July 2017 according to C1

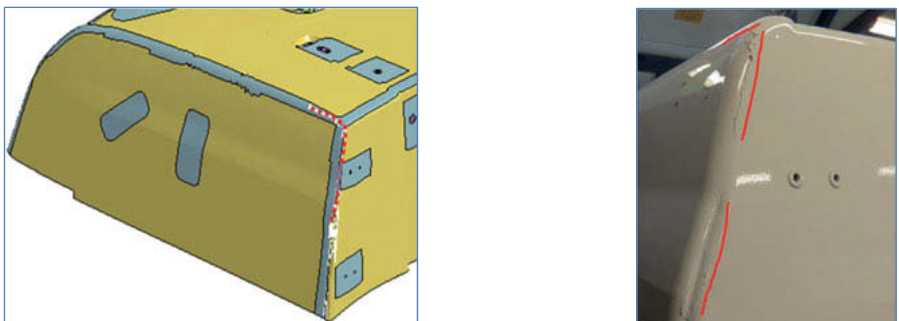


Fig. 19: Comparison simulation for B pattern - real crash October 2017 according to C2

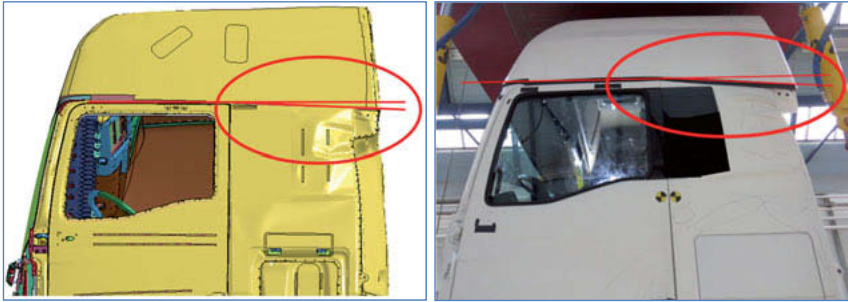


Fig. 20: Comparison simulation for B pattern - real crash October 2017 according to C2

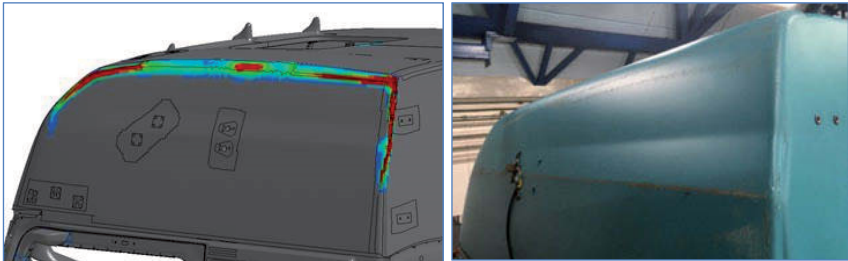


Fig. 21: Comparison simulation for C pattern - real crash November 2018 according to C1

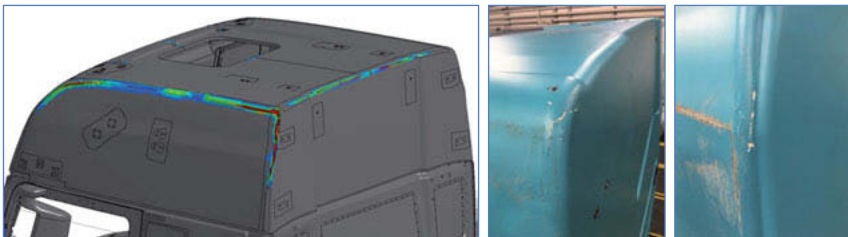


Fig. 22: Comparison simulation for C pattern - real crash November 2018 according to C2

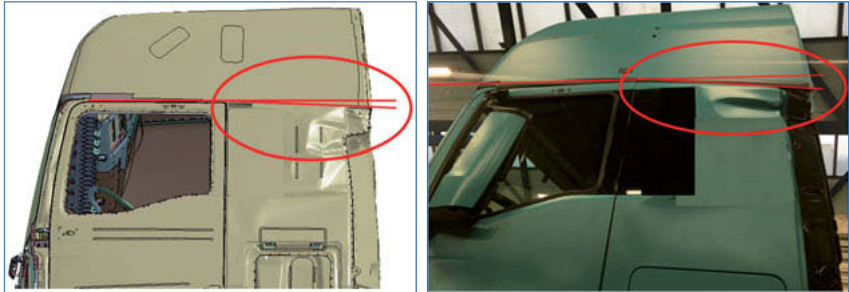


Fig. 23: Comparison simulation for C pattern - real crash November 2018 according to C2

6. Conclusion

Through extensive and sometimes unconventional test series, MAN has succeeded in raising the comparison between simulation and the real crash to a quality level in which we are able to use the simulation for changes in geometry, layer structure or introduction of trimming in order to confirm the development targets.

Depending on the complexity of the change, we have already been successful in achieving the goal of convincing the homologation authorities to allow the introduction of changes into series products via simulation without the need to carry out extensive and expensive real crash programs.

Epoxid-Sandwich-RTM – FEM gerechnet und real gecrasht

Dipl.-Ing. (FH) **Andreas Schmitz**, MAN Truck & Bus SE, München

Kurzfassung

Dieser Beitrag beschreibt die Entwicklung und Auslegung der neuen Lkw-Hochdachgeneration von MAN. Die Anforderungen der Kunden haben sich geändert, gesetzliche Anforderungen wie Crashrichtlinien und CO₂-Grenzwerte wurden deutlich verschärft. Um diesen neuen Bedürfnissen gerecht zu werden, entschied sich MAN für die Entwicklung des neuen Hochdaches für Ihr Topprodukt, das Fernverkehrsfahrerhaus XXL, das maximalen Komfort bietet.

Neben geometrischen Änderungen am Hochdach die den Komfort verbessern und den c_w -Wert optimieren, stellt die Erfüllung der ab 2021 in Kraft tretenden ECE R29-3 Crashrichtlinie die größte Herausforderung dar. Die in der neuen Crashrichtlinie ECE R29-3 geforderten Lasten wurden im Vergleich zur Vorgänger-Richtlinie deutlich erhöht.

Dabei werden die Vorteile des gewählten Materials und die Erhebung der Daten, die zur simulierten Auslegung benötigt werden, dargestellt. Abschließend wird der Abgleich der Simulation mit realen Komponenten- und Crashversuchen aufgezeigt. Das Ziel war, durch eine sehr genaue Simulation den Genehmigungsbehörden zu demonstrieren, dass bei zukünftigen Typänderungen simulierte Vergleiche eine ausreichende Basis für Typgenehmigungen der Fahrzeuge darstellen und keine teuren Realcrashes zur Freigabe mehr notwendig sind.

1. MAN Hochdächer

MAN Truck & Bus SE hat für das Lkw-Fernverkehrssegment drei Kabinen mit Hochdachaufbauten im Portfolio. Dabei gibt es eine 2240mm breite Kabine mit mittelhohem Dach (LX), eine 2440mm breite Kabine mit mittelhohem Dach (XLX) und eine 2440mm breite Kabine (XXL) mit einem hohen Dach. Alle drei Kabinen haben dieselbe Länge. In der neuen Fahrzeuggeneration von MAN wurde das hohe Dach des XXL durch ein neues Hochdach, wie nachstehend beschrieben, ersetzt. Die beiden mittelhohen Dächer wurden modifiziert und werden weiter in Serie produziert, Bild 1.



Bild 1: Fahrerhaus LX

Fahrerhaus XLX

Fahrerhaus XXL

Dieses Hochdachsystem wird bei MAN seit dem Jahr 1999 in Serie verbaut. So kann MAN im März 2020 auf über 580.000 gefertigte Hochdächer der TG-Baureihe zurückblicken. Die abgewinkelten Flächen der Außen- und Innenschalen kommen auf circa 6,2km² Fläche, dies entspricht circa 800 Fußballfeldern nach FIFA-Norm.

Das neue Hochdach löst das seit 1999 gefertigte XXL- Dach ab. Dieses Fahrerhaus mit der großen Panorama-Frontscheibe und der seitlichen Festverglasung über den Fahrerhaustüren sorgte bei der Markteinführung für großes Aufsehen. Ein solch lichtdurchflutetes Interieur gab es damals im Lkw-Bereich noch nicht. Mittlerweile sind die Anforderungen an mehr Stauraum und verringerten Wärmeeintrag in die Kabine gestiegen und die großen Fensterflächen stehen diesen Anforderungen entgegen, Bild 2.

Durch den Verzicht auf die große Frontscheibe und die neue geometrische Auslegung des Dachs konnte ein Stauraumvolumen in der neuen Gepäckablage über der Frontscheibe von rund 354 Litern realisiert werden und stellt somit den besten Wert im Wettbewerbsumfeld dar. Der c_w -Wert konnte im Vergleich zum Vorgängermodell weiter reduziert werden.

Folgende Anforderungen gab es an die Hochdachentwicklung:

- Erfüllung Crashrichtlinie ECE R29-3, einhergehend mit dem Fahrerhausrohbau
- Kostenoptimierung
- Maximales Stauraumvolumen → BID (best in dimension)
- Maximale Stehhöhe
- Verbesserte Energieeffizienz (Verringerung der Fensterflächen)
- Verbesserung des c_w -Wertes

- Optimierung Gewicht (-10% im Vergleich zum Vorgänger)
- Optimierung des Wassermanagements
- direkte Anbindung der oberen Liege am Dach

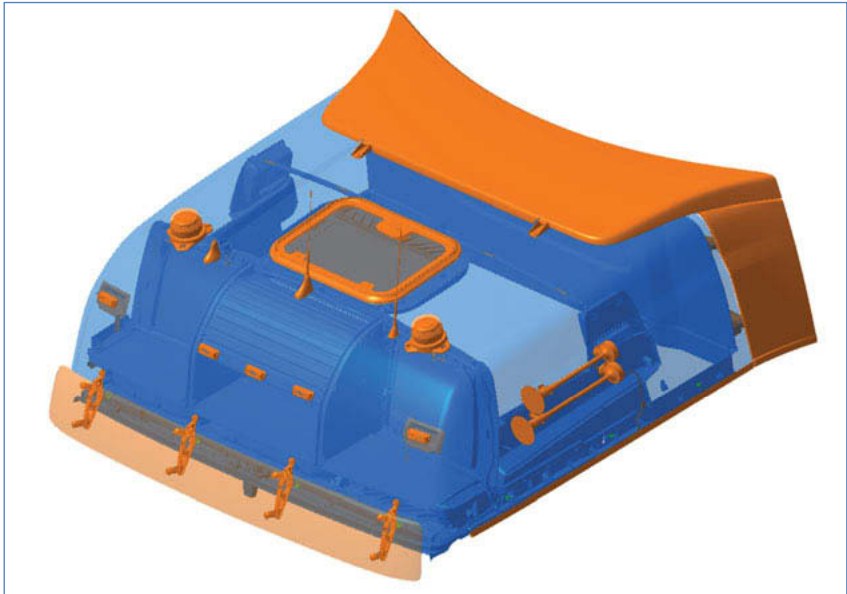


Bild 2: Hochdach XXL mit allen An- und Einbauten

2. Crasrichtlinie ECE R29-3

Ab dem 31.01.2021 gilt für alle Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen die neue ECE R29-3 Crasrichtlinie. Diese verschärft sich gegenüber der vorhergehenden Crasrichtlinie ECE R29-2 erheblich. Speziell der Dachlasttest C wird nun zweistufig ausgeführt, einmal dynamisch (C1) und einmal statisch (C2), im Gegensatz zu einer rein statischen Belastung in der ECE R29-2, Bild 4.

Somit wird das Fahrerhaus zuerst mit einer dynamischen Last durch ein Pendel von 17,6kJ beaufschlagt und dann das vorgeschädigte Fahrerhaus mit einer statischen Last von 9,8kN belastet. Nach dem Test wird der Dummy auf den Fahrersitz gesetzt (im Unterschied zum Pkw, wo sich der Dummy während des Crashes im Fahrzeug befindet). In dieser Sitzposition darf er dann kein Bauteil berühren. Auch dürfen sich keine größeren Bauteile in der Kabine lösen, die die Insassen verletzen könnten. Diese neue Testdefinition bildet die Realität besser

ab, da es ein Umkippen, bzw. einen Überschlag des Lkw's simuliert. Bild 5 zeigt mögliche Unfallszenarien die im Test C nun abgebildet werden.

Der Frontschlag Test A wurde um 11kJ auf 55kJ erhöht, der abzubauenende Energieeintrag wurde also um 25% größer. Der neue Test B, der einen Tonnenschlag von 29,4kJ auf die A-Säulen beschreibt, löst den alten Rückwandtest ab, bei dem eine statische Last von 70kN auf die Fahrerhausrückwand aufgebracht wurde, Bild 3.

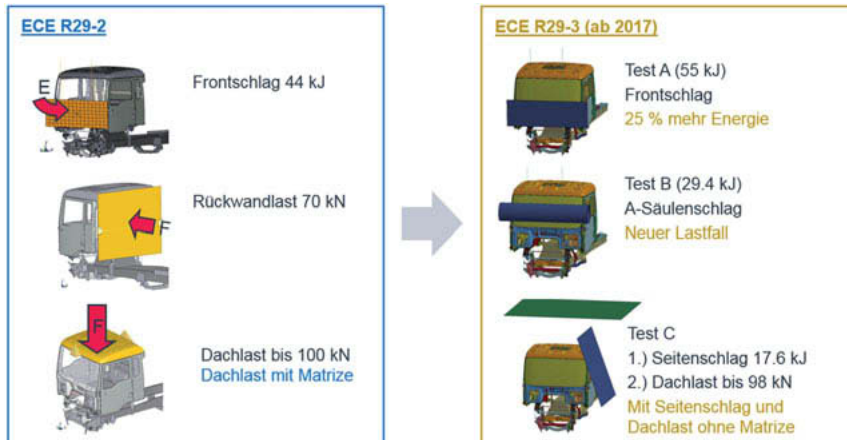


Bild 3: Änderungen von Crashrichtlinie ECE R29-2 auf ECE R29-3

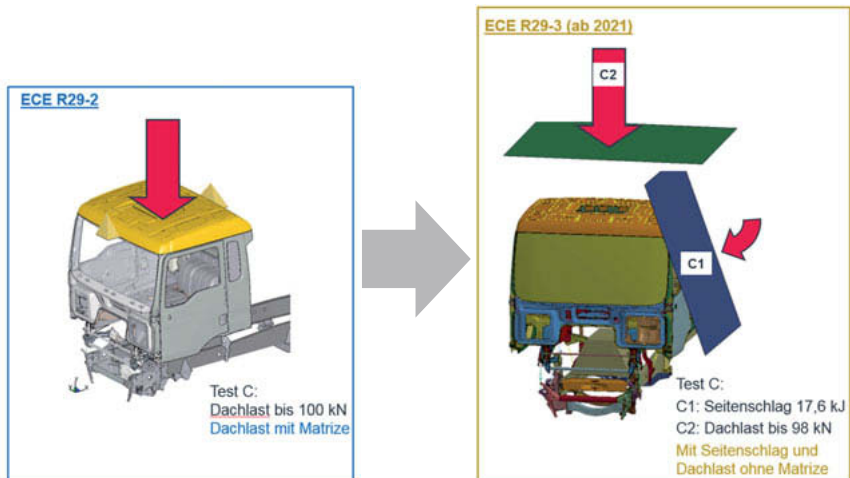


Bild 4: Änderungen Test C von Crashrichtlinie ECE R29-2 auf ECE R29-3



Bild 5: Beispielhafte Unfallbilder welche die Crashrichtlinie ECE R29-3 abbildet

3. Fakten zum Hochdach

Das neue Hochdach hat eine Abmessung von 2326 x 2016 x 770 mm, dies entspricht einer Laminat-Oberfläche von insgesamt 17,25m². Das Rohteilgewicht beträgt 81,4kg. Somit spielt der Faserverbundaufbau sein Leichtbau-Potenzial gegenüber einem Blechhochdach mit einem Mindergewicht von 30 bis 35 Prozent voll aus, Bild 6.

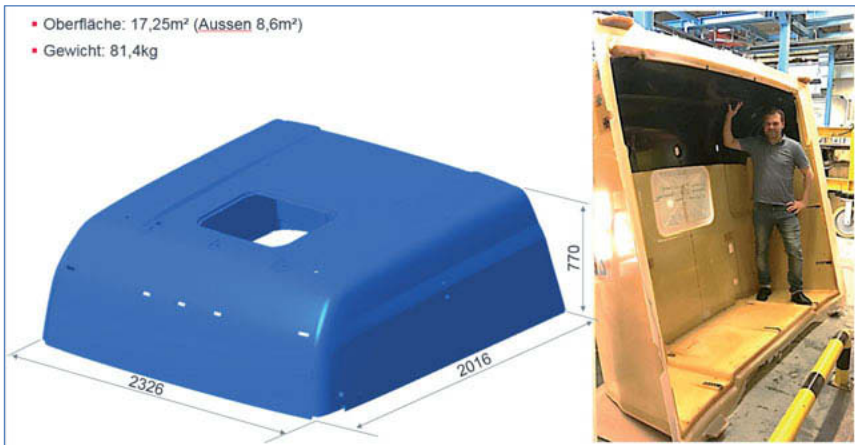


Bild 6: Größendarstellung Hochdach XXL

3. Aufbau/ Verfahren Epoxid-Sandwich-RTM

Der Aufbau des Hochdaches in Epoxid-Sandwichttechnologie wird in Bild 7 anhand eines Schnittes beschrieben. Grundsätzlich wird eine Mindest-Gesamtwandstärke von 20mm angestrebt, die aber partiell auch unter-, bzw. auch überschritten wird. In bestimmten Bereichen werden das innere und das äußere Deckschichtlaminat, welche jeweils ca. 1,5mm dick sind, zusammengeführt und bilden dann eine monolithische Schicht mit ca. 3mm Wanddicke. In diesen Bereichen können dann Bauteile, wie Antennen, die Dachluke oder Aeropaketbauteile befestigt werden.

Die formgeschäumten PUR-Schaumrohlinge mit einem Raumgewicht von 120kg/m^3 , Bild 8, werden mit Glasfasermatten mit einem Flächengewicht von 650g/m^2 einfach belegt. Je nach Lastfall, werden partiell noch zusätzliche Glasfaserlagen eingebracht. Dann werden die belegten Schaumkerne in die Matrizen- und Werkzeuge eingebracht. Nach Schließen des Werkzeugs erfolgt das Injizieren des Epoxidharzes, circa 40kg beim XXL-Hochdach. Nach einer circa 20 minütigen Aushärtezeit kann das Bauteil entnommen und der Weiterbearbeitung zugeführt werden. Bild 9 beschreibt den Herstellungsprozess bei unserem Lieferanten Fritzmeier Composite in Bruckmühl.

Um Verbindungen darzustellen, die eine direkte Befestigung am Bauteil benötigen, werden Blecheinleger verwendet, die im Schaumkern eingeschäumt werden. Außerdem wird auch die Möglichkeit genutzt, glasfaserverstärkte Epoxidharzblöcke in die Schaumkerne einzubringen.

Diese Blöcke gehen eine hervorragende Verbindung zu den beiden Deckschichtlaminaten ein, sodass beide Deckschichtlaminat bei Belastung im Kräfteinsatz sind. Mit diesen werden dann hochbelastete Bauteile wie die obere Schlafliège oder Aeropaketteile am Dach angebunden.

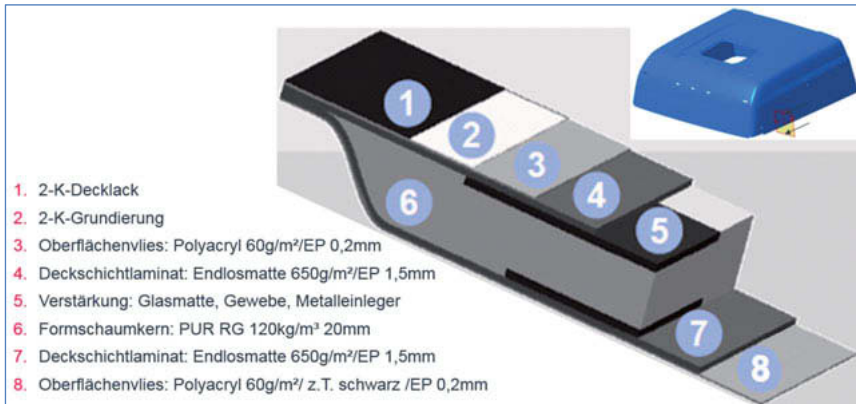


Bild 7: Aufbau der Schichten

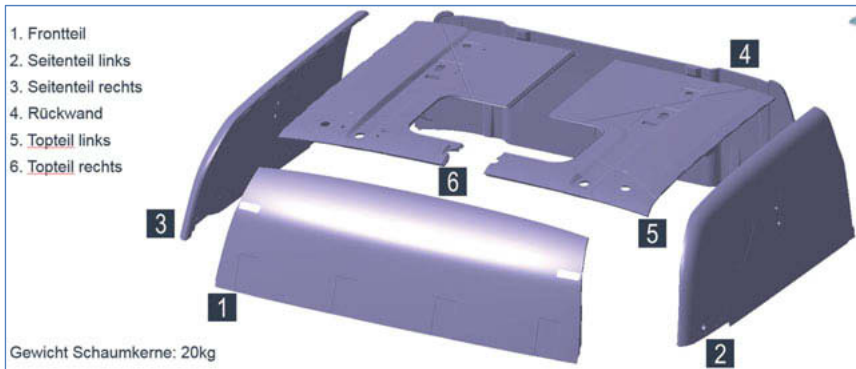


Bild 8: Schaumkernaufteilung

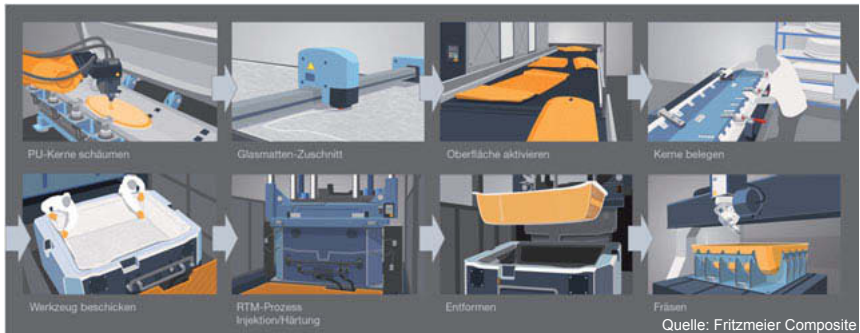


Bild 9: Fertigungsprozess bei Fritzmeier Composite in Bruckmühl

4. RTM-Werkzeug

Die Besonderheit beim RTM-Werkzeug besteht im Aufbau der Oberflächenschicht. Diese mindestens 20mm starke Schicht besteht aus 99,9% Nickel und wird durch chemische Kondensation aus $(\text{Ni}(\text{CO})_4)$ in einem Vakuumofen auf ein ölbeheiztes so genanntes Mandrel abgeschieden und bildet eine sehr widerstandsfähige Schicht. Durch den Spantenunterbau aus Stahl erhält man dann ein für diese Größe relativ leichtes Werkzeug mit 22,4t, Bild 10.

Die hohe Standzeit des Werkzeuges von mehr als 200.000 Stück ist ein wesentlicher Vorteil dieses Aufbaus. Auch die hohe Maßgenauigkeit und Maßhaltigkeit über die Temperaturänderungen und die Werkzeuglaufzeit hinaus spricht für dieses Verfahren. Der gute Wärmeübergangskoeffizient vom $88\text{W/m}^2\text{K}$ ist ein weiterer Vorteil für die effiziente Temperierung des Werkzeuges. In Bild 10 sieht man den Einbau des Werkzeugs im geöffneten Zustand. Das Werkzeug mit der höchsten Ausbringung hat seit 1999 ca. 120.000 Hochdächer produziert.



Bild 10: RTM-Werkzeug mit 100%-Nickeloberfläche

2. Abgleich zwischen Simulation und Realversuchen

Um eine genaue Simulation, die mit dem Realcrash vergleichbar ist, durchführen zu können bedarf es einer genauen Bestandsaufnahme der Leistbarkeit der verwendeten Materialien. Hierzu wurde das bereits in Serie befindliche mittelhohe Hochdach XLX als Referenz verwendet und genauestens untersucht. Dabei wurden exemplarisch Probenstücke entnommen und folgende quasistatische Versuchsserien durchgeführt:

- Zugversuch
- Zug-/Druckversuch
- Schubversuch
- 4-Punktbiegeversuch ohne Unterlegblech
- 4-Punktbiegeversuch mit Unterlegblech
- Vorabtests C2

Auf dieser Basis konnten dann Materialkarten erstellt werden, die die Basis für die ersten Simulationen darstellten. Die einzelnen Versuche, siehe beispielhaft den 4-Punktbiegeversuch in Bild 11 oder den Schubversuch in Bild 12, wurden dann in der FEM- Berechnung nachgestellt und Abweichungen korrigiert.

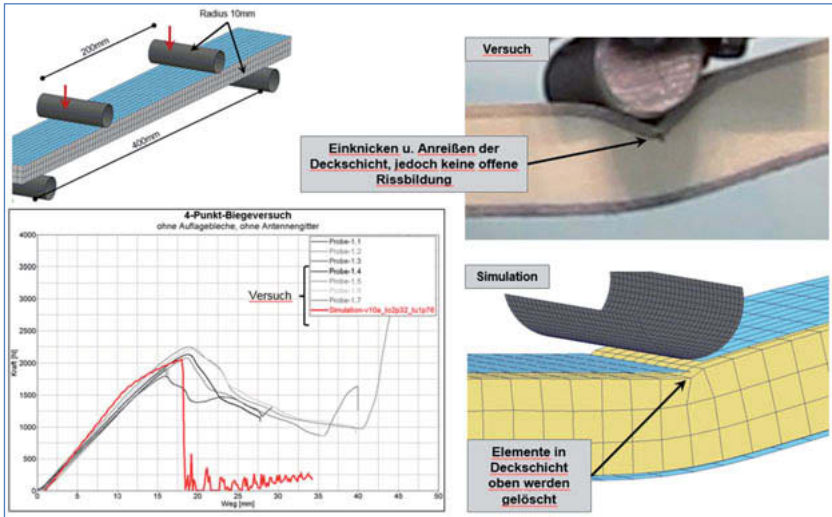


Bild 11: Sandwich-Verbund: Validierung Schub- und 4-Punktbiegeversuch ohne Blech

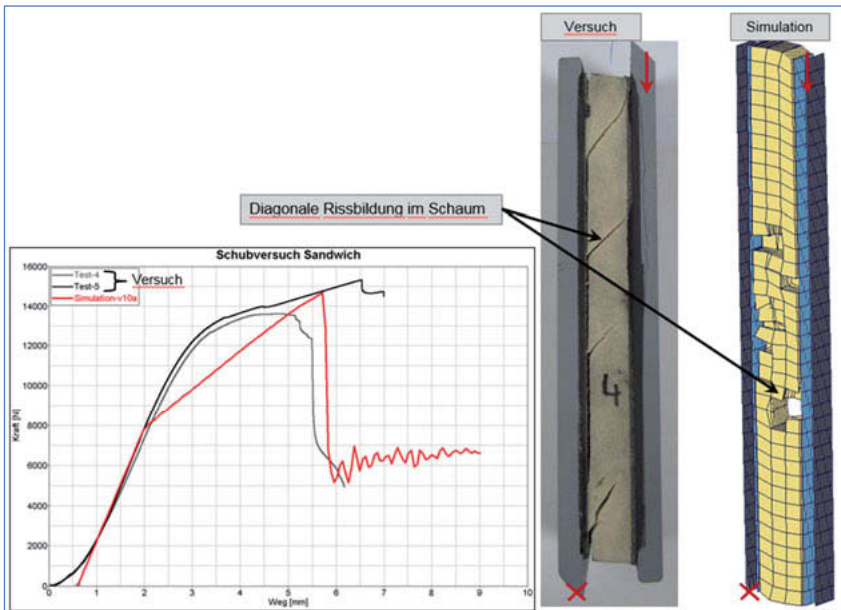


Bild 12: Sandwich-Verbund: Validierung Schubversuch

Die Simulation wurde mit allen Details aufgebaut, Bild 13. So wurden die Außen- und Innenschalen das so genannte Laminat, der Schaumkern und alle Glasfaserdoppelungen, Metallinleger, Durchbrüche und Löcher nachgestellt.

Die Rechnungen werden mit LS-Dyna durchgeführt. Für einen Durchlauf des kompletten C1/C2 Testprogramms benötigt man mit acht CPU's acht Tage und bei priorisierten Rechnungen und vorhandener Kapazität mit 16 CPU's vier Tage. Somit sind Variantenrechnungen mit dem dazugehörigen Vorlauf der Vernetzung wesentlich schneller darzustellen als vergleichbare Realcrashes.

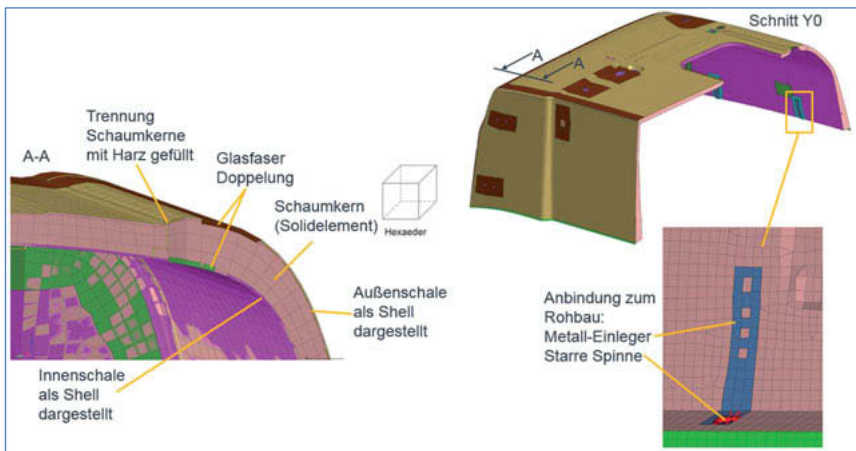


Bild 13: Aufbau der Modelle zur Simulation

Im nächsten Schritt wurde ein Fahrerhaus mit XLX-Dach starr am Boden verankert und schrittweise eine Belastung bis zum Versagen der Struktur aufgebracht. Dies sollte den Test C2 ohne der Vorschädigung aus Test C1 simulieren, da Test C1 nicht ohne weiteres kurzfristig darstellbar und wiederholbar ist. Nach ca. 133kN zeigt sich ein Versagen des Daches an der C-Säule indem es vertikal aufreißt. Hier spielt das Wegknicken des Rohbaus im Bereich des Schachts für die Rohluftansaugung eine entscheidende Rolle, da hier das Dach nicht mehr gestützt wird, Bild 14.



Bild 14: Erster Komponententest mit festverankerter Karosserie

Ein Nachteil dieses vereinfachten Tests ist, dass die Last komplett über die C-Säule in die Struktur eingeleitet wird und somit diese Last im Bereich der C-Säule sehr viel höher ist als die reale Belastung des Versuchs C2.

Dieser Nachteil konnte auch schon zu diesem Zeitpunkt in der Simulation aufgezeigt und die Schäden relativ gut im Vergleich visualisiert werden.

Deshalb wurde ein Komponententest entwickelt, der nur einen Teilabschnitt des Kabinenrohbaus beinhaltet. Dabei ist die Dachoberfläche horizontal und somit parallel zur Platte, die die aufgebraute Prüfkraft gleichmäßig über die Dachoberfläche verteilt. Somit verhält sich der Komponentenversuch ähnlich wie der Realversuch. Beim Realversuch wird die Kabine bei Beaufschlagung der Kraft erst in die hintere Lagerung gedrückt und damit die Last nahezu gleichmäßig in die Struktur eingeleitet. Der Einfluss der Frontscheibe wurde mit einer eingeklebten Aluminiumplatte simuliert, Bild 15.

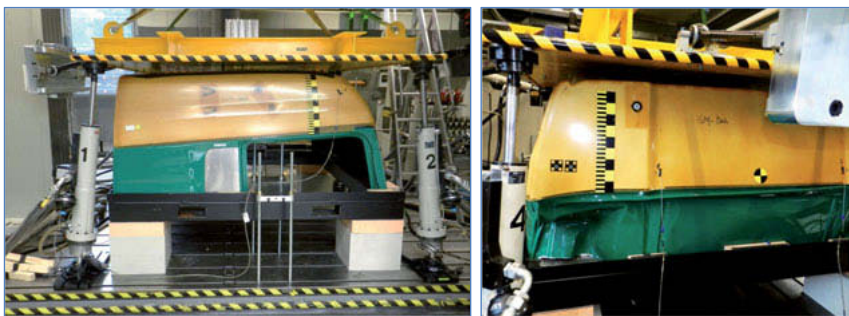


Bild 15: Vereinfachter Komponententest mit zur Prüfkraft ausgerichtetem Dach

Direkte Anschraubpunkte im Hochdach wurden simuliert und im Versuch bestätigt. Hierbei wurden glasfaserverstärkte Epoxidharzblöcke in den Schaumkern eingelegt und im RTM-Prozess eingebettet. Diese Kerne gehen eine sehr gute Verbindung zwischen dem Außen- und Innenlaminat ein, haben eine sehr hohe Ausreißkraft und zeigen deutlich weniger Abzeichnungen an der Oberfläche als die bis dato eingesetzten Blecheinleger. Dabei konnten bei 10.000 Zyklen schwellosender Belastung keine Beschädigungen festgestellt und eine Ausreißkraft von ca. 10kN nachgewiesen werden. Diese ist weitaus höher als die geforderte Ausreißkraft. Bild 16 zeigt die Prüfung der Anbindung der oberen Liege einmal im kompletten Dach und einmal an Ausschnitten. Hiermit konnten verschiedene Ausführungsformen mit und ohne Voralterung getestet werden.

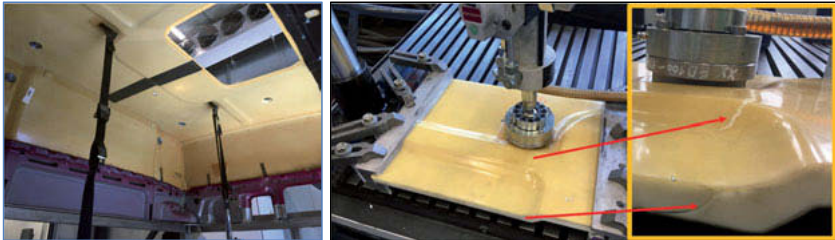


Bild 16: Erprobung Liegenanbindung im Fahrerhaus, und an Ausschnitten (neu und gealtert)

Der in Bild 17 aufgebaute Test wurde unter anderem zur Abprüfung der auftretenden Last bei einer Bahnrückwärtsverladung genutzt. Hier können bei einer Zugbegegnung im Tunnel sehr hohe Kräfte am Aeropaket auftreten, welche einer Windgeschwindigkeit von 250km/h entsprechen – Formel 1-Tempo sozusagen. Auch hier wurde nach schadensfreiem Prüfzyklus eine Last bis zum Versagen aufgebracht, die weitaus höher als gefordert war.



Bild 17: Erprobung Anbindung Aeropaket (neu und gealtert); Bahnrückwärtsverladung

Aus verschiedenen Simulationsschleifen und Versuchsreihen konnten schließlich die Realversuche in der Simulation sehr gut vorhergesagt werden. Neben den Komponententests, in denen wir den Abgleich mit und ohne Zusatzverstärkungen nachstellen konnten wurden diese Erkenntnisse dann auch über scharfe Realcrashes bestätigt. Der Abnahmecrash konnte dann den Behörden vorab 1:1 in der Simulation vorhergesagt werden. Bild 18 zeigt einen B-Muster Vorcrash nach C1 aus dem Juli 2017.

Bild 19 zeigt einen B-Muster Vorcrash nach C2 aus dem Oktober 2017 im Vergleich mit der Simulation. Hier ist gut zu erkennen, dass die Rissbildung an der hinteren linken Dachkante gut vorhergesagt werden konnte. Ebenfalls aus diesem Vorcrash stammt Bild 20 in dem man das Einknicken des Daches im Bereich der Absenkung des Rohbaus sehr gut im Vergleich sehen kann.

Bilder 21, 22 und 23 zeigen den C-Mustercrash nach C1 und C2. Im Bild 21 ist der Vergleich der Vorschädigung der linken Dachhinterkante nach C1 zu sehen in der es einen leichten Anriss des Decklaminates gibt. In Bild 22 ist dann der selbe Bereich nach C2 zu sehen mit einer Verstärkung des Anrisses. Bild 23 zeigt wieder den Vergleich des Einknickens des Dachs im Bereich der Absenkung des Rohbaus.

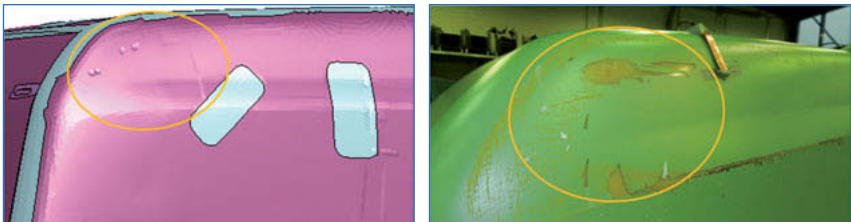


Bild 18: Vergleich Simulation zu B- Muster – Realcrash Juli 2017 nach C1

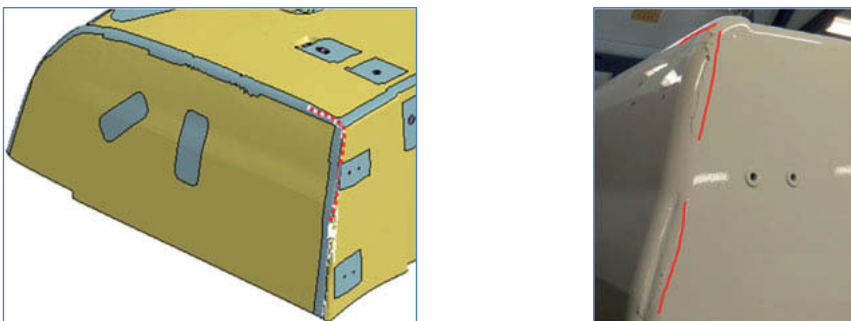


Bild 19: Vergleich Simulation zu B- Muster – Realcrash Oktober 2017 nach C2

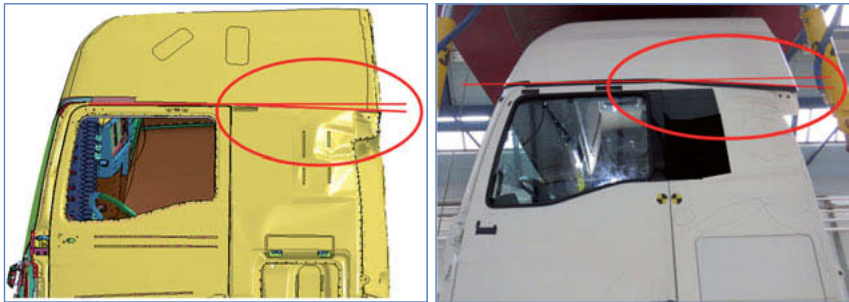


Bild 20: Vergleich Simulation zu B- Muster – Realcrash Oktober 2017 nach C2

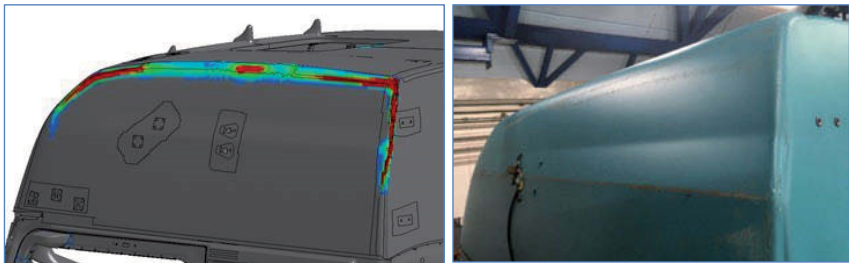


Bild 21: Vergleich Simulation zu C- Muster – Realcrash November 2018 nach C1

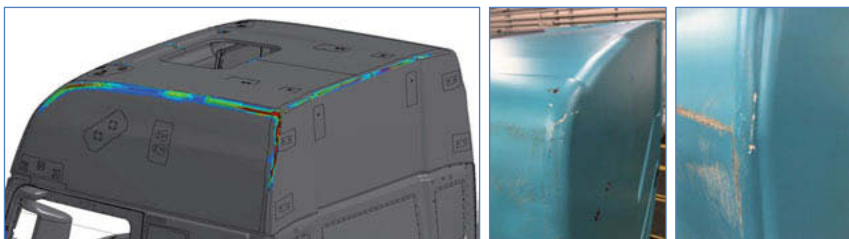


Bild 22: Vergleich Simulation zu C- Muster – Realcrash November 2018 nach C2

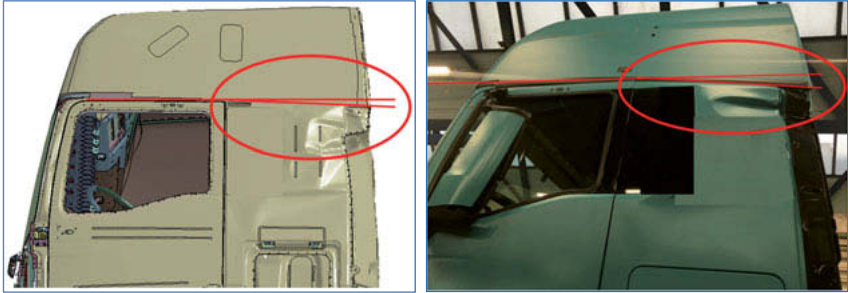


Bild 23: Vergleich Simulation zu C- Muster – Realcrash November 2018 nach C2

6. Fazit

Durch umfangreiche und zum Teil unkonventionelle Testreihen ist es MAN gelungen den Abgleich zwischen Simulation und Realcrash auf ein Qualitätslevel zu heben, in dem wir in der Lage sind die Simulation für Änderungen in der Geometrie, Lagenaufbau oder Einbringen von Beschnitten zur Bestätigung der Entwicklungsziele zu nutzen.

Das Ziel, auch die Homologationsbehörden davon zu überzeugen, Änderungen per Simulation in die Serie einfließen zu lassen, ohne umfangreiche und teure Realcrashkampagnen durchführen zu müssen, ist je nach Komplexität der Änderung bereits gelungen.

THERMOFIL HP® – pushing the boundaries of high-performance glass-coupled polypropylene using the latest development in CAE to accelerate part development

Nicolas Schlutig,

SUMIKA Polymer Compounds France, Saint Martin de Crau, France;

John Oliver,

SUMIKA Polymer Compounds UK, Havant, UK

Abstract

Cost-saving through lightweighting solutions is predominant in increasing the demand for polypropylene compounds in the automotive industry. Innovative product development in high-performance glass-coupled PP compounds has driven the substitution of engineering thermoplastics such as polyamide compounds in mechanical and structural automotive parts thereby contributing to weight-saving and CO₂ reduction targets.

SUMIKA Europe will present a new family of engineering PPs: the THERMOFIL HP® range which meets this development challenge, exhibiting innovative and creative performances in polypropylene short-glass-fiber compounds combine with a full innovative material card in order to support CAE and lightweighting solutions. SUMIKA Europe will present a case history combining predicted behavior and real behavior in parts.

Keywords

High-performance glass-fiber-reinforced PP vs. standard glass-fiber-reinforced PP. How THERMOFIL HP® range is superior (physical properties, etc. HP GFPP vs. engineering thermoplastics. HP GFPP as a real cost-saving lightweighting solution. How the THERMOFIL HP® material card will predict with good accuracy the behavior of complex parts in the automotive industry.

1. Introduction

Considering the current context of the automotive market which is pushing to achieve a continuous reduction of CO₂ emissions from cars as described in the policy update of the international Council on Clean Transportation (see Fig. [1]), the automotive industry must be

innovative in different domains such as engine design, hybridization of vehicles, vehicle electrification, aerodynamics but also in a lighter vehicle weight.

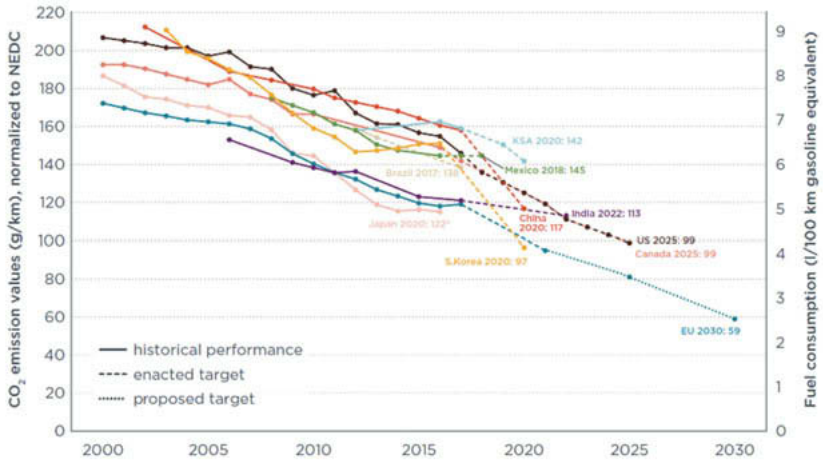


Fig. 1: CO₂ emission target values

In this context of vehicle weight reduction SUMIKA Polymer Compounds has been innovating in this direction for more than 15 years. With the latest evolution of our THERMOFIL HP® range we can obtain a standard of lightweighting for automotive parts without performance compromises. Furthermore, this innovation is available worldwide as is compliant with the automotive market while still retaining local specificity.

Moreover, the latest development in a non-linear anisotropic approach combined with the THERMOFIL HP® material card makes it possible to predict very accurately the behavior of complex parts, thereby opening up new opportunities and applications.

2. The customer challenge

To meet the target in terms of weight and sustainability, there was an OEM request to suggest an alternative to PA6-GF30 and PA6-GF50 for the pedal box and brake pedal while using a metal insert (see Fig. [2]).

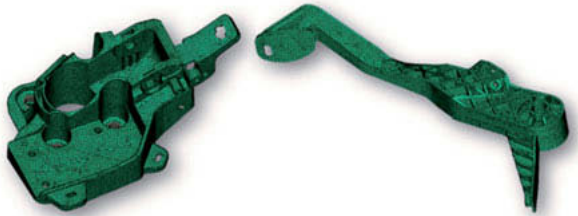


Fig. 2: Pedal box and brake pedal

As the automotive market is always looking for a high level of performance and a light weight in order to achieve the CO₂ emissions target, our THERMOFIL HP® range is well-positioned with respect to traditional engineering plastics in offering alternative lightweight solutions. SUMIKA Europe has proposed some alternatives as shown in Table [1].

Table 1: THERMOFIL HP® compared with PA-GF

Properties	Method	Unit	PA6-GF30		THERMOFIL HP	PA6-GF50		THERMOFI
			dry	wet	F611X	dry	wet	L HP F911X
Density	ISO 1183	g/cm ³	1,35		1,12	1,57		1,34
Ash content	ISO 3451	%	30		30	50		50
Humidity absorption	ISO 62	%	0,95		NA	1,2		NA
Tensile strength	ISO 527	MPa	150	100	114	225	160	142
Tensile elongation	ISO 527	%	3	4	3	3	5	2.7
Tensile modulus	ISO 527	MPa	8500	6200	7700	16500	10800	13000
Flexural modulus	ISO 178	MPa	8600	5500	6500	13500	9500	11200
Flexural strength	ISO 178	MPa	270	180	150	340	230	191
Charpy Impact unnotched	ISO 179/1eU	KJ/m ²	95	110	58	95	100	58
IZOD impact	ISO 180	KJ/m ²	14	24	12	20	25	16

The other challenge was to check the feasibility of those parts in PP-GF by minimizing the prototype phase in order to address the OEM request to achieve development more quickly, more safely and more accurately.

3. SUMIKA solutions in CAE

3.1 SUMIKA MOLDFLOW

SUMIKA offer to conduct a complete and deep Moldflow analysis in order to reduce the time for fine-tuning during the first stage of development.

Thanks to high quality of SUMIKA's Moldflow card, we have performed different Moldflow analyses and given the best recommendations and process conditions to reduce warpage, the welding line and the occurrence of porosity in the part. More specifically, the two options proposed by our customer involve a high degree of warpage and a high risk of shrinkage which entails a high risk of porosity.

SUMIKA team have suggested another option with very little warpage and less shrinkage (see Fig. [3] and Table [2]).



Fig. 3: Gate locations (Option 1, Option 2, SUMIKA proposal)

Table 2: Warpage and risk of porosity

	Option 1	Option 2	SUMIKA proposal
Degree of warpage	1 mm	1.3 mm	0.5 mm
Risk of porosity	high	high	low

As the SUMIKA proposal predicts less warpage and a low risk of porosity, this option has been used for injecting the pedal box.

3.2 SUMIKA FEA

An FEA was conducted using the ANSYS solver and the non-linear anisotropic approach taking in account the glass fibers in order to obtain a better prediction (see Fig. [4]).

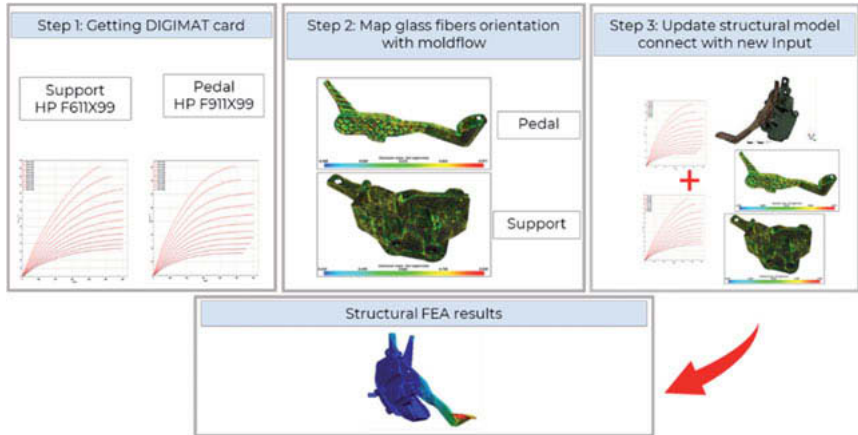


Fig. 4: Process in making an FEA analysis

The process used to make the FEA analysis is fairly leading-edge as it takes in account the glass-fiber orientation arising from injection simulation. The process involves 4 steps, the first step being to obtain the DIGIMAT material card (the behavior of material with different glass-fiber orientations). The SUMIKA card was created by cutting some test bars from an injected plate. Some ISO bars were then cut with different glass-fiber orientations (0° , 90° and 45°). In addition, we also checked fiber length and fiber orientation, determining the thickness by tomography. This makes a very high quality of material card possible in order to obtain the best prediction.

The second step is to obtain the glass fiber-orientation provided by the Moldflow analysis (mapping).

The third step is to load into DIGIMAT RP (multiscale non-linear anisotropic software) the card and the mapping coming from the injection process.

The fourth step is to load the combination into the ANSYS solver and then obtain the FEA analysis as the standard approach *but* taking in account the process of manufacturing the parts.

For the FEA analysis, different loading cases for the pedal box and brake pedal were applied as shown in Table [3] below.

Table 3: Loading cases

	Load case	Direction	Force (DaN)	Angle	Cycles	Condition
1	Longitudinal stiffness	Fxz	+50	0°	1	23°C
2	Side stiffness	Fy	+10	0°	1	23°C
3	Side stiffness	Fy	+100	0°	1	23°C
4	Plasticity/failure	Fxz	+100	0°	1	23°C
5	Plasticity/failure	Fxz	+100	0°	1	65°C & 85% HR
6	Plasticity/failure	Fxz	+150	0°	1	23°C
7	Plasticity/failure	Fxz	+250	0°	1	23°C
8	Plasticity/failure	Fxz	+250	0°	1	65°C & 85% HR
9	Plasticity	Fxz	+150	15°	1	23°C
10	Plasticity	Fxz	+150	15°	1	65°C & 85% HR
11	Plasticity	Fxz	+100	0°	1	23°C
12	Plasticity	Fxz	+100	0°	1	65°C & 85% HR
13	Plasticity	Fxz	-40	0°	1	23°C
14	Plasticity - LCF	Fxz	+150	0°	10	23°C
15	Plasticity - LCF	Fxz	+150	0°	10	65°C & 85% HR
16	Plasticity - LCF	Fxz	+200	0°	10	23°C
17	Plasticity - LCF	Fxz	+200	0°	10	65°C & 85% HR
18	Plasticity - LCF	Fy	+60	-45°	10	23°C
19	Plasticity - LCF	Fy	+60	-45°	10	65°C & 85% HR
20	Plasticity/failure	Fxz	+150	0°	1	23°C

An FEA analysis was carried out, some results being shown below (see Fig. [5]).

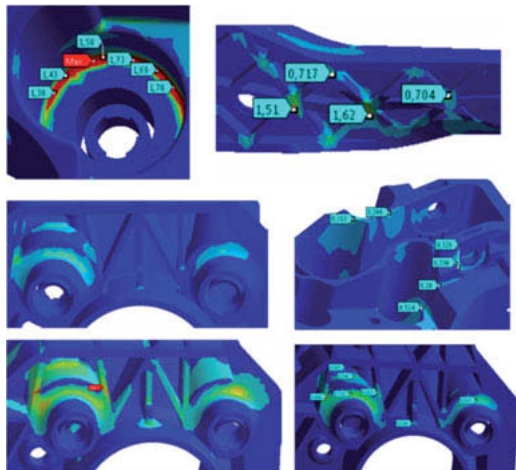


Fig. 5; Different FEA results

None of the FEA results show any risk of failure, while in some loading cases there is a residual displacement at the limit of the product but not involving failure. This should be checked carefully.

3.3 FEA results vs. testing on parts

Thanks to all of the results described above, one mold has been produced and testing carried out according to the different loading cases.

Some comparison of FEA results versus the results for test parts are shown in Table [4].

Table 4: Results of an FEA analysis

Loading cases	FEA prediction (mm)	Part results
Loading/unloading for 5s at 250 DaN/ 65°C	25.8 (maximum displacement) 4.2 (residual displacement)	23.5 (maximum displacement) 3.9 (residual displacement)
10 loading/unloading cycles at 200 DaN/ 65°C	18.8 (maximum displacement) 4.41 (residual displacement)	19.2 (maximum displacement) 4.6 (residual displacement)

The comparison table above shows a very accurate prediction as compared with the real behavior measured on the part. This is due to a high-quality material card (glass-fiber orientation, fiber length and orientation into the thickness) combining with a non-linear anisotropic approach while taking the process in account (glass-fiber orientation in the parts). This approach enables the simulation of load cycles and the maintenance of loading for some seconds coupled with a relatively good prediction. This gives our customer the green light to produce the part (see Figs. [6] and [7]).



Fig. 6: Pedal box in THERMOFIL HP® F611X99



Fig. 7: Brake pedal in THERMOFIL HP® F911X99

4 Conclusions

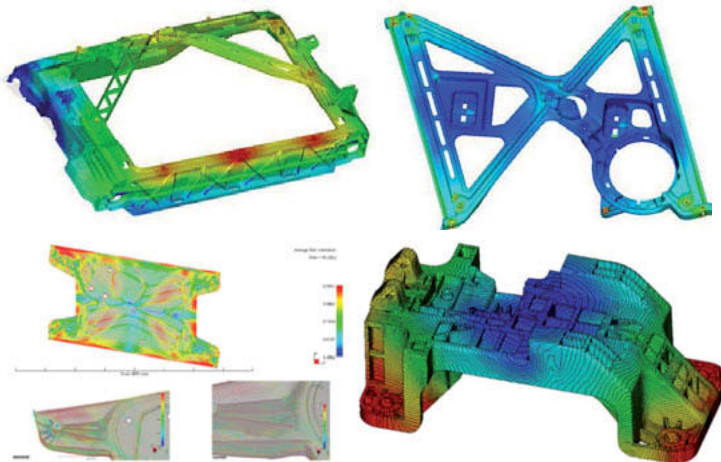
The THERMOFIL HP® series out-performs traditional engineering plastics such as PA6-GF, PA66-GF and PBT-GF even at elevated temperature, thereby introducing a new engineering glass-fiber-reinforced PP into the automotive industry. This makes it possible to meet CO₂ emissions requirements for high-demand parts via lightweight solutions (see Table [5]).

Table 5: Weight-saving

	THERMOFIL HP F611X99	THERMOFIL HP F911X99
PA6-GF30	17% weight-saving	-
PA6-GF50	-	15% weight-saving

THERMOFIL HP® can deliver substantial weight- and cost-savings due to raw material volume costs and process costs (around 15 to 40%). The THERMOFIL HP® series combined with a non-linear anisotropic approach makes it possible to minimize development time in order to develop more quickly with very good accuracy, thus pushing the boundaries of short-glass-fiber PP, unlocking new opportunities and applications. This promises no limits for structural, door, cockpit or underhood applications.

Considering the very good properties observed with THERMOFIL HP®, it has been possible to replace traditional engineering plastics in various applications.



5 References

- [1] International Council on Clean Transportation: 'CO₂ emission standards for passenger cars and light commercial vehicles in the European Union', p. 9, ICCT, January 2019.

Increasing the safety of battery modules in electric vehicles with polyurethane pultrusion

Galen Greene, Benedikt Kilian, Dr. Richard Reithmeier,
Covestro Deutschland AG, Leverkusen, Germany

Abstract

Driven by climate change, regulation, and CO₂ reduction, eMobility is projected to grow significantly in the coming years. Of the many opportunities that eMobility creates for innovative materials, perhaps none is more important than safety. This is especially true in terms of crash safety, as any deformation of the battery pack can lead to rupture and thermal runaway. Covestro has taken up this challenge and has developed an innovative new battery component to increase crash safety in electric vehicles. The battery pack concept incorporates Covestro's Baydur® PUL pultrusion technology.

Pultrusion is a well-established and cost-efficient manufacturing process used to create composite parts from polyurethane resin and fibers such as glass or carbon. In the process, continuous fibers are pulled through a tempered pultrusion die while liquid polyurethane is injected. The material is shaped and hardened before being cut into the desired dimensions. This cost-efficient process is ideal for a vehicle's battery housing as OEMs seek lightweight, strong, and modular designs for future purpose-built electric vehicles.

During development of the innovative battery housing, several design options were considered. These options included using pultruded polyurethane profiles as various parts of the construction (bottom plate, struts, frame). To validate and compare the designs, several simulations were conducted. These included two crash simulations and three ECE R100 tests. The two China Crush and side-pole crash tests evaluated energy absorption and deformation. Three ECE R100 tests evaluated mechanical integrity, mechanical shock and vibration.

Results of the simulation were compared with a benchmark battery pack of current materials. The results showed that the Covestro Baydur® PUL material can significantly outperform the benchmark pack in the key crash tests. The results of these tests will be reviewed and recommendations of further design options will be discussed. Ultimately, the evaluation has shown that advanced composite materials can continue to drive innovation in the automotive industry.

Introduction

The automotive industry is at the beginning of a major transition. Climate change, resource conservation, and reduction of CO₂ emissions have set the stage for the electric vehicle revolution. OEMs around the world are heavily investing in the development of electric vehicles. This disruption is gaining momentum, and analysts have been raising their predictions for EV adoption.

The electric vehicle era creates many new opportunities in the automotive industry, but perhaps the most important of these is safety. New components can offer advantages such as increased strength, while also keeping weight low. This paper will present a concept that uses polyurethane pultrusion to increase crash safety protection of the battery pack.

Battery design

Many of the first electric vehicles were built with compromise. The OEM typically took the traditional vehicle architecture and added an electric motor and battery. The battery was thus designed to fit in the open spaces, such as the transmission tunnel, under the rear seat, or the trunk. These designs do not allow for an optimized battery pack. As OEMs further advance their eMobility strategy, purpose-built EV architectures are emerging. These vehicles typically use the entire area beneath the passengers for the battery. This results in a simple rectangular shape that maximizes size and reduces complexity. It is then also possible for the housing of the battery pack to provide structural strength to the vehicle.

Battery safety

With large batteries becoming a key component of future vehicles, different safety considerations arise. Electric vehicle batteries are often made up of many small lithium ion cells. One of the most severe conditions for the battery arises when any of these battery cells are deformed or punctured. In this situation, the cell creates a short circuit and high heat is generated. This high heat can create a fire. The heat from one cell can heat neighboring cells and create a runaway situation. Electric vehicle battery fires can be particularly intense and, beyond the immediate safety concern, can even attract attention from local and international media.

As the battery occupies more and more of the available space under the vehicle, it inevitably gets closer to the edges of the vehicle. In a crash situation in which the main impact is from the front or rear, there is still the existing energy dissipation zone forward or aft of the wheel that helps to protect the battery. In a side crash, the energy dissipation zone is signifi-

cantly smaller. In these side impacts, it is even more important to ensure that the battery housing is very strong and rigid. Conflicting with these strength requirements is also the desire for lower weight, as the battery is now one of the heaviest items of the vehicle. This creates opportunities for new, innovative solutions to ensure a high level of safety for the occupants of the vehicle.

Battery requirements

The battery housing is a component that greatly influences many factors of a battery including its functionality, safety, and service life. It protects the internal components from environmental factors such as temperature and moisture. It is subjected to vibration and shock from normal vehicle operation, and must also be built to provide protection under the most extreme loads experienced in a crash.

A typical battery housing consists of a floor panel, cover plate, side walls, and structural elements. The battery housing must safely cradle all of the battery cells and provide a strong connection to the vehicle. Typical materials used include steel, aluminum, and plastic. Steel and aluminum usually are used for structural elements for their high strength and stiffness. Plastic components can play various roles, such as, for example, small connectors and cover plates. All of these components must provide a sealed compartment for the sensitive electrical parts.

Some standards exist that specify the requirements for these battery housing components. Examples include the ECE R100 specification, as well as some customer-specific and local requirements. In the end, the OEM must meet overall specifications such as crash safety and electromagnetic safety requirements. In light of these requirements and the fact that these technologies will become more common, there is great potential for innovative materials. This is especially true of components that can offer safety advantages at low weight.

Pultrusion

Pultrusion is a well-established and cost-efficient manufacturing process used to create composite parts from polyurethane resin and fibers such as glass or carbon. In the process, continuous fibers are pulled through a tempered pultrusion die while liquid polyurethane is injected. The material is shaped and hardened before being cut into the desired dimensions. This cost-efficient process is ideal for a vehicle's battery housing as OEMs seek lightweight, strong and modular designs for future purpose-built electric vehicles.

Covestro's battery concept with glass-fiber-reinforced polyurethane pultrusion

Seeing the challenges ahead, Covestro has been working with several partners to evaluate the potential for new innovative materials for electric vehicle batteries. The focus of innovative efforts has been to evaluate whether composite solutions, specifically glass-fiber-reinforced polyurethane pultrusion, can provide strength benefits for the battery pack. The ultimate goal is to improve the crash performance of the battery pack. This could not only provide a benefit to the pack itself, but also to the entire vehicle as the battery pack is integrated into the load-bearing structure of the car.

A new battery solution was designed from the ground up. Images of the design are shown in Figs. 1 through 4. To make a comparison, several design iterations of the same basic battery pack were completed:

Two of these designs were designated as 'benchmark' and these included standard existing battery pack materials:

1. With support struts
2. Without support struts

Four iterations of the concept battery pack included using glass-fiber-reinforced pultruded (GRP) components:

1. All GRP
2. Strut and bottom GRP
3. Bottom GRP
4. Strut GRP

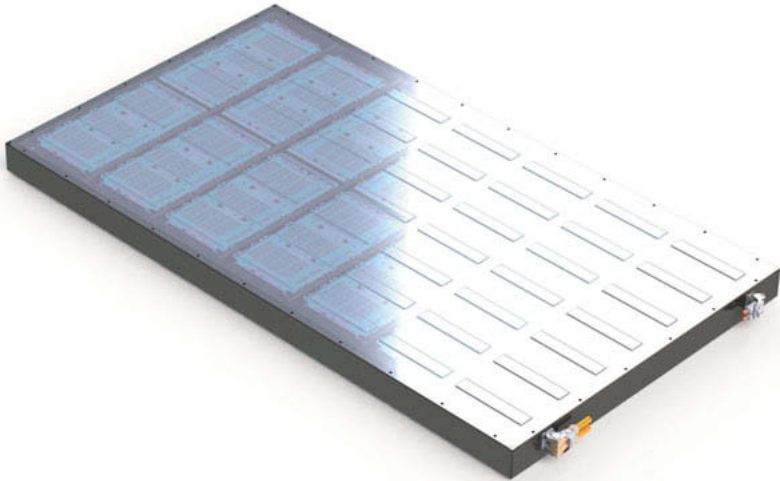


Fig. 1: Concept battery pack – top view

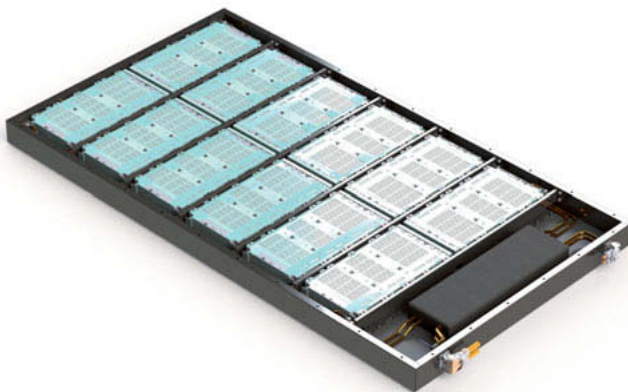


Fig. 2: Concept battery pack – top view without lid

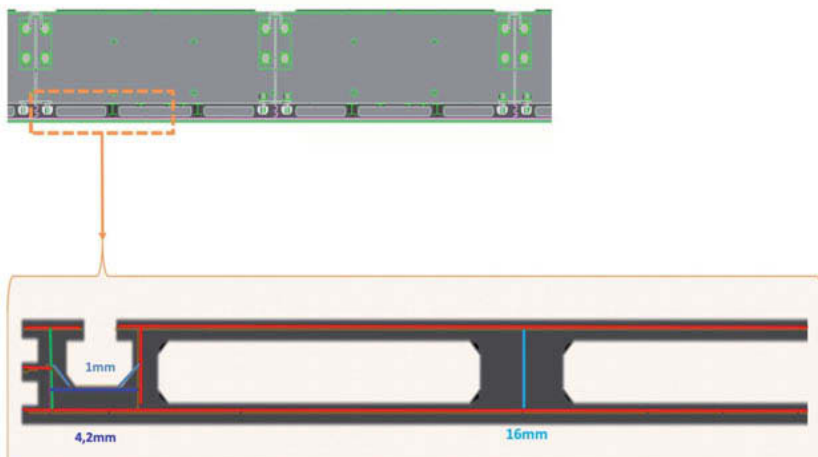


Fig. 3: Concept battery pack – side view of pultruded profiles

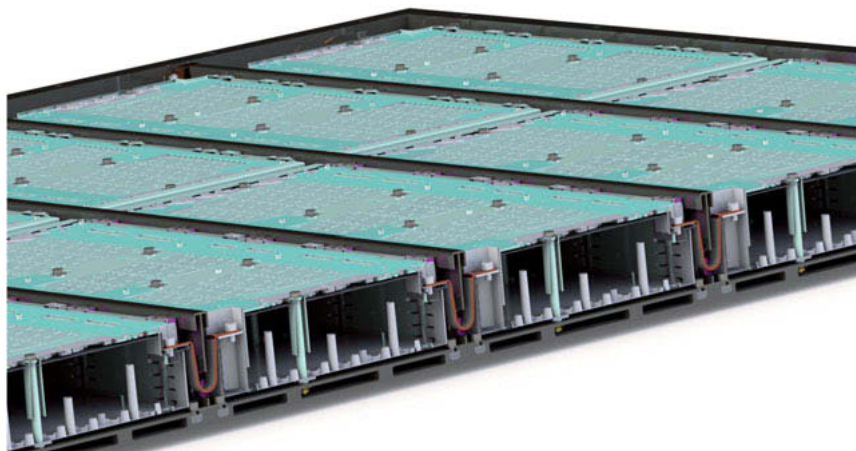
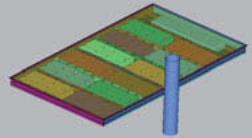

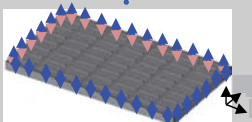
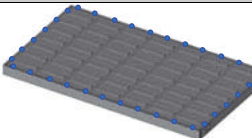
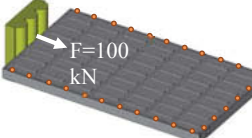


Fig. 4: Concept battery pack – side view of pultruded profiles

Evaluation criteria

After each design was modelled, it was run through several different crash test simulations. The evaluations are shown in Table 1.

Table 1: Description of evaluations

Test	Explanation	Visualization
China crush test	Pushing battery pack against a 150 mm pole at a constant speed of 1 mm/ms until a 120 kN load is reached	
Pole side impact	Pushing the pack (including vehicle chassis) into a pole at a speed of 35 km/hr and with a vehicle weight of 1750 kg	
ECE R100 T.1 vibration	The battery pack is subjected to sinusoidal accelerations with a given frequency profile	
ECE R100 T.3 mechanical shock	Load introduced into the battery pack at fixed points with a given acceleration profile.	
ECE R100 T.4 mechanical integrity	100 kN load applied to the front of the battery until a state of equilibrium is reached.	

These evaluations were selected after an analysis of existing evaluation criteria for battery pack safety. These tests represented a broad set of criteria for mechanical integrity. Each battery producer and OEM will typically have their own (often proprietary) set of requirements. The selected evaluation criteria were chosen as a starting point to test the strength of the different concepts.

Three other criteria were considered when comparing the different designs. The first additional criterion was cost. This was estimated for both the benchmark design using traditional materials and for the new glass-fiber-reinforced polyurethane pultrusion designs. The second additional criterion was complexity of concept. This includes the design effort, and the complexity of manufacturing. Finally, weight was also considered.

Evaluation results

First, the designs were evaluated with simulations of the China crush test and the pole crash test. The results showed that glass-fiber-reinforced pultrusion can offer significant benefits to the overall strength and rigidity of the battery housing. The benchmark battery pack sustained critical damage in both the China crush test and the pole crash test. Of the four designs considered with glass-reinforced pultrusion, two performed very well. In these two designs, the battery modules are predicted to sustain no critical damage.

Fig. 5 shows how each iteration performed. The iterations show that there are several possible ways that glass-fiber-reinforced pultrusion can add value. For the purposes of this evaluation, the design iteration with the bottom section being glass-fiber-reinforced pultrusion was selected as the best design. This offers a strong balance of strength, weight, and complexity. This evaluation was limited to these six designs – however, it should be noted that further iterations could be considered. This could lead to even better results.



Fig. 5: Results

Next, the leading design (bottom made of glass-fiber-reinforced polyurethane) was evaluated in in the three ECE R100 tests. These tests all showed excellent performance, vastly exceeding the requirements. The results are summarized in Table 2.

Table 2: Results of simulated ECE R100 tests

Test	Result
ECE R100 T.1 vibration	Stress well below fatigue strength of the materials used, no fatigue. The battery pack exhibits high dynamic stiffness. Simulation suggests no damage.
ECE R100 T.3 mechanical shock	Highest stress in the area of screw connections. Stresses are well below the yield strength. Simulation suggests no damage.
ECE R100 T.4 mechanical integrity	Only 1.2 mm deflection, with almost no plastic deformation. Simulation suggests no damage.

Summary

This design evaluation has shown that polyurethane pultrusion can offer significant benefits to the design of electric vehicle batteries. Safety of these components will remain a highly important parameter. The polyurethane pultrusion in this design concept offers increased crash protection when compared to a similar battery pack designed with traditional materials. Several iterations of the design included using polyurethane pultrusion for various components. The results of this particular evaluation suggested that using polyurethane pultrusion for the bottom plate offered the best combination of crash protection, weight, complexity, and cost.

Further recommendations

With the success of this work, future evaluations could be considered. This work was completed using an example battery pack design. The main goal was to determine whether innovative composite components could offer increased crash protection to a battery pack.

The battery pack can become a component that is highly integrated into the design of the vehicle. This could allow optimization of the vehicle structure to achieve the required crash protection, while also minimizing weight and complexity. Further design work could be pursued with a particular vehicle design.

While the recommended design included polyurethane pultrusion for the bottom plate, the work shows some potential for using polyurethane pultrusion for other components. The design could be rethought to improve on the results shown in this report. Ultimately, a partic-

ular battery pack must perform well in the actual vehicle design. Further evaluation can be carried out with an actual vehicle, and additional optimization could be achieved.

Finally, other parameters will be evaluated in the future. These parameters include the remaining ECE R100 evaluations (temperature, fire resistance, etc.). An initial analysis of the parameters and the design shows a high probability of these requirements being met.

Innovative large-scale production application of thermoformed parts for electric vehicles

Thermoformed wic outer skin of the e.GO Life

Dipl.-Ing (FH) **Johannes Rosenberger**,
PARAT GmbH + Co. KG, Neureichenau

Abstract

The complete outer skin for the electrically powered small car e.GO was designed in a combination of single- and double-shell thermoformed parts. Requirements are met through the use of co-extruded ABS PMMA. A dedicated production layout was developed for large-series production.

1. The PARAT Group: the plastics experts for trim components

PARAT is a global partner for highly functional trim and structural components made of plastic with a diversified range of technologies: from simple thermoformed moldings to first-class composite system components with complex geometries. Thanks to state-of-the-art systems and its outstanding technical personnel, PARAT offers the perfect customer-specific solution in all market areas.

As a developer of new products and owner of over 200 patents, PARAT serves an extremely wide variety of markets around the world.

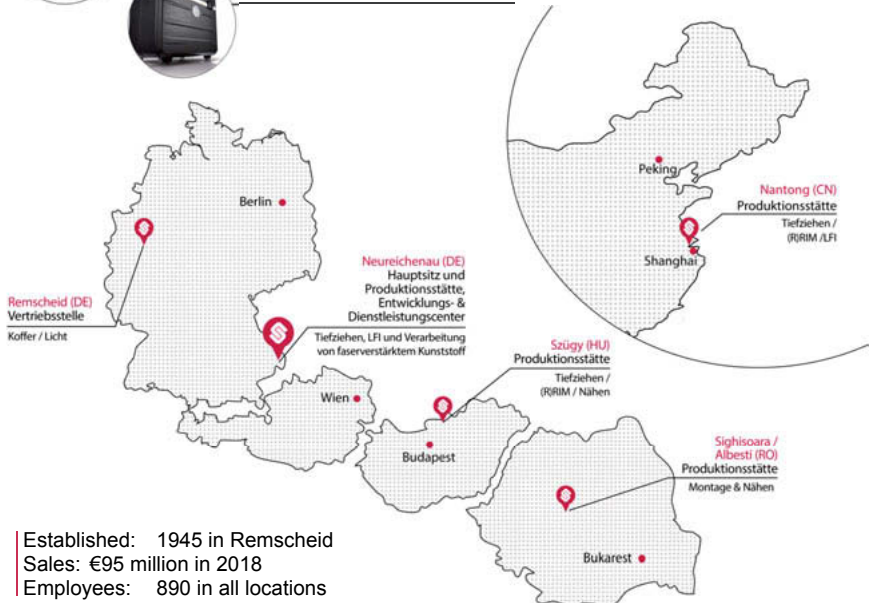


Fig. 1: PARAT locations and areas

In addition to its headquarters in Neureichenau, Lower Bavaria, PARAT has production sites in Hungary, Romania and China.

The group with its technological focus on thermoforming, polyurethane reaction injection molding (RIM) and long-fiber injection (LFI) is excellently positioned to meet the demands of international OEMs in the construction machinery, agricultural machinery, trailer, automobile and truck market areas as well as the new mobility and energy sectors.



Fig. 2: The market areas of the plastics experts PARAT: construction machinery, agricultural machinery, trailers, automobiles, trucks, and new mobility and energy.

PARAT supports all tasks in its customers' projects, from the first steps of the development phase up until final production.

As a system partner, PARAT offers a wide range of technologies that use materials that are perfectly matched to the product concept, thereby guaranteeing optimum economic efficiency. In addition, in order to achieve a process-optimized result, PARAT stands behind the customer with exclusive engineering and development support in its own development and service center – from the planning phase up to the finished product.

2. e.GO project concept

The e.GO Life is an affordable electric vehicle for short-distance travel [1]. Started as a development project on the RWTH Aachen campus, the first cars of this type were delivered in mid-2019. The engineers relied here on a plastic-clad vehicle body. The large-volume components are manufactured by the plastic processors PARAT using the vacuum thermoforming process.

e.GO Life

**One base vehicle,
three classes of vehicle**
e.GO Life 20 | e.GO Life 40 | e.GO Life 60

Five vehicle colors metallic
lic red | white | blue | anthracite | silver

Vehicle performance

Vehicle speed
70 mph to 88 mph

Vehicle range
62 to 90 km




Fig. 3: e.GO vehicle classes

What started in 2015 with an idea of Prof. Dr. Günther Schuh – an affordable electric car for city traffic – has now been delivered officially since 2019. We are talking about the e.GO Life car, which was developed entirely by e.GO Mobile AG thanks to the science and business network on the RWTH Aachen Campus and has now been commercialized by e.GO Mobile AG, Aachen. The company's staff here use the campus network with its research facilities of more than 400 technology companies. Flexible teams have worked on and are working on various inexpensive and customer-oriented electric vehicles for short-haul transport. Series production of the e.GO Life started in March 2019 at the new e.GO plant in Aachen Rothe Erde. The car is available in three versions, with a 14.5 kWh, 17.5 kWh or 23.5 kWh lithium-ion battery.

The system supplier PARAT manufactures trim components for the e.GO Life electric vehicle by the thermoforming process. These components must meet around 30 standards in order to secure properties such as gloss, UV and chemical resistance, color quality and car-wash fastness.

3. Durable outer skin at a reasonable price

For the new e.GO Life electric car, PARAT is developing and manufacturing all 54 plastic trim components of the body, which are supplied in 16 modules.



Fig. 4: Trim modules and components

The aim of the project was to develop a durable outer skin for the vehicle at an affordable price. In addition there were also challenges such as special color specifications, temperature resistance and a very high surface quality. After tests and a feasibility study, the supplier developed the outer skin of the vehicle in collaboration with the manufacturer e.GO mobile AG. In principle, the plastic used, with a density of about 1 kg/dm^3 , offers significant weight savings compared to steel with 7.8 kg/dm^3 . Even with four times the wall thickness, components would still be only half as heavy as a steel construction. In particular with a load-path-specific design or dimensioning of the components in combination with the aluminum frame profile construction used, the weight target was achieved, this being of great importance to the operating range of modern electric vehicles. The thermoformed plastic body is not only lighter, but with the planned annual production quantities over the entire production period (5 to 6 years, 'lifetime' production) is also cheaper than the conventional sheet metal construction. Depending on the component, the thermoforming molds only cost about 3% to 5% compared to sheet-metal forming dies and about 10% to 20% compared to molds for plastic injection molding. In addition, in thermoforming the time-consuming post-priming process for steel components is no longer required nor the very energy-intensive painting process for steel or injection-molded components. This is why painted injection-molded components do not offer a great advantage in terms of the actual component costs. With a vehicle production time of around 5 to 6 years the profit threshold for injection molding is significantly higher than 20,000 vehicles per year. Compared to sheet steel construction, certainly well over 40,000 vehicles per year.

Another crucial point was the short creation time and the ease of modification of thermoforming tools. On the basis of the catalog of requirements to be met, evaluation criteria were set up according to which the possible production technologies were evaluated: thermoforming, RIM foaming, LFI foaming and injection molding.

4. Technology evaluation

Table 1: Technology evaluation

Evaluation criteria	TF	RIM	LFI	Injection molding
Timeline	+	+	0	-
Ease of modification	+	0	-	-
Mechanical strength	0	0	+	0
Surface quality	+	0	+	0
Process reliability / reproducibility	+	+	+	+
Surface resistance (UV, chemicals, etc.)	+	0	+	0
Freedom of design of the components	+	+	+	+
Function integration on the inside	-	+	+	+
Profitability (10,000 units)	+	0	-	-
Lightweight construction	+	0	-	+
Damage tolerance	+	0	+	0

In the thermoforming process, which has the best rating by far, co-extruded plastic sheets made of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) and polymethyl methacrylate (PMMA) layers are used. These are UV-resistant, offer a Class-A surface and are both easy to repair and recyclable.

- | Favorable tooling costs (low investment costs)
- | Short creation time
- | Modifications can be implemented quickly and inexpensively
- | Use of co-extruded ABS PMMA material
- | UV-resistant
- | Class-A surface
- | No need for painting
- | Multiple structures possible
- | Economic system costs
- | Tool life over project duration
- | Damage-tolerant and easy to repair

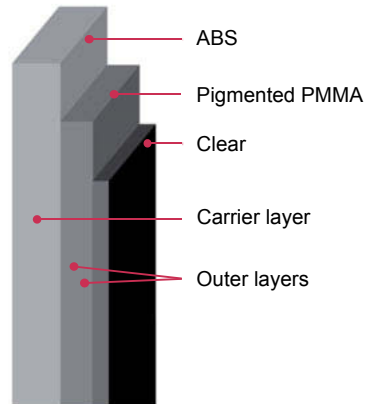


Fig. 5: Advantages of thermoforming, sheet system structure

Plastics can be reshaped relatively easily. A double-shell design with stiffening structures leads to significantly higher rigidities. The elasticity of the ABS-PMMA sheets used is forgiving of minor damage, such as parking bumps, without resulting in permanent deformation. The thermoforming technology is ideal for the production quantities of the e.GO Life.

The plastic panelling is scratch-resistant, colourfast and has an optical depth effect. The plastic components for the body are pigmented in metallic colors and are glued, screwed or fastened with clips to the supporting aluminum profile frame. Different constructive fastening solutions have been developed to improve strength, tolerances in relation to the aluminum and steel frame, crash resistance, seals and pedestrian protection. In the event of damage, the components are easy to replace.

As part of the technology selection process, the CO₂ emissions of different material concepts were also examined. If the entire process of creating a standardized trim area of 1 m² is considered, the CO₂ emission of a plastic trim component is around half that of a sheet steel panel.

5. Production layout

A dedicated production line was designed for the production of the entire e.GO outer skin and invested in the Neureichenau location.

The first manufacturing step, the shaping of the semi-finished product, takes place on a vacuum thermoforming system. In the next step, the outer contours and openings are created by CNC milling. Assembly of the individual component assemblies is decoupled from parts production by a buffer storage facility.



Fig. 6: Production process

With the development of a complete thermoformed vehicle outer skin and the implementation of an industrial series production concept, proof was furnished that the vacuum thermoforming technology for special niche models can also be used for large-scale automotive production.

e.GO Life

e.GO OUTER PANEL



Single-shell and/or double-shell thermoformed parts with maximum possible system integration through partial connection concepts

Fig. 7: Conclusion

References:

- [1] Excerpt from article: Mit Kunststoff auf der Überholspur [With plastics in the fast lane], Frank Peters and Georg Dutzi, from the periodical *Kunststoffe*, 2019, issue 09, pp. 188-189
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co.KG, Munich

Innovative Großserienanwendung von Thermofomteilen für Elektrofahrzeuge

Tiefgezogene Kunststoffaußenhaut des e.GO Life

Dipl.-Ing. (FH) **Johannes Rosenberger**,
PARAT GmbH + Co. KG, Neureichenau

Kurzfassung

Für den elektrisch angetriebenen Kleinwagen e.GO wurde die komplette Außenhaut in einer Kombination aus ein- und zweischaligen Thermofomteilen konzipiert. Die Anforderungen werden durch den Einsatz von coextrudiertem ABS – PMMA erfüllt. Für die Großserienproduktion wurde ein eigenes Produktionslayout entwickelt.

1. PARAT Gruppe – der Kunststoff Experte für Verkleidungsbauteile

PARAT ist ein global agierender Partner für hochfunktionale Verkleidungs- und Strukturbauteile aus Kunststoff mit einem diversifizierten Technologiespektrum: vom einfachen tiefgezogenen Formteil bis hin zu erstklassigen Composite-Systemkomponenten mit komplexen Geometrien. Dank hochmoderner Anlagen und exzellentem Fachpersonal bietet PARAT in allen Markt Bereichen die perfekte kundenspezifische Lösung an.

Als Entwickler neuer Produkte und Inhaber von über 200 Patenten bedient PARAT unterschiedlichste Märkte rund um den Globus.



KOFFER | LICHT | IT | TEXTIL

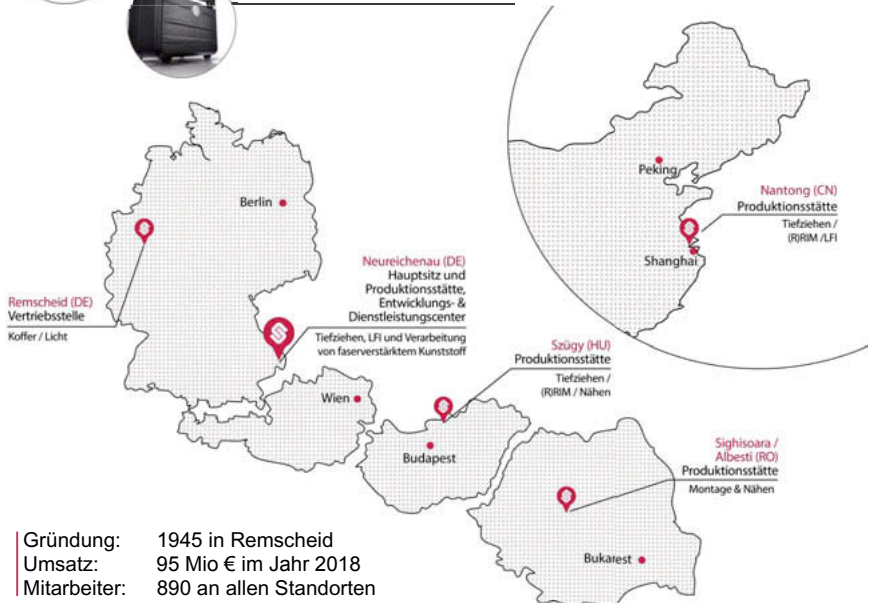


Bild 1: PARAT Standorte und Bereiche

Neben dem Hauptsitz im Niederbayerischen Neureichenau führt PARAT Produktionsstandort in Ungarn, Rumänien und China.

Dabei ist die Gruppe mit den Technologieschwerpunkten Thermoformen, Polyurethan Reaction Injection Molding (RIM) und Long Fibre Injection (LFI) hervorragend aufgestellt, um den Ansprüchen internationaler OEMs in den Markt Bereichen Baumaschinen, Landmaschinen, Caravan, Automobil, LKW sowie der New Mobility und Energie gerecht zu werden.



Bild 2: Die Marktbereiche des Kunststoffexperten PARAT: Baumaschinen, Landmaschinen, Caravan, Automobil, LKW und New Mobility und Energie.

PARAT unterstützt bei allen Aufgaben in den Projekten seiner Kunden, von den ersten Schritten der Entwicklungsphase bis hin zur finalen Produktion.

Als Systempartner bietet PARAT mit einem breiten Technologiespektrum einen auf das Produktkonzept perfekt abgestimmten Materialeinsatz, sodass optimale Wirtschaftlichkeit gewährleistet ist. Um darüber hinaus ein prozessoptimiertes Ergebnis zu erzielen, unterstützt PARAT den Kunden mit exklusivem Engineering und Entwicklungssupport im hauseigenen Entwicklungs- und Dienstleistungszentrum – von der Planungsphase bis zum fertigen Produkt.

2. Projektvorstellung e.GO

[1] Der e.GO Life ist ein bezahlbares Elektrofahrzeug für den Kurzstreckenverkehr. Gestartet als Entwicklungsprojekt auf dem RWTH Aachen Campus wurden Mitte 2019 die ersten Autos dieser Art ausgeliefert. Dabei setzten die Ingenieure auf eine kunststoffbeplante Fahrzeugkarosserie. Die großvolumigen Bauteile stellt der Kunststoffverarbeiter PARAT im Vakuum Thermoformverfahren her.

e.GO Life

**Ein Basisfahrzeug,
drei Fahrzeugklassen**
e.GO Life 20 | e.GO Life 40 | e.GO Life 60

Fünf Fahrzeugfarben
metallic rot | weiß | blau | anthrazit | silber

Fahrzeugleistung
20 / 40 / 60 kW

Fahrzeugeschwindigkeit
112 km/h bis 142 km/h

Fahrzeugreichweite
100 bis 145 km



Bild 3: e.GO Fahrzeugklassen

Was 2015 mit der Idee von Prof. Dr. Günther Schuh - einem bezahlbaren Elektroauto für den Stadtverkehr - begann, wird seit 2019 nun offiziell ausgeliefert. Die Rede ist vom Pkw e.GO Life, welcher in kompletter Eigenregie von der e.GO Mobile AG dank des Netzwerkes aus Wissenschaft und Wirtschaft auf dem RWTH Aachen Campus entwickelt und nun von der e.GO Mobile AG, Aachen, kommerzialisiert wurde. Die Mitarbeiter des Unternehmens nutzen dabei das Campus-Netzwerk mit seinen Forschungseinrichtungen über 400 Technologieunternehmen. In agilen Teams wurde und wird an verschiedenen kostengünstigen und kundenorientierten Elektrofahrzeugen für den Kurzstreckenverkehr gearbeitet. Die Serienproduktion des e.GO Life ist im März 2019 im neuen e.GO Werk in Aachen Rothe Erde angelaufen. Das Auto ist in drei Varianten, mit 14,5 kWh, 17,5 kWh oder 23,5 kWh Lithium-Ionen-Batterie erhältlich.

Der Systemlieferant PARAT fertigt für das e.GO Life-Elektrofahrzeug Karosserie-Verkleidungsbauteile im Tiefziehverfahren. Die Bauteile müssen rund 30 Normen erfüllen, um Eigenschaften wie Glanzgrade, UV- und chemische Beständigkeit, Farbqualität und Waschstraßenechtheit sicherzustellen.

3. Beständige Außenhaut zu überschaubarem Preis

Für das neue Elektroauto e.GO Life entwickelt und fertigt PARAT alle 54 Kunststoffverkleidungsteile der Karosserie, die in 16 Baugruppen geliefert werden.



Bild 4: Verkleidungsbaugruppen

Ziel des Projekts war eine beständige Außenhaut für das Fahrzeug zu einem kostengünstigen Preis zu entwickeln. Dazu kamen Herausforderungen wie spezielle Farbspezifikationen, Temperaturfestigkeit und sehr hohe Oberflächenqualität. Nach Tests und einer Machbarkeitsstudie entwickelte der Zulieferer gemeinsam mit dem Hersteller e.GO mobile AG die Außenhaut des Fahrzeugs. Prinzipiell bietet der eingesetzte Kunststoff mit einer Dichte von etwa 1 kg/dm^3 im Vergleich zu Stahl mit $7,8 \text{ kg/dm}^3$ deutliche Gewichtseinsparungen. Selbst mit der 4-fachen Wandstärke wären Bauteile im Vergleich zur Stahlbauweise immer noch nur halb so schwer. Insbesondere mit einer lastpfadgerechten Auslegung bzw. Dimensionierung der Bauteile in Kombination mit der eingesetzten Aluminium-Rahmenprofil-Bauweise wurde das Gewichtsziel erreicht, welches für moderne Elektrofahrzeuge von großer Bedeutung für die Reichweite beim Betrieb ist. Die tiefgezogene Kunststoffkarosserie ist nicht nur leichter, sondern bei den geplanten Jahresstückzahlen über den Zeitraum der gesamten Produktionsdauer (5 bis 6 Jahre, „life-time“-Produktion) auch kostengünstiger als die konventionelle Blechbauweise. Je nach Bauteil kosten die Thermoformwerkzeuge nur ca. 3 bis 5 % im Vergleich zu Blechumformwerkzeugen und etwa 10 bis 20 % im Vergleich zu Werkzeugen für die Kunststoff-Spritzgussverarbeitung. Zusätzlich entfallen beim Tiefziehen der aufwendige nachträgliche Grundierungsprozess von Stahlbauteilen sowie ein ebenfalls sehr energieintensiver Lackierprozess bei Stahl oder Spritzgussbauteilen. Aus diesem Grund bieten lackierte Spritzgussbauteile auch keinen großen Vorteil bei den eigentlichen Bauteilkosten. Die Gewinnschwelle für das Spritzgießen liegt bei einer Produktionsdauer des Fahrzeuges von etwa 5 bis 6 Jahren deutlich über 20 000 Fahrzeugen pro Jahr. Im Vergleich zur Stahlblechbauweise sicherlich deutlich über 40 000 Fahrzeugen pro Jahr.

Ein weiterer entscheidender Punkt waren die kurze Erstdauer und die einfache Modifikation von Thermoformwerkzeugen. Auf Basis des zu erfüllenden Anforderungskatalog wurden Bewertungskriterien aufgestellt nach denen die in Frage kommenden Fertigungstechnologien: Thermoformen, RIM Schäumen, LFI Schäumen und Spritzguss bewertet wurden.

4. Technologiebewertung

Tabelle 1: Technologiebewertung

BEWERTUNGSKRITERIEN	TF	RIM	LFI	Spritzguss
Zeitschiene	+	+	0	-
Änderungsfreundlichkeit	+	0	-	-
Mechanische Belastbarkeit	0	0	+	0
Oberflächenqualität	+	0	+	0
Prozesssicherheit / Reproduzierbarkeit	+	+	+	+
Oberflächenbeständigkeit (UV, Chemikalien, ...)	+	0	+	0
Designfreiheit des Bauteils (Komplexität der Außengeometrie)	+	+	+	+
Funktionsintegration auf der Innenseite	-	+	+	+
Wirtschaftlichkeit (10.000 Einheiten)	+	0	-	-
Leichtbau	+	0	-	+
Schadenstoleranz	+	0	+	0

In dem mit Abstand am besten bewerteten Thermoform-Verfahren werden coextrudierte Kunststoffplatten aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Polymethylmethacrylat (PMMA)-Schichten eingesetzt. Sie sind UV-beständig, bieten eine Class-A-Oberfläche und sind reparaturfreundlich sowie recyclingfähig.

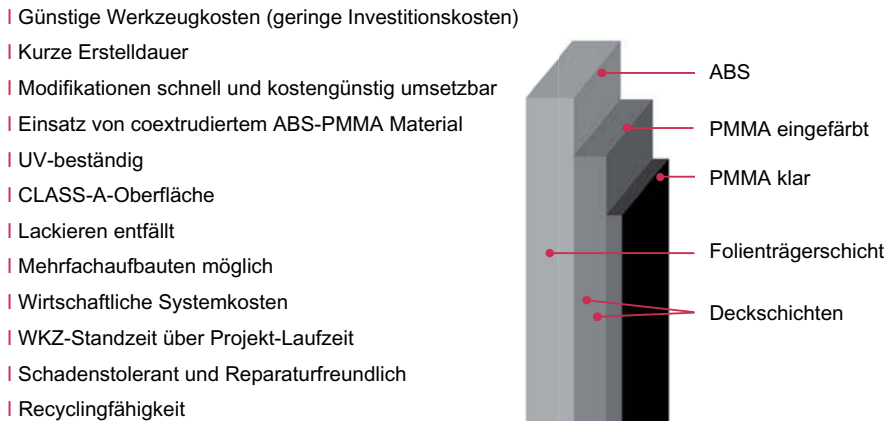


Bild 5: Vorteile Thermoformen, Folienaufbau

Kunststoffe können vergleichsweise einfach umgeformt werden. Eine zweischalige Ausführung mit Versteifungsstrukturen führt zu deutlich höheren Steifigkeiten. Die Elastizität der verwendeten ABS-PMMA-Platten verzeiht Bagatellschäden wie etwa Parkrempler ohne bleibende Verformung. Die Thermoform-Technologie eignet sich ideal für die Stückzahlen des e.GO Life.

Die Beplankung aus Kunststoff ist kratzfest, farbecht und zeigt optische Tiefenwirkung. Die Kunststoffbauteile für die Karosserie sind in metallischen Farbtönen durchgefärbt und werden mit dem tragenden Aluminium-Profilrahmen verklebt, verschraubt und per Clips befestigt. Unterschiedliche konstruktive Befestigungslösungen wurden entwickelt, um die Festigkeit, Toleranzen zum Aluminium- und Stahlrahmen, Crashfestigkeit, Abdichtungen und den Fußgängerschutz zu verbessern. Im Schadensfall sind die Bauteile einfach austauschbar.

Im Rahmen der Technologieauswahl wurde zusätzlich die CO₂-Emission unterschiedlicher Material-Konzepte untersucht. Betrachtet man den gesamten Entstehungsprozess einer normierten Verkleidungsfläche von 1 m² liegt die CO₂-Emission einer Kunststoffverkleidung bei circa der Hälfte im Vergleich zu einer Verkleidung aus Stahlblech.

5. Produktionslayout

Für die Produktion der kompletten e.GO Außenhaut wurde eine eigene Produktionslinie konzipiert und am Standort Neureichenau investiert.

Der erste Fertigungsschritt die Verformung des Halbzeuges erfolgt auf einer Vakuum-Thermoformanlage. Im nächsten Schritt werden die Außenkonturen und Durchbrüche durch CNC Fräsen erstellt. Die Montage der einzelnen Komponenten Baugruppen ist durch ein Puffer Lager von der Teilefertigung entkoppelt.



Bild 6: Produktionsprozess

Mit der Entwicklung einer kompletten thermogeformten Fahrzeug Außenhaut und der Umsetzung eines industriellen Serienfertigungs-Konzepts wurde der Nachweis angetreten, dass die Technologie Vakuum Thermoformen für spezielle Nischenmodelle auch für die automobiler Großserie angewendet werden kann.

e.GO Life

e.GO-AUSSENVERKLEIDUNG

Einschalige und/oder zweischalige Tiefziehteile mit maximal möglicher Systemintegration durch partielle Anbindungskonzepte



Bild 7: Fazit

Literaturangaben:

[1] auszugsweise aus Artikel: Mit Kunststoff auf der Überholspur aus der Zeitschrift Kunststoffe, Jahrgang 2019, Ausgabe 09, Seiten 188-189, Frank Peters und Georg Dutzi, © Carl Hanser Verlag GmbH & Co.KG, München

New solutions for e-mobility: thermally conductive thermoset plastics

Markus Walcher, Raschig GmbH, Ludwigshafen

Abstract

The number of electric cars is expected to increase sixfold by 2030. In order to meet growing requirements in the field of electrical engineering and electronics, new developments and materials are constantly gaining in importance. Epoxy resins (EP) play a major role in this, since applications of plastics for use in the automotive industry require high temperature resistance, good chemical resistance and hybridization possibilities on different materials and substrates.

Due to high cost pressure, efficient and economical processing is also a prerequisite for successful use.

These diverse and demanding requirements are met by thermoset molding compounds based on epoxy resins. This paper shows ways of using these materials for the automotive sector and also the electrified powertrain. The focus is in particular on the possibilities and opportunities for thermally conductive and at the same time electrically insulating compounds based on epoxy resin.

1. Introduction: thermosetting materials and their applications

Thermoset molding compounds are a group of plastics that crosslink from oligomeric resins during a chemical reaction in conjunction with a thermal input to form a macromolecule. The three-dimensional structure of the macromolecules prevents these material classes from melting, which means that they have a very good safety reserve even at extremely high temperatures above 250°C.

The crosslinking reaction takes place in the epoxy-resin-based thermoset compounds treated here during processing at temperatures of 150–180°C.

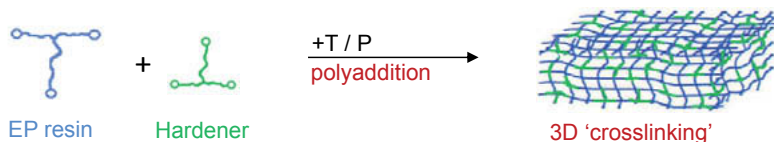


Fig. 1: Polyaddition of the oligomers to form the 3D macromolecule

The EP molding compounds are created by polyaddition, in which the active EP groups react stoichiometrically with hardener groups. No gaseous fission products are formed thereby, which makes for simple processing. This has the advantage that no gases need to be removed from the molds, thereby rendering the use of complex degassing concepts obsolete. EP molding compounds consist of an EP resin/hardener resin binder system to which 70–85 wt% fillers and reinforcing materials are added.

A targeted selection of fillers and reinforcing materials, which are coordinated in terms of type and quantity for the application in question, makes it possible to develop certain characteristics. Here the mechanical properties, isotropic/anisotropic behavior and electrical insulation properties can be set within a very broad framework. In applications involving the encapsulation of components, however, it is necessary to adjust the coefficient of linear expansion of the EP molding compound to the materials and substrates to be encased. The coefficient of linear expansion can thus be set to values of 15–25 ppm, which remain largely unchanged in the range extending from 60°C to the glass transition temperature, which is 165–180°C. But even in higher ranges up to temperatures beyond 250°C, these values remain very low. This is necessary to avoid any delamination occurring between the two substrates and to ensure the functionality of the components. In addition, the thermal conductivity can be adjusted and set individually by using the appropriate fillers.

EP molding compounds are generally used to coat sensitive electrical and/or electronic components. This coating or encapsulation ultimately serves to protect against harsh environmental conditions, such as are particularly prevalent in the automotive sector. Applications can be found here in the areas of the powertrain, transmission and elsewhere, in which the components must be hermetically encapsulated to protect them against aggressive automotive fluids so that they can permanently withstand temperatures from -60 to 200°C. These specific properties are required by, for example, speed and position sensors, media pumps based on BLDC technology as well as by control boards and are already established practice.



Fig. 2: AB Elektronik GmbH



Fig. 3: Wilo SE

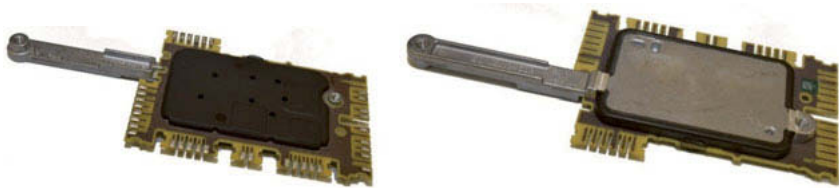


Fig. 4: Automotive control board

2. Realizable thermal conductivities and their limits

For many applications in the automotive sector and especially for the electrified powertrain, good thermal management is essential to protect parts and components from too high a temperature and to dissipate heat from the system. In the case of control boards, for example, heat such as that generated by MOSFETs and choke coils must be dissipated. Due to their compact design and high performance requirements, modern electric motors are particularly dependent on effective heat dissipation. The use of thermally conductive molding compounds therefore makes it possible to significantly improve their efficiency and thus the efficiency of the motor.

In comparison with known standard thermoplastics such as PA 66, PA 6, PBT, PPS etc. with a typical thermal conductivity of 0.2–0.3 W/m*K, standard, EP molding compounds with 0.4–0.6 W/m*K, whose thermal conductivity has not been modified, already show a thermal conductivity twice as high. If these are specifically prepared with various thermally conductive fillers, it is possible to increase the thermal conductivity of thermoset molding compounds up to 10 W/m*K without any problems. The compounds are electrically insulating and have dielectric strengths of 40–60 KV/mm. The materials are processed either by the classic injec-

tion-molding process or by the transfer press process. However, the method reaches its limits when a particularly large or extremely pressure-sensitive electrical or electronic components are encased with very highly thermally conductive, thermoset molding compounds. Here flow length decreases with increasing thermal conductivity and the injection pressure or cavity pressure required for filling increases.

A good compromise between the thermal conductivity achieved and good processing performance is found with materials of 2.5–4.0 W/m*K. For many applications, however, thermal conductivities of 1.0–2.5 W/m*K are sufficient, since a very small wall or insulation thickness of 0.2–1.0 mm does not demand higher thermal conductivities.

3. Low-pressure processing: injection molding or transfer molding

EP molding compounds are mainly processed by injection molding or transfer molding. Both of these methods are standard technologies that make a fully automated process possible. The processing takes place partly using molds with very high number of cavities – up to 32. Depending on the component, they are heated to temperatures of 150-180°C with corresponding curing times of 30–90 seconds. This fully automated processing technology with a large number of cavities and short cycle times has the decisive advantage that it makes extremely cost-effective processes possible.

EP molding compounds are often used to coat particularly pressure-sensitive components, since the use of extremely easy-flowing materials makes an internal mold pressure of <50 bar possible – and with the corresponding optimizations even <10 bar can be achieved. This does however call for the use of a cavity pressure sensor. In addition, the tool and cavity geometries must be designed rheologically using a filling simulation.

The processing sequence can basically be divided into three process phases:

- Injection
- Repacking
- Curing (and plasticizing for the next processing cycle)

It is recommended to switch from the injection profile to the holding pressure profile with the aid of a cavity pressure sensor. This process is also known as 'cavity-pressure-dependent switch-over'.

4. Applications of thermally conductive molding compounds: circuit board encapsulation and electric motors

Thermally conductive molding compounds have two main fields of application in the automotive sector:

1. Overmolding of control boards

With this method, the thermally conductive molding compounds are used for media-tight encapsulation of printed circuit boards. Here it is important to ensure that the boards are gently overmolded/encapsulated so that the components are not damaged during processing. Examples include electronic components such as MOSFETs, controllers, electrolytic capacitors, LEDs and HALL-effect cells. The EP molding compounds help prevent overheating of the components by dissipating temperature peaks to the heat sources, thereby protecting the entire component from being destroyed by overheating. In many cases the heat sources are only selectively very thin-walled with a coating thickness of 0.2–0.5 mm. In this case, thermally conductive EP molding compounds make the use of expensive additional processes such as thermally conductive pastes or metallic cooling-grid structures superfluous. Thermal conductivities of 1.0–3.0 W/m²K are used predominantly here. Another possibility is to heat the heat-generating components directly during encapsulation by using a thermoset cooling-grid structure molded in the injection-molding process.



Fig. 5: Raschig GmbH / INMAR Solutions

The boards correspond approximately in size to a DIN A4 sheet. In addition to the complete and all-round overmolding of the boards, overmolding on one side alone is also possible. Due to the good connection of the EP molding compounds to the FR4 circuit board material, to the applied solder mask and to the aluminum structures, media tightness is also secured here.

2. Use in electric motors

In the course of increasing electromobility, electric motors play a very important role in the automotive sector. In addition to media pumps such as oil and cooling water pumps, electrification in the powertrain means that EP molding compounds are also used for hybrid engines and the fully electric vehicle. Likewise there are applications here for rotors as well as for stators in classic commutator motors and also in brushless motors.

In rotor encapsulation, the application lies, for example, in the positionally accurate fixation and media-tight embedding of the permanent magnets. EP molding compounds are used for stators to deliver the basic insulation as a single yoke tooth, but also for complete encapsulations of the entire stator package. After winding, these stators are in some cases finally overmolded with thermoset EP molding compounds in order to fix the windings and winding heads. The more fully the individual winding layers are impregnated, the greater ultimately will be the heat dissipation and robustness of the motors.

With the stator encapsulation, the motor control board is also integrated, whereby the plug and the cable harnesses are encapsulated in a media-tight manner. In all of these processes, the best possible cooling of the engine components is sought.

The great advantage of thermally conductive EP-based thermoset molding compounds is found particularly in the following applications:

- Impregnation of the coils and windings
- Improvement of efficiency through high thermal conductivities
- Thin-walled overmoldings of the basic insulation, which increases heat dissipation
- The high temperature resistance permits applications for UL 1446 Class H (180°C)

In collaboration with PVS-Kunststofftechnik GmbH & Co KG Niedernhall, a demonstrator has been constructed for PIAE 2020 to illustrate the influence of molding compounds with different thermal conductivities and of the insulation thicknesses. This particular component is a stator's single tooth with a length of 105mm. It was encapsulated by the injection-molding process at Arburg GmbH and Co. KG Lossburg.

The following influencing factors were examined:

Different thermal conductivities of the EP molding compounds

- 0.5 W/m*K
- 1.2 W/m*K
- 2.5 W/m*K
- 4.0 W/m*K

The insulation thickness of the yoke tooth overmolding was

- 0.8 mm
- 0.5 mm
- 0.25 mm

The first step was to investigate the possibility of processing the different molding compounds with the different insulation thicknesses.

The overmolded yoke teeth were then wrapped and thermally examined by the Department of Plastics Technology in Erlangen. The first results show a significant influence of the examined parameters on the cooling behavior of the stator tooth.

The detailed results will be presented at the PIAE conference on March 25th and 26th 2020 in Mannheim.

Summary

The investigation shows that thermoset molding compounds based on EP resins have a wide range of possibilities for use in the automotive sector and thereby deliver clear advantages:

1. Due to the enormous adaptability of the formulations resulting from the different compositions of the fillers and reinforcing materials, excellent properties can be achieved for specific requirements.
2. Modern processes and a rheological design through simulations ensure cost-efficient processing.
3. Multi-cavity molds and short cycle times also improve profitability.
 - a. From the available results it is clear that thermally conductive molding compounds enable innovative solutions for control boards and motors, especially for the electrified powertrain.

Neue Lösungen für E- Mobilität

Thermisch leitfähige duroplastische Kunststoffe

Markus Walcher, Raschig GmbH, Ludwigshafen

Kurzfassung

Die Zahl der Elektroautos soll bis 2030 auf das Sechsfache ansteigen. Um die wachsenden Anforderungen im Bereich der Elektrotechnik und Elektronik zu erfüllen, gewinnen neue Entwicklungen und Werkstoffe laufend an Bedeutung. Eine tragende Rolle nehmen dabei Epoxidharze (EP) ein, denn Anwendungen von Kunststoffen zur Verwendung in der Automobilindustrie fordern hohe Temperaturbeständigkeiten, gute Chemikalienresistenzen und Hybridisierungsmöglichkeiten an unterschiedlichen Werkstoffen und Substraten.

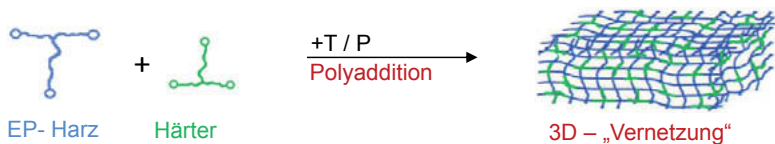
Aufgrund des hohen Kostendrucks ist zudem eine effiziente und wirtschaftliche Verarbeitung Grundvoraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz.

Diese vielfältigen und anspruchsvollen Anforderungen erfüllen duroplastische Formmassen auf Basis von Epoxidharzen. Der nachfolgende Artikel zeigt Möglichkeiten zur Verwendung dieser Materialien für den Automobilsektor sowie den elektrifizierten Antriebsstrang. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf den Möglichkeiten und Chancen wärmeleitfähiger und zugleich elektrisch isolierender Compounds auf Basis von Epoxidharz.

1. Einführung: Duroplastische Werkstoffe und deren Anwendungen

Duroplastische Formmassen sind eine Gruppe von Kunststoffen, die sich aus oligomeren Harzen während einer chemischen Reaktion in Verbindung mit Wärme zu einem Makromolekül vernetzen. Der dreidimensionale Aufbau der Makromoleküle verhindert ein Aufschmelzen dieser Werkstoffklassen, wodurch diese auch bei extrem hohen Temperaturen von $>250^{\circ}\text{C}$ eine sehr gute Sicherheitsreserve aufweisen.

Die Vernetzungsreaktion findet bei den hier behandelten epoxidharzbasierten duroplastischen Formmassen während der Verarbeitung bei Temperaturen von $150\text{--}180^{\circ}\text{C}$ statt.



Graphik 1: Polyaddition der Oligomere zum 3D-Makromolekül

Die Herstellung der EP-Formmassen erfolgt durch Polyaddition, bei der stöchiometrisch die aktiven EP-Gruppen mit Härtergruppen reagieren. Dabei werden keinerlei gasförmige Spaltprodukte gebildet, was eine einfache Verarbeitung ermöglicht. Das hat den Vorteil, dass keine Gase aus den Werkzeugen abgeführt werden müssen, wodurch die Anwendung komplexer Entlüftungskonzepte hinfällig wird.

EP-Formmassen bestehen aus einem EP-Harz/Härterharzbindersystem, zu dem 70–85 Gew.% Füll- und Verstärkungsstoffe hinzugefügt werden.

Durch eine gezielte Auswahl an Füll- und Verstärkungsstoffen, die für die jeweilige Anwendung in Art und Menge abgestimmt werden, lassen sich bestimmte Merkmale ausbilden. Dabei können die mechanischen Eigenschaften, das isotrope/anisotrope Verhalten sowie die elektrischen Isolationseigenschaften in einem sehr weiten Rahmen eingestellt werden. Bei Anwendungen zur Umhüllung von Komponenten ist es allerdings erforderlich, den Längenausdehnungskoeffizient der EP-Formmasse auf die zu umhüllenden Werkstoffe und Substrate anzupassen. So lässt sich der Längenausdehnungskoeffizient auf Werte von 15–25 ppm einstellen, die im Bereich von -60°C bis zur Glasübergangstemperatur, welche bei 165–180°C liegt, weitestgehend unverändert bleiben. Aber auch in höheren Bereichen bis zu Temperaturen von >250°C bleiben die Werte weiterhin sehr niedrig. Das ist notwendig, damit es zu keiner Delamination zwischen den beiden Substraten kommt und die Funktion der Bauteile sichergestellt ist. Außerdem lässt sich die Wärmeleitfähigkeit durch Verwendung von entsprechenden Füllstoffen anpassen und individuell einstellen.

Grundsätzlich werden EP-Formmassen eingesetzt, um empfindliche elektrische und/oder elektronische Komponenten zu umhüllen. Diese Umhüllung bzw. Einkapselung dient letztendlich dem Schutz vor harschen Umweltbedingungen, wie sie besonders im Automobilsektor vorliegen. Anwendungen finden sich hier unter anderem im Bereich Powertrain und Transmission, bei denen die Komponenten zum Schutz gegen aggressive automobiler Flüssigkeiten hermetisch eingekapselt werden müssen, um Temperaturen von -60 bis 200°C dauerhaft standzuhalten. Diese spezifischen Eigenschaften sind beispielsweise bei Drehzahl- und Positionssensoren, Medienpumpen auf BLDC Technologie sowie Steuerplatinen erforderlich und bereits eine etablierte Praxis.



Bild 1: AB Elektronik GmbH



Bild 2: Wilo SE

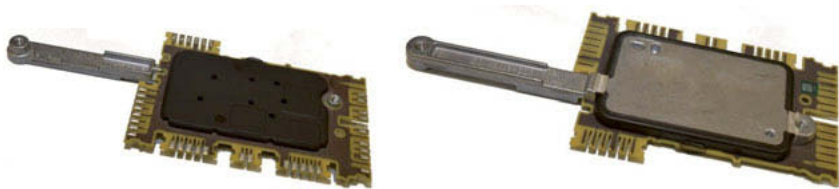


Bild 3: Steuerplatine Automotive

2. Realisierbare Wärmeleitfähigkeiten und deren Grenzen

Für viele Anwendungen im Automobilbereich und insbesondere für den elektrifizierten Antriebsstrang ist ein gutes Thermomanagement unerlässlich, um Bauteile und Komponenten vor einer zu hohen Temperatur zu schützen und Wärme aus dem System abzuführen. So muss bei Steuerplatinen zum Beispiel Wärme, wie sie von MOSFETs und Drosselspulen erzeugt wird, ausgeleitet werden. Moderne Elektromotoren sind aufgrund ihrer kompakten Bauweise bei gleichzeitig hohen Leistungsanforderungen im besonderen Maß auf eine effektive Wärmeabfuhr angewiesen. Der Einsatz von wärmeleitfähigen Formmassen ermöglicht also, den Wirkungsgrad und somit die Effizienz des Motors signifikant zu verbessern.

Im Vergleich zu den bekannten Standardthermoplasten wie PA 66, PA 6, PBT, PPS etc. mit einer typischen Wärmeleitfähigkeit von 0,2–0,3 W/m*K zeigen standardmäßige, nicht wärmeleitfähig modifizierte EP-Formmassen mit 0,4–0,6 W/m*K schon eine doppelt so hohe Wärmeleitfähigkeit. Werden diese zusätzlich mit verschiedenen wärmeleitfähigen Füllstoffen gezielt aufbereitet, ist eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von duroplastischen Formmassen auf bis zu 10 W/m*K problemlos möglich. Die Compounds sind dabei elektrisch isolierend und besitzen elektrische Durchschlagsfestigkeiten von 40–60 KV/mm. Die Verarbeitung der Materialien erfolgt entweder im klassischen Spritzgießprozess oder im Transferpressverfahren. Bei

einer Umhüllung von besonders großen oder extrem druckempfindlichen elektrischen bzw. elektronischen Komponenten mit sehr hoch wärmeleitfähigen, duroplastischen Formmassen stößt das Verfahren jedoch an Grenzen. So nimmt mit steigender Wärmeleitfähigkeit die Fließlänge ab und der zum Füllen notwendige Spritzdruck bzw. Werkzeuginnendruck steigt an. Ein guter Kompromiss zwischen der erzielten Wärmeleitfähigkeit und einer guten Verarbeitungsperformance wird mit Materialien von 2,5–4,0 W/m²K erreicht. Für viele Anwendungen reichen jedoch Wärmeleitfähigkeiten von 1,0–2,5 W/m²K aus, da eine sehr geringe Wand bzw. Isolationsstärke von 0,2–1,0 mm keine höheren Wärmeleitfähigkeiten erfordert.

3. Niederdruckverarbeitung: Spritzgießen oder Transferpressen

EP-Formmassen werden überwiegend im Spritzgieß- oder im Transferpressverfahren verarbeitet. Beide Methoden sind Standardtechnologien, die einen vollautomatischen Prozess ermöglichen. Die Verarbeitung erfolgt zum Teil auf Werkzeugen mit sehr hohen Kavitäten von bis zu 32. Je nach Bauteil werden sie auf Temperaturen von 150–180°C erhitzt mit entsprechenden Aushärtezeiten von 30–90 Sekunden. Diese vollautomatisierte Verarbeitungstechnologie mit hohen Kavitätenzahlen und kurzen Zykluszeiten hat den entscheidenden Vorteil, dass sie äußerst wirtschaftliche Prozesse ermöglicht.

EP-Formmassen werden häufig genutzt, um besonders druckempfindliche Bauteile zu umhüllen, da die Verwendung extrem leichtfließender Materialien einen Werkzeuginnendruck von <50 bar möglich macht – mit entsprechenden Optimierungen sind sogar <10 bar zu erreichen. Hierfür ist jedoch die Verwendung eines Werkzeuginnendruckensensors notwendig. Außerdem müssen die Werkzeug- und Kavitätengeometrien rheologisch mithilfe einer Füllsimulation ausgelegt werden.

Der Bearbeitungsprozess lässt sich grundsätzlich in drei Prozessphasen unterteilen:

- Das Einspritzen
- Das Nachverdichten
- Das Aushärten (und Plastifizieren für den nächsten Bearbeitungszyklus)

Es ist zu empfehlen, mit einem Werkzeuginnendruckensensor vom Spritzprofil auf das Nachdruckprofil umzuschalten. Dieser Prozess wird auch als „werkzeuginnendruckabhängiges Umschalten“ bezeichnet.

4. Anwendungen der wärmeleitfähigen Formmassen: Platinenverkapselung und E-Motoren

Wärmeleitfähige Formmassen haben im Automobilbereich zwei wesentliche Anwendungsfelder:

1. Umspritzung von Steuerplatinen

Bei dieser Methode dienen die wärmeleitfähigen Formmassen zur mediendichten Einkapselung von bestückten Platinen. Dabei ist es wichtig, auf eine schonende Umspritzung/Umpressung der Platinen zu achten, damit die Komponenten bei der Verarbeitung keinen Schaden nehmen. Als Beispiele hierfür sind elektronische Komponenten wie MOSFETs, Controller, Elektrolytkondensatoren, LEDs und HALL-Effekt-Zellen zu nennen. Die EP-Formmassen helfen dabei, eine Überwärmung der Komponenten zu verhindern, indem sie die Temperaturspitzen an die Wärmequellen abführen, wodurch sie das gesamte Bauteil vor Zerstörung durch Überhitzung schützen. Häufig werden die Wärmequellen nur selektiv sehr dünnwandig mit einer Umhüllungsstärke von 0,2–0,5 mm umhaust. In diesem Fall machen wärmeleitfähige EP-Formmassen den Einsatz teurer Zusatzprozesse wie Wärmeleitpasten oder metallische Kühlgitterstrukturen überflüssig. Überwiegend kommen hier Wärmeleitfähigkeiten von 1,0–3,0 W/m²K zur Verwendung. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die wärmeerzeugenden Komponenten mit einer im Spritzgießprozess abgeformten duroplastischen Kühlgitterstruktur direkt bei der Umhüllung zu entwärmen.



Bild 4: Raschig GmbH / INMAR Solutions

Die Platinen entsprechen in etwa der Größe eines DIN A4-Blattes. Neben der kompletten und allseitigen Umspritzung der Platinen ist auch eine einseitige Umhüllung möglich. Aufgrund der guten Anbindung der EP-Formmassen an das FR4-Leiterplattenmaterial, dem aufgetragenen Lötstopplack und den Aluminiumstrukturen, ist auch hier die Mediendichtigkeit gegeben.

2. Verwendung in E-Motoren

Im Zuge der zunehmenden Elektromobilität spielen elektrische Motoren eine sehr wichtige Rolle im Automobilbereich. Neben Medienpumpen wie Öl- und Kühlwasserpumpen werden auch EP-Formmassen durch die Elektrifizierung im Antriebsstrang sowohl für Hybridmotoren als auch für das vollelektrische Fahrzeug verwendet. Anwendungen gibt es hier gleichermaßen für Rotoren wie auch bei Statoren in klassischen Kommutatormotoren sowie in bürstenlosen Motoren.

Bei der Rotorumspritzung liegt der Einsatz z. B. in der positionsgenauen Fixierung und mediendichten Einbettung der Permanentmagneten. Für Statoren werden EP-Formmassen zur Herstellung der Basisisolation als einzelner Jochzahn, aber auch für Komplettumspritzungen des gesamten Statorpaketes eingesetzt. Nach der Wicklung werden diese Statoren zum Teil noch final mit duroplastischen EP-Formmassen umspritzt, um eine Fixierung der Wicklungen und Wickelköpfe zu erreichen. Je vollflächiger die einzelnen Wicklungslagen imprägniert werden, desto höher ist letztendlich die Wärmeabfuhr und Robustheit der Motoren.

Mit der Statorumspritzung erfolgt zudem eine Integration der Motorsteuerplatine, wodurch Stecker und Kabelstränge mediendicht umspritzt werden. Bei all diesen Verfahren wird eine möglichst gute Entwärmung der Motorkomponenten angestrebt.

Der große Vorteil wärmeleitfähiger EP-basierter duroplastischer Formmassen liegt insbesondere in folgenden Anwendungen:

- Imprägnierung der Spulen und Wicklungen
- Verbesserung des Wirkungsgrats durch hohe Wärmeleitfähigkeiten
- Dünnwandige Umspritzungen der Basisisolation, wodurch eine Erhöhung der Wärmeabfuhr erreicht wird
- Die hohe Temperaturbeständigkeit erlaubt Anwendungen für UL 1446 Class H (180°C)

Zur Darstellung des Einflusses von Formmassen mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten sowie der Isolationsstärken wurde für die PIAE 2020 gemeinsam mit der Firma PVS-Kunststofftechnik GmbH & Co. KG Niedernhall ein Demonstrator aufgebaut. Bei dem Bauteil handelt es sich um einen Statoreinzelzahn mit einer Länge von 105 mm. Die Umspritzung erfolgte im Spritzgießverfahren bei der Fa. Arburg GmbH und Co. KG Lossburg.

Hierbei wurden folgende Einflussgrößen untersucht:

Verschiedene Wärmeleitfähigkeiten der EP Formmassen

- 0,5 W/m*K
- 1,2 W/m*K
- 2,5 W/m*K
- 4,0 W/m*K

Die Isolationsstärke der Umhüllung des Jochzahns betrug

- 0,8 mm
- 0,5 mm
- 0,25 mm

Der erste Schritt bestand in der Untersuchung, welche Möglichkeit der Verarbeitung der unterschiedlichen Formmassen mit den unterschiedlichen Isolationsstärken besteht.

Anschließend wurden die umspritzten Jochzähne umwickelt und vom Lehrstuhl für Kunststofftechnik Erlangen thermisch untersucht. Erste Ergebnisse zeigen einen signifikanten Einfluss der untersuchten Kenngrößen auf das Entwärmungsverhalten des Statorzahns.

Die ausführlichen Ergebnisse werden auf der PIAE Tagung am 25. und 26. März 2020 in Mannheim vorgestellt.

Kurzfassung

Die Untersuchung verdeutlicht, dass duroplastische Formmassen auf Basis von EP-Harzen vielfältige Möglichkeiten zur Anwendung im Automobilsektor aufweisen und dabei klare Vorteile transportieren:

- 1) Aufgrund der enormen Anpassungsfähigkeit der Rezepturen durch unterschiedliche Zusammensetzungen der Füll- und Verstärkungstoffe lassen sich ausgezeichnete Eigenschaften für die spezifischen Anforderungen erzielen.
- 2) Moderne Verfahren und eine rheologische Auslegung durch Simulationen gewährleisten eine kosteneffiziente Verarbeitung.
- 3) Mehrkavitätenwerkzeuge und kurze Zykluszeiten verbessern zudem die Wirtschaftlichkeit.

Aus den vorliegenden Ergebnissen wird deutlich, dass wärmeleitfähige Formmassen insbesondere für den elektrifizierten Antriebsstrang innovative Lösungen für Steuerplatinen und Motoren ermöglichen.

Emissions and odor under control

Thermoplastic elastomers for the vehicle interior

Dipl.-Ing. **Florian Vetter**,
Product Development Automotive, Waldkraiburg

Abstract

Sensitivity to emissions in automotive interiors has been a topic since the early 1980s. In order to do justice to the subject of emissions and odor in the automotive sector, KRAIBURG TPE started a project some years ago aimed at obtaining a deep understanding of the influencing factors relating to interior materials.

Emission measurement and odor assessment of materials is a very complex challenge for all parties involved in the value chain. One of the fundamental findings of KRAIBURG TPE's work is that the results of the various tests do not permit any correlation between emissions and odor. Furthermore, the sample history is of decisive importance to the reproducibility and comparability of different measurement results.

In close cooperation with the independent testing institute imat-uve, the influencing factors in the area of emission and odor have been worked out and KRAIBURG TPE's portfolio for automotive interiors tested under standardized test conditions. Interior materials from KRAIBURG TPE's production locations in Germany, the USA and Malaysia were tested. The imat-uve test sites in Germany and China were also compared.

KRAIBURG TPE takes a holistic approach to emissions and odors. This ranges from the analysis of raw materials to the consistent, controlled production of compounds worldwide, to processing at the customer's location and approval by the automobile manufacturer in question. Based on this detailed analysis, KRAIBURG TPE knows both the emission and odor level of the raw materials it uses as well as the optimal process settings for the production of the TPS materials.

With regard to the portfolio for the automotive interior, existing series were optimized. Furthermore, the knowledge generated was used to develop a new, customized TPS series

(FG/SF series). Technical limits were explored with the development of a 'super-low-emission compound'.

The knowledge gained can be used specifically in automotive interior projects to support and efficiently advise customers and automobile manufacturers.

1. Emissions and odor under control

Sensitivity to emissions in automotive interiors has been a topic since the early 1980s. This was triggered in particular by the formation of undesirable condensate on the inside of the windshields of new cars. As a result, the focus was initially on compliance with fogging values. Over time, the requirements for interior components have been expanded and differentiated. Various analytical test standards gradually emerged to ensure compliance with emissions. The topic of odor is playing an increasingly important role for automobile manufacturers as well as for end customers. The general opinion at conferences and meetings about regional differences on the subject of odor coincides with experiences in-house at KRAIBURG TPE. While odor or requirements for no odor at all has top priority in Asia, in Europe the focus is more on individual substances and the total emissions in the vehicle. In North America, however, this dynamic is currently still limited.

Thermoplastic elastomers (TPE) have undergone rapid development since the 1990s due to their material properties, their versatility and their economic processability. This can be seen in a large number of applications, including components in the vehicle interior. Consequently, it has been important for KRAIBURG TPE to be able to meet the requirements of the automobile manufacturers. A project group was founded more than three years ago in order to gain extensive know-how about the emission and odor values of interior materials and to gain a deep understanding of their influencing factors.

2. The complex challenge of emission measurement and odor assessment

Testing of the emission behavior of materials differs significantly from the determination of typical material data such as mechanical parameters. In addition to various standards, such as DIN or VDA methods, there are a large number of standards from automobile manufacturers, some of which are very similar. There are more than 15 corporate standards for determining fogging behavior alone, but they are all heavily based on DIN 75201. In addition to the large number of similar methods, it is important to take into account that, depending on the measurement set-up, emission tests come up with different compositions of emitted sub-

stances. Dynamic thermal desorption according to VDA 278, static headspace analysis according to VDA 277 and the various chamber tests of ISO 12219 versions cannot be compared with each other, nor should the test values be converted in any way. Supposedly similar test methods often differ in the type of conditioning, test temperatures or test times, which rules out comparing the results. In some tests, the calibration of the devices and the taking of samples also play a decisive role and have a major influence on the measurement results.

Even more critical than the measurement of emissions is the assessment of odor. All previous efforts to replace the purely subjective, human perception of odor with other, more objective methods have so far had little success. In the assessment by trained evaluation panels, according to, for example, VDA 270, the situation remained unchanged. Despite intensive training and a precise selection of test subjects, there may be significant differences in odor assessment. It is not uncommon for different odor ratings to be recorded for the same sample in different laboratories or at different automobile manufacturers. This can partly be explained by regional and gender-specific differences in odor perception. A further complicating factor in qualifying TPE for the automotive interior is the fact that automobile manufacturers do not work with the same specifications.

One of the fundamental findings of KRAIBURG TPE's work is that the results of the various tests do not permit any correlation between emissions and odor. It is not advisable to draw any conclusions from emission results and apply them to odor results or vice versa. However, they have one major aspect in common, namely the dependence of emission and odor results on the sample history. In addition to the choice of test method, this plays a central role and since January 2019 has been regulated in DIN ISO 12219-8. To enable results to be compared, the following questions must be asked: Are measurements being carried out on plastic granules, sample panels, individual components or component groups? How is the sample packaged, how was it stored and under what conditions was it processed into a sample or component? The reproducibility and comparability of the measurement results therefore essentially depends on the sample history as well.

3. Bundled competence: imat-uve and KRAIBURG TPE

A few years ago, KRAIBURG TPE decided to fully penetrate the issue of emissions and odors in the automobile interior. Due to its complexity, the decision was made to work with an external partner. Together with the independent testing institute imat-uve, the subject was radically examined and analyzed. imat-uve is an innovative development and engineering

company that also supports its customers along the entire process chain. This includes project identification, design and development up to and including the testing of materials, components and systems. Cooperation between imat-uve and KRAIBURG TPE made it possible to make a holistic examination of the effects of emissions and odors from a material and processing perspective, as well as from that of the measuring equipment and methods. The results and findings were a win-win situation for both companies.

The technical expertise of imat-uve was and is essential, especially when interpreting complex tests or test results. In this way, effective solutions can be found and incorrect interpretations can be excluded. In close cooperation with imat uve, the influencing factors in the area of emissions and odor were worked out and the special TPE portfolio was tested under standardized test conditions. Materials from all of KRAIBURG TPE's production locations in Germany, the USA and Malaysia were compared. The imat-uve test sites in Germany and China were also compared.

In addition to generating well-founded emission data for KRAIBURG TPE interior materials, this collaboration also resulted in a deep understanding of various test methods and test results in combination with the raw materials used.



Fig. 1: Possible TPE applications in the automotive interior

A well-founded practical knowledge of the emission and odor behavior of thermoplastic elastomers for vehicle interior applications (Fig. 1) was secured. In addition to safe products for the interior, targeted customer advice in this complex subject area is a real added value that can save time and costs.

4. Analysis of all influencing factors

An important result of the work is that the emission and odor levels of the raw materials used for a TPE material and the components made from it can change along the entire value chain. This means that everyone has a great responsibility, from the TPE producer to the component supplier, but also including the test laboratories of the automotive companies that perform the approval process. Only with this awareness along the supply chain can high-quality materials with low emission and odor levels be reliably provided.

For KRAIBURG TPE it is therefore the holistic approach that counts. This ranges from the analysis of the raw materials to the globally uniform, controlled manufacture of the compounds at three production locations, to processing at the customer and approval by the automobile manufacturer in question.

5. Influence of the raw material

KRAIBURG TPE materials for automotive interior applications are largely TPS, thermoplastic elastomers based on styrene block copolymers (SBC). TPS are compounds and consist of raw material mixtures of various substances such as elastomers (SEBS), thermoplastics (PP), fillers, colorants and stabilizers. Each of these raw materials has its own specific properties and influences the emission and odor behavior of the finished TPS compounds. In a first step, the individual raw materials were analyzed in order to be able to come to conclusions about the finished TPS compound. Styrene block copolymers and polypropylene, but also the colorants used, have a significant influence. On the basis of this in-depth analysis, KRAIBURG TPE now has a detailed knowledge of the emission and odor levels of its raw materials.

There are thus clear differences in the emission measurements of different styrene-ethylene-butadiene-styrene (SEBS) and polypropylene (PP) types in the micro-chamber according to ISO 12219-3. With the right choice of SEBS in the TPS compound, the total carbon emission (TVOC) and also the styrene emission of the TPS material can be significantly influenced. Even the PP used has an influence on the TVOC value. Critical substances such as formaldehyde or aromatic hydrocarbons such as benzene, toluene, xylene and ethylbenzene (summarized as BTXE) can be determined in the micro-chamber, but in the TPS materials from KRAIBURG TPE are generally low.

Table 1: Emission values of various raw materials measured with the granules according to ISO 12219-3

Test	ISO 12219-3 micro-chamber		
	TVOC	Styrene	BTXE
Unit	$\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{h}$	$\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{h}$	$\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{h}$
SEBS 1	8.910	29	81
SEBS 2	27.800	4.920	451
PP 1	11.500	<10	17
PP 2	4.350	<10	<10

In general, KRAIBURG TPE focuses on SBC raw materials that contain almost no free monomeric styrene. Above a styrene content of 1%, a mixture is subject to labeling as a hazardous substance. The traces of residual monomeric styrene in the SBC raw materials used are

typically 0.0001% (1 ppm) and are thus a ten-thousandth of the proportion subject to labeling requirements as a hazardous substance. The use of almost styrene-free SBC raw materials results in very pure TPS finished products, as can be seen from Table 2. Only rarely can styrene be detected; the measured proportions are far below the specified limits.

Table 2: Styrene content in TPS compounds according to ISO 12219-4 and VDA 278, limit values from DBL 5430 (2017-12)

Method	Limit	Styrene content in TPS compounds			
		TC6COZ	TC7MLB	TC6MLB	TC6GPN
ISO 12219-4 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	≤ 100	4	12	2	n.d.*
VDA 278 in $\mu\text{g}/\text{g}$	≤ 8	n.d.*	n.d.*	n.d.*	n.d.*

In addition, various SEBS and PP types were also tested in accordance with VDA 278, VDA 270 and DIN 75201-B (see Table 3). These methods form part of many specifications of major automobile manufacturers.

In VDA 278 the polymeric components of the TPS differ significantly in some cases. In terms of fogging behavior, SEBS performs better than PP. In odor according to VDA 270 B-3 it is striking that both PP types have an odor rating of 4.0. The production method of the PP types plays a crucial role here, which has a major influence on both performance and price. No odor was determined for the SEBS raw materials, since they cannot be processed as a pure polymer. An assessment of the powdery individual raw material makes little or no sense due to its open-pore structure.

Table 3: Emission values of raw materials measured with the granules according to VDA 278, DIN 75201-B and VDA 270 B-3

Test	VDA 278		DIN 75201-B	VDA 270 B-3
	VOC	Fogging	Fogging	Odor
Unit	µg/g	µg/g	mg	Rating
SEBS 1	464	260	< 0.2	-
SEBS 3	459	44	< 0.2	-
PP 3	226	548	1.5	4.0
PP 4	190	428	1.4	4.0

6. Influence of the compounding process

In addition to the raw materials used for a TPS compound, which usually have the greatest influence on the level of odor and emissions, the compounding process also plays an important role. During compounding, the different raw materials are mixed homogeneously under the influence of shear and temperature, thereby creating a TPS compound. This is typically performed in twin-screw extruders. Ideally, there is no chemical reaction with TPS compounds. However, with a high energy input during compounding, undesired chemical reactions and thus sources of emissions and odors can never be completely ruled out. This finding is also applicable to other TPE classes. Odor and emission levels can be influenced both positively and negatively by the system configuration and the process parameters.

The challenge for a TPS producer is to find the optimal process setting for each specific formulation in combination with the best raw materials and at the same time to deliver all of the material properties required. KRAIBURG TPE has been working intensively on this task in recent years and it has been possible to identify key influencing factors and parameters. Based on this know-how, a market-oriented portfolio for interior applications has been developed at KRAIBURG TPE. In addition to the optimization of existing series, the knowledge generated was used to develop a new, tailor-made TPS series (FG/SF series) especially for the automotive interior.

Table 4 serves to illustrate the effects of throughput and energy input on a typical TPS material for the automotive interior. A lower throughput has a positive influence on emissions (VDA 278 and VDA 277) and odor (VDA 270 B-3) for the material examined. It should be

mentioned that the measurement tolerance of the olfactory method should be assessed at least half an odor grade.

The energy input that affects raw materials during production has a significant influence on the emission behavior. It is important to note here that the raw materials used in the compound to be produced are damaged as little as possible during production and that degradation is avoided. Increasing the energy input reduces the emission level measured according to VDA 278 and VDA 277. Although the fluctuation in the fogging value is within the range of fluctuation of the measuring instrument, these values in combination with the other results do indicate a clear tendency regarding the influence of certain process parameters.

Table 4: Influence of process parameters in compounding on emission and odor behavior

Influence of the compounding process	VDA 278	VDA 278	VDA 277	VDA 270	DIN 75201-B
	VOC	Fogging	VOC	B-3	Fogging
Unit	µg/g	µg/g	µgC/g	Rating	mg
Standard parameters	66	793	0.6	3.0	0.26
Throughput↓	29	751	0.3	2.5	0.25
Throughput↑	111	969	2.4	3.0	0.57
Energy input↓	135	859	1.8	2.5	0.46
Energy input↑	34	807	0.4	3.0	0.36

7. Influence of the processing process

Another influencing factor for a low-emission and low-odor component is the manufacturing process of the component, in the case of TPE materials this often being the injection-molding process. Similar to the compounding process, the selected processing parameters play a decisive role here too. Until now the main focus of the processors of TPE compounds has mostly been on the visual quality of the component. The influence on emission and odor levels is often neglected or underestimated and only recognized in subsequent investigations. In this case too, the sample history once again plays a decisive role. Here KRAIBURG TPE can support its customers with recommendations and empirical values regarding processing. In order to achieve the best possible emission and odor behavior of the component, certain temperature settings, dwell times and shear rates should be observed, for example.

8. Tested and qualified vehicle-interior portfolio from KRAIBURG TPE

KRAIBURG TPE offers various product series for automotive interiors that meet the requirements of most automobile manufacturers in terms of emission and odor behavior. Its globally available portfolio includes compounds suitable for multi-component injection molding. There are thus tailor-made series with adhesion to various thermoplastics such as PP, PC, ABS and PA.

Table 5: Overview of KRAIBURG TPE's automotive interior portfolio

Series	Type designation	Description
GP/FG	TC5GPZ to TC8GPZ	Universal application Adhesion to PP
FG/SF	TC5FEZ to TC8FEZ	Improved surface reproduction Odor-optimized with adhesion to PP
AD1	TC5MLZ to TC8MLZ	Adhesion to polar thermoplastics such as PC, ABS, ASA, SAN
AD/PA	TC5PAZ to TC8PAZ	Adhesion to PA6, PA66, PA12
VS/AD/HM	TC6CEZ to TC8CEZ	Improved wear properties Adhesion to PC, ABS, ASA, SAN, PA6, PA12

During the course of the project the interior materials from German, Malaysian and US production and available globally from all production locations were tested at imat-ue in Germany and China in accordance with VDA 278 and VDA 270 B-3. Hardnesses of 50, 60, 70 and 80 Shore A (ShA) were tested for each product series. All tests were carried out on test panels that were manufactured in-house using a standardized injection-molding process. The samples were mailed out in standardized, emission-free sample bags. The samples were conditioned exclusively by imat-ue test laboratories. In this way, the same sample history was adhered to in order to ensure the comparability and reproducibility of the results.

The overview of the VDA 278 and VDA 270 B-3 tests in Table 6 shows the results for all product series. In general, all interior product lines from the three KRAIBURG TPE production locations meet the emission behavior requirements of most automobile manufacturers. The minimum and maximum emission and odor values within the product series are given. At first glance, the differences appear to be relatively large, but are nevertheless very satisfacto-

ry in view of the fact that there are different production locations, hardness settings and colors (black and natural colors), since even the maximum values are below the current emission limit values required by automobile manufacturers.

Odor ratings of 3.0 or 3.5 are usually found to be good while an odor rating of 4.0 and higher is rather critical. The odor behavior of materials largely depends on the formulation and thus on the raw materials it contains. Of particular note is the newly developed FG / SF series, which is surface- and odor-optimized and has been consistently rated at 3.0 by imat-uve across all hardness levels. With all evaluations and test results of the TPS compounds it should not be forgotten that the final component size always plays an important role – for example, an instrument panel has a much larger share of the total odor level in the interior than have storage mats or control wheels.

Table 6: Overview of KRAIBURG TPE's interior portfolio

Test		VDA 278	VDA 278	VDA 270 B-3
		VOC	Fogging	Odor
Unit		µg/g	µg/g	Rating
Typical target values		< 500	< 2000	≤ 3.5
Series	GP/FG	47 - 257	297 - 1300	3.0 - 4.0
	FG/SF	138 - 206	883 - 1200	3.0
	AD1	26 - 82	151 - 1190	3.0 - 4.0
	AD/PA	31 - 168	326 - 1360	3.5 - 4.5
	VS/AD/HM	181 - 184	370 - 419	3.5

Another important aspect of the project was to test the comparability of results from different test laboratories. For example, materials manufactured at the production location in Malaysia were tested in different laboratories. The overview in Table 7 shows that almost identical values can be determined when testing according to VDA 278 and taking into account a measurement tolerance of ±20%.

The situation is entirely different in the assessment of odor in accordance with VDA 270 B-3. Deviations of up to an entire rating grade are found. This shows that odor assessments must always be treated with caution. For example, it is advisable to check again under controlled conditions a component initially rated at 4.0.

Table 7: Overview of results from various imat-uve laboratory locations of KRAIBURG TPE materials produced in Malaysia

Test		VDA 278	VDA 278	VDA 270 B-3
		VOC	Fogging	Odor
Compound	imat-uve laboratory location	µg/g	µg/g	Rating
TC6MLZ – 60 ShA AD1 series	Germany	26	151	3.5
	China	18	112	2.5
TC6PAZ – 60 ShA AD/PA series	Germany	67	791	4.0
	China	45	512	3.5
TC7MGZ – 70 ShA custom-engineered	Germany	22	155	3.5
	China	17	117	3.0

9. 'Odor map' of the interior

The interior of a modern automobile consists of a large number of individual components, which in turn are made of different materials or combinations of materials. The overall impression of the odor in the passenger compartment is created by the combination of all components contributing to the odor. This also includes adjacent components of the ventilation system, the trunk, but also the seals for the engine compartment, the windows and the doors.

For this reason, the odor assessment of materials or components is a special challenge for everyone involved in the value chain. Each material used has its own specific odor and contributes to the final odor impression of the interior. That is why it was important for KRAIBURG TPE to get an overview of the emission and odor behavior of the competition's TPE as well as of other material classes in addition to its own TPS materials.

The following overview (Table 8) shows an example of the odor ratings according to VDA 270 for different materials. The variant of test specimens A, B and C was selected on the basis of typical component size while the storage condition was kept constant with variant 3. Most materials have ratings between 3.0 and 4.0.

Table 8: Odor map of the automobile interior

Material group	Thermoplastic elastomers (TPE)		Thermoplastics		Other materials in the interior	
Odor acc. to VDA 270 Variant and evaluation	TPC		PP standard		PVC-P	
	TPU		PP odor-optimized		EPDM	
	TPO		ABS		CR	
	TPS (com-		PC/ABS		Leather standard	

10. 'High-precision standard materials' from imat-uve

An odor test poses major challenges for even trained olfactory panels. An effect not yet mentioned is a certain 'conditioning' of the nose. It can be observed, for example, that subjects who often rate only one particular material class react more sensitively to new or rarely tested other material classes.

In order to take this problem into account, possible solutions were developed in cooperation with imat-uve. Different material classes have their own specific odors. If the odor spectrum can now be mapped in a standardized way within a material class, olfactory panels can then be tailored to individual material classes.

The imat-uve 'high-precision standard material' was developed from this idea. This is also available for TPE materials and contains specially made materials from KRAIBURG TPE with different olfactory notes. The material package can be obtained from the imat-uve internet store. The ratings obtained are reported back for validation. The user receives immediate information about the range in which his values fall and material can be re-ordered in the event of deviations.

Fig. 2: The 'High-Precision Standard Material' TPE package from imat-uve.



11. Outlook: Is a 'super-low-emission compound' possible?

With precisely coordinated process parameters and optimized raw materials, emission and odor values can be reduced again significantly. KRAIBURG TPE thus have developed a material that is almost free of fogging, has very low emission values and has been assessed as good with an odor rating of 2.5. With this optimized material, we come very close to satisfying the desire for a super-low-emission compound.

Table 9: Comparison of a standard TPS and an optimized TPS type from KRAIBURG TPE

Test	VDA 278	VDA 278	VDA 270	DIN 75201-B
	VOC	Fogging	B-3	Fogging
Unit	µg/g	µg/g	Rating	mg
Standard TPS	66	793	3.0	0.26
Optimized TPS	63	128	2.5	0.02

12. Benefit for customers and OEMs

The knowledge gained can be used specifically in automotive interior projects to support and efficiently advise customers and automobile manufacturers, be it in the selection, qualification and validation of materials or in the event of irregularities occurring. Thanks to the broad data basis obtained, unrealistic test results can be identified very quickly and necessary corrective measures recommended and implemented. The creation of an emission and odor map is also helpful in this context. The practical knowledge gained, ranging from the selection of raw materials, through the compounding process and extending to processing at the customer, also enables not only the offer of the available portfolio but also the targeted development of customized customer-specific solutions.

Emissionen und Geruch unter Kontrolle

Thermoplastische Elastomere für den Fahrzeuginnenraum

Dipl.-Ing. **Florian Vetter**,
Product Development Automotive, Waldkraiburg

Kurzfassung

Seit den frühen achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts ist die Sensibilität gegenüber Emissionen im Automobilinnenraum präsent. Um dem Thema Emissionen und Geruch im Automobilbereich gerecht zu werden, hat KRAIBURG TPE vor einigen Jahren ein Projekt gestartet, um ein tiefes Verständnis über Einflussfaktoren für Innenraummaterialien zu erlangen.

Die Emissionsmessung und Geruchsbewertung von Materialien ist für alle Beteiligten der Wertschöpfungskette eine sehr komplexe Herausforderung. Zu den grundlegenden Erkenntnissen der Arbeiten von KRAIBURG TPE zählt, dass die Resultate der diversen Prüfungen keine Korrelation zwischen Emissionen und Geruch zulassen. Des Weiteren ist die Probenhistorie für die Reproduzierbarkeit und die Vergleichbarkeit verschiedener Messergebnisse von entscheidender Rolle.

In enger Zusammenarbeit mit dem unabhängigen Prüfinstitut imat uve wurden die Einflussfaktoren im Bereich Emission und Geruch erarbeitet und das Portfolio der KRAIBURG TPE für den Automobilinnenraum mittels standardisierter Prüfbedingungen überprüft. Dabei wurden Innenraummaterialien aus KRAIBURG TPE Produktionsstandorten in Deutschland, USA und Malaysia getestet. Zusätzlich wurden auch die Prüfstandorte von imat-uve in Deutschland und China miteinander verglichen.

Für KRAIBURG TPE gilt beim Thema Emissionen und Geruch die ganzheitliche Herangehensweise. Diese reicht von der Analyse der Rohstoffe über die weltweit gleichmäßige, kontrollierte Fertigung der Compounds, bis hin zur Verarbeitung beim Kunden und der Freigabe durch den jeweiligen Automobilhersteller. Anhand der detaillierten Analyse kennt KRAIBURG TPE sowohl das Emissions- und Geruchsniveau seiner eingesetzten Rohstoffe im Detail als auch die optimalen Verfahrenseinstellungen für die Herstellungen der TPS-Materialien.

Bezogen auf das Portfolio für den Automobil-Innenraum wurden bestehende Serien optimiert. Ferner wurde das generierte Wissen genutzt, um eine neue, maßgeschneiderte TPS-Serie (FG/SF Serie) zu entwickeln. Technische Grenzen wurden mit der Entwicklung eines „Super-Low-Emission-Compound“ ausgelotet.

Der erarbeitete Wissenstand kann in Projekten für den Automobilinnenraum zur Unterstützung und effizienten Beratung von Kunden und Automobilherstellern gezielt genutzt werden.

1. Emissionen und Geruch unter Kontrolle

Seit den frühen achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts ist die Sensibilität gegenüber Emissionen im Automobilinnenraum präsent. Auslöser dafür war insbesondere die Bildung von unerwünschtem Kondensat auf der Innenseite der Frontscheiben von Neuwägen. In Folge dessen lag der Fokus zunächst auf der Einhaltung von Fogging-Werten. Im Laufe der Zeit wurden die Anforderungen an Innenraumbauteile erweitert und differenzierter. Es entstanden nach und nach verschiedene analytische Prüfnormen, um die Einhaltung von Emissionen sicherzustellen. Eine immer stärkere Rolle für Automobilhersteller aber auch für Endkunden spielt das Thema Geruch. Die allgemeine Meinung auf Konferenzen und Tagungen über regionale Unterschiede zum Thema Geruch decken sich mit den internen Erfahrungen bei KRAIBURG TPE: Während in Asien der Geruch bzw. die Anforderungen nach keinem Geruch, höchste Priorität hat, wird in Europa das Augenmerk eher auf einzelne Substanzen und die Gesamtemission im Fahrzeug gelegt. In Nordamerika hingegen hält sich diese Dynamik derzeit noch in Grenzen.

Auf Grund ihrer Materialeigenschaften, den vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und der wirtschaftlichen Verarbeitbarkeit haben Thermoplastische Elastomere (TPE) seit den 90iger Jahren des 20. Jahrhunderts eine rasante Entwicklung erfahren. Dies zeigt sich in einer Vielzahl von Anwendungen, hierzu zählen auch Bauteile im Fahrzeuginnenraum. Folglich war es für KRAIBURG TPE wichtig, die Anforderungen der Automobilhersteller erfüllen zu können. Vor mehr als drei Jahren wurde eine Projektgruppe gegründet, um sich über Emissions- und Geruchswerte von Innenraummaterialien ein umfassendes Know-how zu erarbeiten und ein tiefes Verständnis über deren Einflussfaktoren zu gewinnen.

2. Komplexe Herausforderung der Emissionsmessung und Geruchsbewertung

Die Prüfung des Emissionsverhaltens von Werkstoffen unterscheidet sich deutlich von der Bestimmung typischer Werkstoffdaten wie beispielsweise mechanischer Kenngrößen. Neben

verschiedenen Standards, wie DIN oder VDA Methoden gibt es eine Vielzahl an Normen der Automobilhersteller, die sich teilweise stark ähneln. Allein für die Bestimmung des Fogging-verhaltens gibt es mehr als 15 Konzernnormen, die jedoch allesamt stark an die DIN 75201 angelehnt sind. Neben der großen Anzahl ähnlicher Methoden gilt es zu berücksichtigen, dass Emissionstests je nach Messaufbau unterschiedliche Zusammensetzungen an emittierten Substanzen liefern. So können dynamische Thermodesorption gemäß VDA 278, Static Head-space gemäß VDA 277 und verschiedene Kammerprüfungen der ISO 12219 Ausführungen, nicht miteinander verglichen werden, noch sollten die Prüfwerte in irgendeiner Art und Weise umgerechnet werden. Vermeintlich ähnliche Prüfmethoden unterscheiden sich oftmals in der Art der Konditionierung, den Prüftemperaturen oder Prüfzeiten, wodurch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht möglich ist. Bei einigen Prüfungen spielt auch die Kalibrierung der Geräte und die Probenentnahme eine entscheidende Rolle und hat einen großen Einfluss auf die Messergebnisse.

Noch kritischer als die Messung von Emissionen ist die Bewertung des Geruchs. Alle bisherigen Bemühungen die rein subjektive, menschliche Geruchswahrnehmung durch andere, objektivere Methoden zu ersetzen, sind bisher wenig erfolgreich gewesen. Es blieb bei der Bewertung durch geschulte Bewertungsgremien nach beispielsweise VDA 270. Trotz intensiver Schulung und präziser Auswahl der Probanden können zum Teil deutliche Unterschiede in der Geruchsbewertung vorliegen. Es ist keine Seltenheit, dass verschiedene Geruchsnoten der gleichen Probe in verschiedenen Laboren oder bei verschiedenen Automobilherstellern bestimmt werden. Dies ist teilweise durch regionales und geschlechterspezifisches Geruchsempfinden zu erklären. Erschwerend für die Qualifizierung von TPE für den Automobilinnenraum kommt hinzu, dass Automobilhersteller nicht mit gleichen Spezifikationen arbeiten.

Zu den grundlegenden Erkenntnissen der Arbeiten von KRAIBURG TPE zählt, dass die Resultate der diversen Tests keine Korrelation zwischen Emissionen und Geruch zulassen. Rückschlüsse von Emissions- auf Geruchsergebnisse oder umgekehrt sind nicht zu empfehlen. Eine große Gemeinsamkeit gibt es dennoch, nämlich die Abhängigkeit der Emissions- und Geruchsergebnisse von der Probenhistorie. Diese spielt neben der Wahl der Prüfmethode eine zentrale Rolle und ist seit Januar 2019 in der DIN ISO 12219-8 geregelt. Um die Vergleichbarkeit von Ergebnissen zu ermöglichen, müssen sich folgende Fragen gestellt werden: Wird an Kunststoffgranulat, Musterplatten, einzelnen Bauteilen oder Bauteilgruppen gemessen? Wie ist die Probe verpackt, wie wurde sie gelagert und unter welchen Bedingungen zum Muster

oder Bauteil verarbeitet? Die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messergebnisse hängt daher im Wesentlichen auch von der Probenhistorie ab.

3. Gebündelte Kompetenz – imat-uve und KRAIBURG TPE

KRAIBURG TPE hat sich vor einigen Jahren entschlossen, das Thema Emissionen und Geruch im Automobilinnenraum vollumfänglich zu durchdringen. Aufgrund der Komplexität entschied man sich für die Zusammenarbeit mit einem externen Partner. Gemeinsam mit dem unabhängigen Prüfinstitut imat-uve wurde das Thema grundlegend betrachtet und analysiert. imat-uve ist ein innovatives Entwicklungs- und Engineering-Unternehmen, das seine Kunden ebenfalls entlang der gesamten Prozesskette unterstützt. Dies umfasst Projektfindung, Design und Entwicklung bis hin zur Erprobung von Material, Bauteilen und Systemen. Die Zusammenarbeit von imat-uve und KRAIBURG TPE ermöglichte eine ganzheitliche Betrachtung von Emissions- und Geruchseinflüsse aus Material- und Verarbeitungssicht, als auch von Seiten der Messmittel und -methoden. Die Ergebnisse und Erkenntnisse waren eine Win-win-Situation für beide Unternehmen.

Vor allem bei der Interpretation von komplexen Prüfungen bzw. Prüfergebnissen war und ist die Fachexpertise von imat-uve unerlässlich. Dadurch können effektive Lösungsansätze gefunden und fehlerhafte Interpretationen ausgeschlossen werden. In enger Zusammenarbeit mit imat uve wurden die Einflussfaktoren im Bereich Emission und Geruch erarbeitet und das spezielle TPE-Portfolio mittels standardisierter Prüfbedingungen getestet. Dabei wurden Materialien aus allen KRAIBURG TPE Produktionsstandorten in Deutschland, USA und Malaysia verglichen. Zusätzlich wurden auch die Prüfstandorte von imat-uve in Deutschland und China miteinander verglichen.

Neben der Generierung von fundierten Emissionsdaten der KRAIBURG TPE Innenraummaterialien, resultierte die Zusammenarbeit auch in einem tiefen Verständnis über verschiedene Prüfmethode und Prüfergebnisse in Kombination mit eingesetzten Rohstoffen.

Bild 1: Mögliche TPE-Anwendungen im Automobilinterieur



Fundiertes Know-how zu Emissions- und Geruchsverhalten von Thermoplastischen Elastomere für Fahrzeuginnenanwendungen (Bild 1) wurde generiert. Neben sicheren Produkten für den Innenraum, ist die gezielte Kundenberatung in diesem komplexen Sachgebiet ein echter Mehrwert, der Zeit und Kosten einsparen kann.

4. Analyse aller Einflussfaktoren

Ein wichtiges Ergebnis der Arbeiten ist, dass sich das Emissions- und Geruchslevel der eingesetzten Rohstoffe für ein TPE-Material und die daraus gefertigten Bauteile über die komplette Wertschöpfungskette ändern können. Somit hat jeder, angefangen vom Rohstofflieferanten, über den TPE-Hersteller bis hin zum Bauteillieferant, aber auch die Prüflabore der Automobilkonzerne, die den Freigabeprozess durchführen, eine große Verantwortung. Nur mit diesem Bewusstsein entlang der Lieferkette können qualitativ hochwertige Materialien mit geringem Emissions- und Geruchsniveau verlässlich zur Verfügung gestellt werden.

Für KRAIBURG TPE gilt daher die ganzheitliche Herangehensweise. Diese reicht von der Analyse der Rohstoffe über die weltweit gleichmäßige, kontrollierte Fertigung der Compounds an drei Produktionsstandorten, bis hin zur Verarbeitung beim Kunden und der Freigabe durch den jeweiligen Automobilhersteller.

5. Rohstoffeinfluss

KRAIBURG TPE Materialien für Anwendungen im Automobilinnenraum sind zum großen Teil TPS, Thermoplastische Elastomere basierend auf Styrol-Block-Copolymeren (SBC). TPS sind Compounds und bestehen aus Rohstoffgemischen verschiedener Stoffe, wie Elastomeren (SEBS), Thermoplasten (PP), Füllstoffen, Farbstoffen und Stabilisatoren. Jeder dieser Rohstoffe hat spezifische Eigenschaften und beeinflusst das Emissions- und Geruchsverhalten des fertigen TPS-Compounds. In einem ersten Schritt wurden die Einzelrohstoffe analysiert, um Rückschlüsse auf das fertige TPS-Compound ziehen zu können. Einen maßgeblichen Einfluss haben Styrol-Block-Copolymere und Polypropylen, aber auch eingesetzte Farbstoffe. Anhand dieser eingehenden Analyse kennt KRAIBURG TPE das Emissions- und Geruchsniveau seiner Rohstoffe nun im Detail.

So gibt es deutliche Unterschiede bei Emissionsmessungen verschiedener Styrol-Ethylen-Butadien-Styrol (SEBS)- und Polypropylen (PP)-Typen in der Micro-Chamber gemäß ISO 12219-3. Mit der richtigen Wahl des SEBS im TPS-Compound kann die Gesamtkohlenstoffemission (TVOC) sowie die Styrolemission des TPS-Materials deutlich beeinflusst werden. Auch das verwendete PP hat einen Einfluss auf den TVOC-Wert. Kritische Substanzen wie Formaldehyd oder die aromatischen Kohlenwasserstoffe wie Benzol, Toluol, Xylol und Ethylbenzol (zusammengefasst in BTXE) können in der Micro-Chamber bestimmt werden, haben jedoch in den TPS Materialien der KRAIBURG TPE generell ein geringes Level.

Tabelle 1: Emissionswerte von verschiedenen Rohstoffen gemessen am Granulat gemäß ISO 12219-3

Prüfung	Micro-Chamber ISO12219-3		
	TVOC	Styrol	BTXE
Einheit	µg/kg·h	µg/kg·h	µg/kg·h
SEBS 1	8.910	29	81
SEBS 2	27.800	4.920	451
PP 1	11.500	<10	17
PP 2	4.350	<10	<10

Generell wird bei KRAIBURG TPE ein Augenmerk auf SBC-Rohstoffe gesetzt, welche nahezu kein freies monomeres Styrol enthalten. Ab einem Anteil von 1 % Styrol wird ein Gemisch aus

Gefahrstoff kennzeichnungspflichtig. Die Spuren von restlichem monomerem Styrol in den eingesetzten SBC-Rohstoffen liegen typischerweise bei 0,0001 % (1 ppm) und betragen somit ein Zehntausendstel des Anteils für die Kennzeichnungspflicht als Gefahrstoff. Der Einsatz von nahezu styrolfreien SBC-Rohstoffen resultiert in sehr reine TPS-Fertigprodukte, wie in Tabelle 2 zu erkennen ist. Nur selten kann Styrol detektiert werden, nachgewiesene Anteile befinden sich weit unter den vorgegebenen Grenzwerten.

Tabelle 2: Styrol-Gehalt in TPS-Compounds gemäß ISO 12219-4 und VDA 278, Grenzwerte aus DBL 5430 (2017-12)

Methode	Grenzwert	Styrol-Gehalt in TPS-Compounds			
		TC6COZ	TC7MLB	TC6MLB	TC6GPN
ISO 12219-4 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	≤ 100	4	12	2	n.d.*
VDA 278 in $\mu\text{g}/\text{g}$	≤ 8	n.d.*	n.d.*	n.d.*	n.d.*

Zudem wurden verschiedene SEBS- und PP-Typen nach VDA 278, VDA 270 und DIN 75201-B getestet (siehe Tabelle 3). Diese Methoden sind Bestandteil vieler Spezifikationen namhafter Automobilhersteller.

In der VDA 278 unterscheiden sich die polymeren Bestandteile des TPS teils deutlich. Im Foggingverhalten schneidet SEBS besser ab als PP. Im Geruch nach VDA 270 B-3 ist auffällig, dass beide PP-Typen eine Geruchswertung von 4,0 erhalten. Hierbei spielt vor allem die Herstellmethode der PP-Typen eine entscheidende Rolle, die sowohl auf die Performance als auch auf den Preis großen Einfluss hat. Bei den SEBS Rohstoffen wurde kein Geruch bestimmt, da diese als reines Polymer nicht verarbeitet werden können. Eine Beurteilung des pulverförmigen Einzelrohstoffes macht aufgrund der offenporigen Struktur wenig bis keinen Sinn.

Tabelle 3: Emissionswerte von Rohstoffen gemessen am Granulat gemäß VDA 278, DIN 75201-B und VDA 270 B-3

Prüfung	VDA 278		DIN 75201-B	VDA 270 B-3
	VOC	Fog	Fogging	Geruch
Einheit	µg/g	µg/g	mg	Note
SEBS 1	464	260	< 0,2	-
SEBS 3	459	44	< 0,2	-
PP 3	226	548	1,5	4,0
PP 4	190	428	1,4	4,0

6. Einfluss des Compoundierprozesses

Neben den eingesetzten Rohstoffen für ein TPS-Compound, die meist den größten Einfluss auf das Geruchs- und Emissionsniveau haben, spielt der Compoundingprozess auch eine wesentliche Rolle. Während des Compoundierens werden die unterschiedlichen Rohstoffe unter Einfluss von Scherung und Temperatur homogen vermischt, wodurch ein TPS-Compound entsteht. Typischerweise geschieht dies in Doppelschneckenextrudern. Bei TPS-Compounds erfolgt idealerweise keine chemische Reaktion. Allerdings sind bei einem hohen Energieeintrag während des Compoundierens unerwünschte chemische Reaktionen und somit Emissions- und Geruchsquellen nie ganz auszuschließen. Diese Erkenntnis lässt sich auch auf andere TPE-Klassen übertragen. Mittels der Anlagenkonfiguration und den Verfahrensparametern können Geruchs- und Emissionslevel positiv wie auch negativ beeinflusst werden.

Die Herausforderung eines TPS-Produzenten ist es, für jede spezifische Rezeptur die optimale Verfahrenseinstellung in Kombination mit den besten Rohstoffen zu finden und gleichzeitig alle geforderten Materialeigenschaften zu erfüllen. Mit dieser Aufgabe hat sich KRAIBURG TPE in den letzten Jahren intensiv beschäftigt und man konnte wesentliche Einflussfaktoren und Stell-schrauben identifizieren. Basierend auf diesem Know-how wurde bei KRAIBURG TPE ein marktorientiertes Portfolio für Anwendungen im Interieur aufgebaut. Neben der Optimierung bestehender Serien, wurde das generierte Wissen genutzt, um eine neue, maßgeschneiderte TPS-Serie (FG/SF Serie) speziell für den Automobilinnenraum zu entwickeln.

Tabelle 4 dient der Veranschaulichung der Einflüsse von Durchsatz und Energieeintrag auf ein typisches TPS Material für den Automobilinnenraum. Ein geringerer Durchsatz hat beim

untersuchten Material einen positiven Einfluss auf Emission (VDA 278 und VDA 277) und Geruch (VDA 270 B-3). Es sei erwähnt, dass die Messtoleranz der Geruchsmethode mindestens mit einer halben Geruchsnote anzusetzen ist.

Der Energieeintrag, der während der Herstellung auf Rohstoffe einwirkt, hat einen deutlichen Einfluss auf das Emissionsverhalten. Hier gilt es zu beachten, dass die eingesetzten Rohstoffe des zu produzierenden Compounds während der Herstellung so wenig wie möglich geschädigt werden und ein Abbau vermieden wird. Eine Erhöhung des Energieeintrages verringert das Emissionslevel gemessen nach VDA 278 und VDA 277. Die Schwankung des Foggingwertes ist innerhalb Schwankungsbreite des Messmittels, jedoch geben diese Werte in Kombination mit den anderen Ergebnissen eine klare Tendenz über den Einfluss gewisser Verfahrensparametern an.

Tabelle 4: Einfluss der Prozessparameter beim Compounding auf das Emissions- und Geruchsverhalten

Einfluss des Compoundingprozess	VDA278	VDA278	VDA277	VDA 270	DIN75201-B
	VOC	Fog	VOC	B-3	Fogging
Einheit	µg/g	µg/g	µgC/g	Note	mg
Standard Parameter	66	793	0,6	3,0	0,26
Durchsatz ↓	29	751	0,3	2,5	0,25
Durchsatz ↑	111	969	2,4	3,0	0,57
Energieeintrag ↓	135	859	1,8	2,5	0,46
Energieeintrag ↑	34	807	0,4	3,0	0,36

7. Einfluss des Verarbeitungsprozesses

Einen weiteren Einflussfaktor für ein emissions- und geruchsarmes Bauteil bildet der Herstellungsprozess des Bauteils, bei TPE-Materialien häufig das Spritzgussverfahren. Ähnlich wie beim Compoundingprozess spielen auch hier die gewählten Verarbeitungsparameter eine entscheidende Rolle. Bisher liegt das Hauptaugenmerk der Verarbeiter von TPE-Compounds meist auf der optischen Qualität des Bauteils. Der Einfluss auf das Emissions- und Geruchsniveau wird häufig vernachlässigt bzw. unterschätzt und erst bei nachfolgenden Untersuchungen erkannt. Die Probenhistorie spielt auch in diesem Fall wieder eine entscheidende Rolle. Hier kann KRAIBURG TPE seine Kunden mit Empfehlungen und Erfahrungswerten über die Verarbeitung

unterstützen. Um das bestmögliche Emissions- und Geruchsverhalten des Bauteils zu erreichen, sollten beispielweise bestimmte Temperatureinstellungen, Verweilzeiten und Scherraten eingehalten werden.

8. Geprüftes und qualifiziertes Innenraumportfolio von KRAIBURG TPE

KRAIBURG TPE bietet verschiedene Produktserien für den Automobilinnenraum an, welche die Anforderungen der meisten Automobilhersteller an Emissions- und Geruchsverhalten erfüllen. Das global erhältliche Portfolio umfasst Compounds mit Eignung für den Mehrkomponentenspritzguss. So gibt es jeweils maßgeschneiderte Serien mit Haftung zu verschiedenen Thermoplasten wie PP, PC, ABS und PA.

Tabelle 5: Übersicht des KRAIBURG TPE Automobilinnenraum-Portfolios

Serien	Typenbezeichnung	Beschreibung
GP/FG	TC5GPZ bis TC8GPZ	Universeller Einsatz Haftung zu PP
FG/SF	TC5FEZ bis TC8FEZ	Verbesserte Oberflächenabbildung Geruchsoptimiert mit Haftung zu PP
AD1	TC5MLZ bis TC8MLZ	Haftung zu polaren Thermoplasten wie PC, ABS, ASA, SAN
AD/PA	TC5PAZ bis TC8PAZ	Haftung zu PA6, PA66, PA12
VS/AD/HM	TC6CEZ bis TC8CEZ	Verbesserte Verschleißigenschaften Haftung zu PC, ABS, ASA, SAN, PA6, PA12

Im Zuge des Projekts wurden die global von allen Produktionsstandorten verfügbaren Innenraummaterialien aus deutscher, malaysischer und US-Produktion bei imat-ue in Deutschland und China gemäß VDA 278 und VDA 270 B-3 geprüft. Dabei wurden je Produktserie Härten von 50, 60, 70 und 80 Shore A (ShA) getestet. Alle Prüfungen wurden an Prüfplatten, die nach einem standardisiertem Spritzgussverfahren in-house hergestellt wurden, durchgeführt. Der Probenversand erfolgte in standardisierten, emissionsfreien Probenbeutel. Die Konditionierung der Proben wurde ausschließlich durch imat-ue Prüflabore vorgenommen. Damit wurde eine gleiche Probenhistorie eingehalten, um die Vergleichbarkeit und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die Übersicht der VDA 278 und VDA 270 B-3 Prüfung in Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse aller Produktserien. Generell erfüllen alle Interieur-Produktreihen aus den drei KRAIBURG TPE Produktionsstandorten die Anforderungen an das Emissionsverhalten der meisten Automobilhersteller. Angegeben sind die minimalen und maximalen Emissions- und Geruchswerte innerhalb der Produktserien. Die Unterschiede erscheinen auf den ersten Blick relativ hoch, sind jedoch in Anbetracht der Tatsache unterschiedlicher Produktionsstandorte, Härteeinstellungen und Farben (schwarz und naturfarben) sehr zufriedenstellend, da auch Maximalwerte unter den derzeitigen geforderten Emissionsgrenzwerten der Automobilhersteller liegen.

Üblicherweise werden Geruchsnoten mit 3,0 oder 3,5 für gut befunden, eine Geruchsbewertung von 4,0 und höher ist eher kritisch. Das Geruchsverhalten von Materialien ist maßgeblich von der Rezeptur und damit von den enthaltenen Rohstoffen abhängig. Hervorzuheben ist die neu entwickelte FG/SF Serie, die oberflächen- und geruchsoptimiert ist und durchgehend über alle Härten mit der Note 3,0 von imat-uve bewertet wurde. Bei allen Bewertungen und Prüfergebnissen der TPS-Compounds ist nicht zu vergessen, dass immer auch die finale Bauteilgröße eine wesentliche Rolle spielt, so hat z.B. eine Instrumententafel einen viel größeren Anteil am Gesamtgeruchsniveau im Innenraum als Ablagematten oder Bedienräder.

Tabelle 6: Übersicht des KRAIBURG TPE Innenraum-Portfolios

Prüfung		VDA 278	VDA 278	VDA 270 B-3
		VOC	Fog	Geruch
Einheit		µg/g	µg/g	Note
Typische Zielwerte		< 500	< 2000	≤ 3,5
Serie	GP/FG	47 - 257	297 – 1.300	3,0 - 4,0
	FG/SF	138 - 206	883 – 1.200	3,0
	AD1	26 - 82	151 – 1.190	3,0 - 4,0
	AD/PA	31 - 168	326 – 1.360	3,5 - 4,5
	VS/AD/HM	181 - 184	370 - 419	3,5

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Projekts war es, die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Prüflabore zu testen. So wurden z.B. am Produktionsstandort in Malaysia hergestellte Materialien, bei unterschiedlichen Laboren getestet. Der Überblick in Tabelle 7 zeigt, dass bei der Prüfung nach VDA 278 unter Berücksichtigung einer Messtoleranz von $\pm 20\%$ nahezu identische Werte bestimmt werden können.

Völlig anders sieht dabei die Bewertung des Geruchs nach VDA 270 B-3 aus. Es werden Abweichungen von bis zu einer ganzen Note ermittelt. Dies zeigt, dass Geruchsbewertungen stets mit Bedacht behandelt werden müssen. So ist es zum Beispiel empfehlenswert, ein anfänglich mit 4,0 bewertetes Bauteil unter kontrollierten Bedingungen nachzuprüfen.

Tabelle 7: Übersicht Ergebnisse verschiedener imat-uve Laborstandorte von in Malaysia produziertem KRAIBURG TPE Materialien

Prüfung		VDA 278	VDA 278	VDA 270 B-3
		VOC	Fog	Geruch
Compound	Laborstandort i- mat-uve	µg/g	µg/g	Note
TC6MLZ – 60 ShA AD1-Serie	Deutschland	26	151	3,5
	China	18	112	2,5
TC6PAZ – 60 ShA AD/PA-Serie	Deutschland	67	791	4,0
	China	45	512	3,5
TC7MGZ – 70 ShA Custom-Engineered	Deutschland	22	155	3,5
	China	17	117	3,0

9. „Geruchslandkarte“ Innenraum

Der Innenraum eines modernen Automobils besteht aus einer Vielzahl einzelner Bauteile und diese wiederum aus unterschiedlichen Materialien oder Materialkombinationen. Der Gesamteindruck des Geruchs in der Fahrgastzelle entsteht durch die Kombination aller geruchsbeitragenden Komponenten. Hierzu zählen auch angrenzende Bauteile der Lüftung, des Kofferraums aber auch der Dichtungen zum Motorraum, der Fenster und Türen.

Daher ist die Geruchsbewertung von Materialien bzw. Bauteilen für alle Beteiligten der Wertschöpfungskette eine besondere Herausforderung. Jedes verwendete Material hat seinen eigenen spezifischen Geruch, und trägt zum finalen Geruchseindruck des Innenraums bei. Deshalb war es für KRAIBURG TPE wichtig, sich neben den eigenen TPS-Materialien einen Gesamtüberblick des Emissions- und Geruchsverhaltens von Wettbewerbs-TPE aber auch anderen Materialklassen zu erarbeiten.

Der folgende Überblick (Tabelle 8) zeigt beispielhaft die Geruchsnoten gemäß VDA 270 verschiedener Materialien. Die Variante der Prüfkörper A, B und C wurde je nach typischer Bauteilgröße ausgewählt, die Lagerbedingung wurde mit Variante 3 konstant gehalten. Die meisten Materialien befinden sich auf einem Niveau zwischen 3,0 und 4,0.

Tabelle 8: Geruchslandkarte Automobil-Innenraum

Materialgruppe	Thermoplastische Elastomere (TPE)		Thermoplaste		Weitere Materialien im Innenraum	
Geruch VDA 270 Variante und Bewertung	TPC	B3 3,0	PP Standardtype	B3 4,0	PVC-P	C3 3,5
	TPU	B3 3,0	PP Geruchsoptimiert	B3 3,0	EPDM	A3 3,5
	TPO	C3 4,0	ABS	B3 3,0	CR	A3 4,5
	TPS (Marktbegleiter)	B3 3,5	PC/ABS	B3 3,5	Leder Standardtype	C3 4,0

10. „High precision standard materials“ von imat-uve

Eine Geruchsprüfung stellt selbst geschulte Geruchspanels vor große Herausforderungen. Ein bisher noch nicht erwähnter Effekt ist eine gewisse „Konditionierung“ der Nase. So ist zu beobachten, dass Probanden, die häufig nur eine bestimmte Materialklasse bewerten bei neuen oder selten geprüften anderen Materialklassen empfindlicher reagieren.

Um dieser Problematik Rechnung zu tragen wurden in Zusammenarbeit mit imat-uve Lösungsmöglichkeiten erarbeitet. Unterschiedliche Materialklassen haben ihre spezifischen Gerüche. Wenn nun innerhalb einer Materialklasse das Geruchsspektrum standardisiert abgebildet werden kann, können sich Geruchspanels gezielt auf einzelne Materialklassen einstellen.

Aus dieser Idee ist das imat-uve „high precision standard material“ entwickelt worden. Diese ist auch für TPE-Materialien verfügbar und enthält dafür speziell gefertigte Materialien von KRAIBURG TPE in unterschiedlichen Geruchsnoten. Das Material-Paket ist über den Webshop von imat-uve zu beziehen. Dort werden die erreichten Noten zur Validierung zurückgemeldet. Der Benutzer erhält sofort Auskunft darüber, in welchem Bereich seine Werte liegen und kann bei Abweichungen Material nachbestellen.

Bild 2: Das TPE-Package "High Precision Standard Material" von imat-ue.



11. Ausblick: Ist ein „Super-Low-Emission-Compound“ möglich?

Mit genau abgestimmten Prozessparametern und optimierten Rohstoffen können Emissions- und Geruchswerte nochmals deutlich reduziert werden. So wurde von KRAIBURG TPE ein Material entwickelt, welches nahezu frei von Fogging ist, sehr geringe Emissionswerte zeigt und mit einer Geruchsbewertung von 2,5 als gut bewertet wurde. Mit diesem optimierten Material kommt man dem Wunsch eines Super-Low-Emission Compounds sehr nahe.

Tabelle 9: Vergleich einer Standard TPS- und einer optimierten TPS-Type von KRAIBURG TPE

Prüfung	VDA278	VDA278	VDA 270	DIN75201-B
	VOC	Fog	B-3	Fogging
Einheit	µg/g	µg/g	Note	mg
Standard TPS	66	793	3,0	0,26
optimiertes TPS	63	128	2,5	0,02

12. Benefit für Kunden und OEMs

Der erarbeitete Wissensstand kann in Projekten für den Automobilinnenraum zur Unterstützung und effizienten Beratung von Kunden und Automobilherstellern gezielt genutzt werden. Sei es bei der Auswahl, Qualifizierung und Validierung von Materialien oder bei auftretenden Unregelmäßigkeiten. Durch die gewonnene, breite Datengrundlage können sehr schnell unrealistische Prüfergebnisse identifiziert werden oder notwendige Korrekturmaßnahmen empfohlen und getroffen werden. Hilfreich ist auch in diesem Zusammenhang der Aufbau einer Emissions- und Geruchslandkarte. Das gewonnene Know-how, angefangen von der Rohstoffauswahl über den Compoundingprozess bis hin zur Verarbeitung beim Kunden, ermöglicht neben dem Angebot des verfügbaren Portfolios auch die zielgerichtete Entwicklung von maßgeschneiderten Kundeneinzellösungen.

Additive manufacturing based on screw extrusion: machines, material and applications in the automotive industry

Dipl. Ing. **T. Stier**, Akro-Plastic GmbH, Niederzissen;
N. Lammert, M. Sc., Yizumi Germany GmbH, Aachen;
C. Heinz, M. Sc., SMP Deutschland GmbH, Bötzingen;
N. Unger, M. Sc., German Aerospace Center (DLR), Institute of Vehicle Concepts, Stuttgart

Abstract

For automotive applications the major limitations of established additive manufacturing processes (e.g. FDM, SLS, SLA etc.) are known to be either part size, material properties, costs for material/machine, or production speed. **Screw Extrusion Additive Manufacturing (SEAM)** can overcome these limitations and has the potential to be economically competitive compared to the injection-molding process for small and medium part quantities up to 100,000 parts over lifetime.

Using screw extrusion for the plastification of series-production-qualified injection-molding granules and an automated 6-axis robot system, the SEAM process is able to produce geometrically complex, large-scale parts from thermoplastic polymers. Due to the diversity of material on the market, including granules with a high percentage of fiber reinforcement, the material costs for the additive manufacturing of high-performance parts can be drastically reduced. The smart design of the SEAM machine additionally enables the option for hybrid manufacturing (additive and subtractive manufacturing), since the extruder mounted on the robot can be exchanged for a milling or drilling unit. If, in addition to the high material throughput of SEAM, the design of the parts corresponds to the design guidelines of the SEAM process, fast production cycles can be achieved to further obtain cost savings. For the automotive industry the SEAM process can be used to produce structural or decorative carrier parts for interior and exterior applications in small and medium quantities and limited special editions. Furthermore, large-format parts manufactured by this process can support series development during the prototyping phase.

In the following article the characteristics of the SEAM process and respective applications are described in more detail. Additionally, future *must-have developments* will be explained below highlighted with CAD/CAM demands on the market.

1. Introduction

"As long as manufacturers of plastic components do not distribute their additive manufactured demo-parts at trade fairs – because they are too expensive – we are not talking about industrial mass production using additive manufacturing."

Additive manufacturing (AM) processes are characterized by three-dimensional components that can be manufactured directly and without molds on the basis of CAD data. Accordingly, plastic-based AM is already widely used in prototype construction. In the future, AM processes should also be able to replace the previously mold-based and thus cost-intensive individual, small- or medium-series production. However, if AM is to be used in an industrial environment, it is imperative to make economic calculations and to design components, systems and processes accordingly. Currently, the mandatory process requirements for pre-serial production are only inadequately met. The production of large-format components with good surface qualities in short production times is not feasible. High productivity in terms of material, machine and work performance as well as the use of established and qualified materials for series production is not possible. So the IKV and Yizumi have developed a new technology to address these key challenges from the market.

In the context of this article, the basic requirements for a manufacturing system will be explained. Subsequently, technological solution approaches will be derived and Yizumi's designed plant approach for the implementation of these solution approaches will be presented. Finally, possible applications and best-practice component designs as well as future software (CAD/CAM) developments will be presented.

2. Requirements for a production technology

The following requirements (Economic Efficiency, Material Diversity, Scalability, Automation) can be derived as basic for a plant development. These are strictly oriented towards reducing part costs and increasing the range of materials. Calculation of an economic production in direct comparison with an injection-molding production is in the foreground.

2.1 Increase in economic efficiency

The component costs can be used as a striking indicator of profitability in the field of plastics production.

Three main effects on the component cost can be highlighted:

- Material costs
- Machine costs
- Plant productivity

In order to determine the profitability of a production technology, a key figure can be taken from the factors of productivity and machine costs as a quotient of these two values. The quotient used in the following is described in Equation 1.

$$\zeta = \frac{\text{Annual throughput } \left[\frac{\text{g}}{\text{a}} \right]}{\text{Machine investment } [\text{€}]} \tag{1}$$

If the kilogram-related costs of a component are calculated using different ratios of productivity of the plant and varying material costs, the cost field shown in Fig. 1 results.

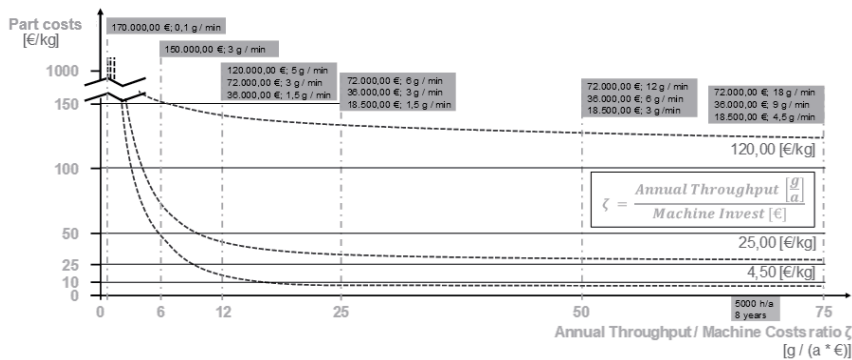


Fig. 1: Part costs depending on Annual throughput, Machine costs and Material costs

In this context, a material cost share of 50% should be aimed for, taking into account the comparison with injection molding (reference value). For a carbon-fiber-reinforced polyamide, which will be used below as a basis for comparison, the 10 €/kg line represents the limit value of the economic feasibility study. Now three cost lines for different material costs (4.50 €/kg; 25 €/kg; 120 €/kg) can be taken from the diagram. The cost of 120 €/kg for a carbon-fiber-reinforced polyamide thus represents a realistic value for a carbon-fiber-filled monofilament. 25 €/kg is a low entry price for an unreinforced amorphous thermoplastic in monofilament form and 4.50 €/kg is finally the price for a carbon-fiber-reinforced polyamide in granular shape. It can be seen that only by using granulate can an economic production of plastic components be realized by using AM boundary conditions. Thus, the use of granulates can be considered as the most important factor for economical additive manufacturing. With the

current cost structure for monofilaments, economic production compared to injection molding is never possible. In the context of this article, the targeted mass production of plastic components is always assumed as a prerequisite. If one now compares the ratio of machine costs and machine productivity, it becomes clear that this ratio must be low in order to maintain the benchmark with competitive processes. The cost line at 4.50 €/kg already cuts the 10 €/kg component comparison line at an x value of 18 g/(a*€).

Interim conclusion regarding economic efficiency

- Material costs at granulate level
- Machine costs in the range of €100,000.00
- Throughputs of at least 4 g/min

2.2 Increase in material diversity: use of qualified series materials

In accordance with the previous interim conclusion, the plant technology used must therefore offer the possibility of processing both amorphous and semi-crystalline thermoplastics in granulate form. For this purpose, the AM system needed must allow a flexible temperature control without simultaneously limiting the maximum possible productivity. Productivity is restricted, for example, by a heated installation space, since a small temperature difference between the melt and the environment requires a low cooling rate. The processing of filled and unfilled thermoplastics should be possible over a wide range in terms of filler type and filler content. The plasticizing and conveying concept on the one hand and the discharge nozzle on the other have to be designed accordingly.

The most important step towards minimizing part costs is the reduction of material costs. The use of materials in standard granulate form drastically reduces these material costs, since standard materials can be purchased at favorable prices. Synergy effects can only be exploited economically for additive manufacturing through the already high purchase quantities for processing with alternative plastic processing methods.

The utilization of the entire material range of thermoplastic materials as standard granulates enables users to process known and already certified materials, from known and certified raw material manufacturers, through known sales channels and at known and low prices.

The processing of highly reinforced plastic compounds in additive production holds new potentials with regard to the choice of materials and the resulting component properties. The production of such highly filled plastic compounds is the core competence of Akro-Plastic GmbH, Niederzissen. These compounds have very tight batch tolerances.

The polyamide 6 Akromid B3 ICF 30 with 30 wt.% carbon short fibres of about 300 μm length has been successfully processed using IKV plant technology. It is already being used in injection-molding series applications. Fiber-reinforced compounds are generally less prone to shrinkage, which simplifies processing in plasticising, additive manufacturing processes. The good plasticising and flow properties of the polyamide compound also make it possible to realise a robust process with higher production speeds. In this specific case, production was around 28 times faster than with filament-based fused-layer modeling (FLM) processes. Acromide is also available in granule sizes of 1 mm x 1 mm to improve metering, feed behavior and residence times.

Extensive material investigations at the IKV have shown that the properties of components based on semi-crystalline polymers are strongly dependent on temperature control. An essential advantage of plasticising, additive-manufacturing processes is the strong orientation of molecules and existing fibers. The alignment generates high anisotropic mechanical properties of the deposited strand (Fig. 2).

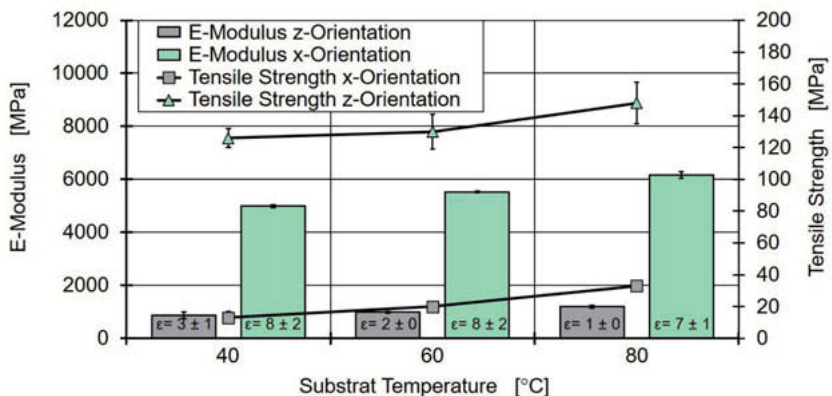


Fig 2: Resulting mechanical properties depending on substrate temperature and orientation.

Even in comparison to injection molding, similar strengths in fiber orientation can be achieved. In contrast to FLM, screw-based additive production also has higher discharge pressures (usually up to several 100 bar). This allows the processing of thermoplastics with higher filler contents and increases the mechanical properties of the deposited material. With a consistent 3D printing approach, as is possible with the 6-axis kinematics used here, this anisotropy can be used specifically for load-path-oriented material application.

Based on these investigations, Akromid B3 ICF 30 9 AM black (7451) is offered as an optimized modification of the series compound.

2.3 Possible scaling of throughput to influence productivity

In addition to the possible processing of standard thermoplastics in granulate form, the plasticizing concept must enable scalable throughput. Suitable process parameters (such as screw speed) or geometry parameters (such as screw diameter) must be used to enable simple variation of the throughput capacity.

Product-adapted processes can only be economically optimized by a possible scaling of the throughput capacity. The process for manufacturing thick-walled pipe fittings will certainly look different (low complexity, high mass carriers) than the process for manufacturing an I-plate carrier or a bearing assembly (high complexity, medium mass outputs).

2.4 Possible scaling of installation space to increase economic efficiency

The simple scaling of installation space represents a central requirement for adapting the plant costs to the size of the parts. It must therefore be easy to vary the usable installation space. In the sense of a machine series strategy, the focus is on an overarching platform strategy.

2.5 Possible use of an open automation approach for line integration

As a rule, additive manufacturing processes are completely automated. However, this high degree of automation is currently limited to the additive manufacturing process and rarely extends beyond it. Although there are initial approaches to line integration, these are more likely to be additional plant technology for linking existing additive production plants. On the other hand, it would be advantageous if the automation solutions already installed in the additive production line could be used for line integration.

In addition to the flexible use of the existing positioning system in an additive production line, the use of various tools (extruder, milling cutter, gripper, etc.) in an interlinked process represents a central requirement. Only by combining different manufacturing processes to meet the requirements can a holistically economical process be mapped.

With SEAM as part of a hybrid manufacturing approach, a concept is presented that delivers a novel approach for the economical generation of geometrically complex, large-format components from any thermoplastic material.

The challenge of easy integration of different manufacturing processes in a flexible production environment is one of the areas of research being addressed at the research campus

ARENA2036 ('Active Research Environment for the Next Generation of Automobiles') by the DLR and other research and industry partners. One approach under investigation is for parts to be transported autonomously on the shop floor by automated guided vehicles (AGV) in order to undergo their manufacturing steps at the various stations. In combination with the use of an additive manufacturing tool on a highly flexible positioning system, this approach allows for the modification and variance diversification of standard parts without the need of manual tooling changes.

3. Hybrid manufacturing concept, new areas of application

The core of the IKV in-house development is a hybrid production cell based on screw-based extrusion. The plant allows the automated combination of additive and subtractive manufacturing processes and meets all requirements mentioned. The IKV presented it to the public for the first time at the IKV Colloquium 2016 and then at K 2016. Since then the technology has been continuously further developed by Yizumi (Fig. 3).

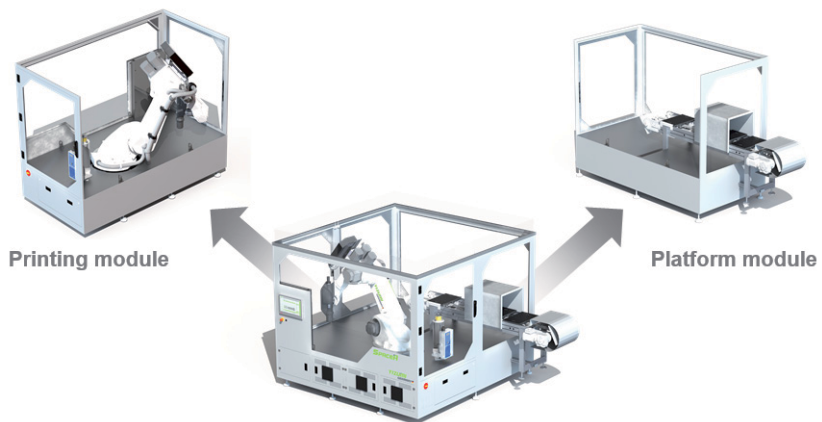


Fig. 3: Yizumi's machine design to combine the advantages of standard machine designs and automation cells

A 6-axis industrial robot is used as the positioning system, which overcomes the usual limitations of part size and design complexity. In order to ensure reproducible dimensional accuracy and high surface quality while at the same time not limiting component complexity, subtractive processes (e.g. milling, drilling) are integrated into the product development process. Thus, additive construction and machining are combined in one manufacturing system.

Based on this approach, it is also possible to integrate inserts such as threaded or bearing bushes, injection-molded components, electronic or ceramic inserts and to equip the component under construction with additional functions. For this purpose, the drive used for extrusion and machining operations is equipped with a standardized tool-changing system and enables a high degree of automation and flexibility.

The system series is characterized by a high degree of modularity. It is possible to implement systems of various sizes on the basis of this platform approach. The division of the system into a printing module and a platform module also allows the individual modules to be manufactured as a standardized machine. This combines the advantages of a machine approach with the advantages of a 6-axis robot-guided automation unit.

The central screw-based plasticizing unit is operated with plastic granulate. Compared to filament-based production processes, this enables the processing of both unfilled and highly filled plastic compounds with simultaneously high and scalable throughputs. In addition to the increased throughput, a significantly lower price of granulate (approx. 1 to 8 €/kg) compared to filament (approx. 20 to 500 €/kg) results, depending on the material, when processing engineering thermoplastics. As with all manufacturing processes, the results depend on the process capability of the material used. This essentially concerns the aspects of dimensional accuracy (shrinkage gears) and mechanical properties (adhesion gears). The material developers have now been asked which materials already qualified for other series processes are also suitable for additive manufacturing.

4. Yizumi runs the industrialization

The concept of the plant integrates methods of additive manufacturing for functionalization in existing production chains, for example, of injection-molding or die-casting components. In this way, multi-material applications can also be produced cost-effectively by combining an injection-molding process with additive production. For example, housing components can be manufactured with local sealing or reinforcing elements. Today, this would require a multi-component process with two injection-molding machines including two molds. In the future, the combination of an injection-molding process with an additive production system will make local reinforcements possible. The high productivity of the system technology shown here allows sealing beads or reinforcing structures to be applied to the component at the same rate as the injection-molding machine. This makes it possible to save on a second injection-molding machine and significantly reduce mold costs. At the same time, production flexibility is increased, enabling economical production of product variants. Overall this technology

enables promising applications in the sector of plastics processing and thereby in the automotive industry.

5. Applications in the automotive industry

Due to the automated 6-axis robot system, SEAM offers the opportunity to produce geometrically complex, large-scale parts from thermoplastic polymers. The use of established, series-production-qualified injection-molding granules, including granules with a high percentage of fiber reinforcement, leads to economical and mechanical advantages compared to other additive manufacturing process (e.g. FDM, SLS). The characteristics of the previously described SEAM process create new possibilities of applications for the automotive industry with regard to Rapid Manufacturing and large-format Rapid Prototyping.

5.1 Rapid Manufacturing

In 2018, SMP in Bötzingen, Germany, part of the Motherson Group, conducted a concept study to showcase a large-format structural part produced by additive manufacturing. Inspired by nature, the bionic structure (Fig. 4) is topology-optimized in order to achieve high mechanical performance and exploit the lightweighting potential of AM. The design includes a high level of functional integration by combining the crossbeam, air ducts and mounting points for airbags, steering column, displays and covers.

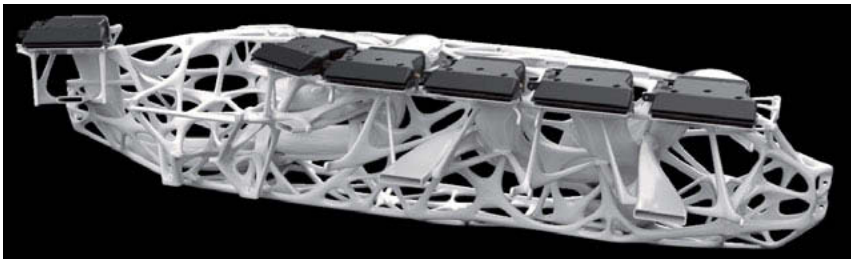


Fig. 4: Bionic carrier structure for instrument panels, SPE Innovation Award 2018, developed by SMP Deutschland GmbH

The goals of this visionary project, a high degree of functional integration, lightweight construction, material efficiency and resistance to serial loads, were achieved. The SPE organization appreciated the engineering effort and in 2018 awarded the bionic structure the SPE Innovation Award for structural components.

However, the series production of such a carrier structure is currently limited by several factors. In most of the AM processes the build volume is small in comparison to the required part size of >1400 mm for instrument panels. Similarly, the production time of large objects is too long due to the low material throughput. Furthermore, the mechanical properties required for structural parts can only be met by fiber-reinforced polymers, which are only available at high cost for the FDM and SLS processes. The SEAM technology can overcome these limitations, since part size is not an issue (6-axis robot system) and highly reinforced polymer granules can be used, which are available at a generally acceptable price level. Hence, the new target is to combine the design of topology-optimized additively manufactured parts with the design guidelines of the SEAM process.

A further application of SEAM is the production of structural or decorative carrier parts for interior and exterior components for small part quantities and limited special editions. Moreover, individualized components can be produced. The Motherson Group has developed a process for applying real wood and real stone to a polymer carrier, enabling the production of a variety of premium decorative elements in an automotive cockpit. This technology makes it possible for OEMs and customers to choose from a wide range of wood and stone types (Fig. 5) for decorative trims in vehicle interiors, according to their own taste.

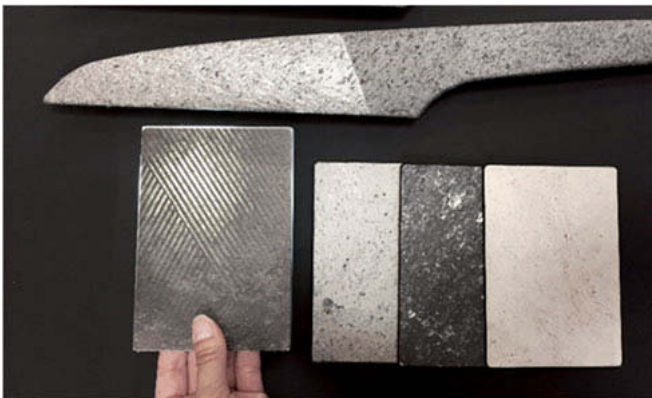


Fig. 5: Decorative stone trim

However, there is a technical challenge here since every type of wood and stone has a different surface thickness, varying from 0.3 to 0.9 mm. The carrier must always be adjusted accordingly, to avoid any deviation from the given surface of a trim part. An injection-molding

tool can be used to produce the carrier of wood and stone types of similar thicknesses, but in order to provide the customer with the entire product range of wood and stone available (e.g. for individualization and special editions), it can become economically viable to use SEAM for the production of the different carrier structures instead of injection molding in several tools.

5.2 Rapid Prototyping of large-format parts

The Motherson group is inter alia a supplier for instrument panels, door panels and bumpers. The serial development of these large components is divided into various development steps (e.g. concept, prototyping, industrialization and production) in order to produce an optimal product for the customer.

SEAM can be an option to support serial development during the prototyping phase. The pellet extruder is able to process injection-molding materials (granules) known from serial production and part sizes >1400 mm can be realized using this technology. The idea is to print large-format prototypes which are ready for testing in order to support the results of simulations. In the future, a goal has to be the reduction of the total number of prototype tools to a certain extent to save engineering costs. In addition, the combination of digital simulation and verification by means of 3D-printed prototypes would accelerate the prototyping phase, since 3D printing of the parts is faster than creating prototype injection molds. Moreover, the pellet-extrusion additive manufacturing parts could offer for example the possibility to test assembly sequences of attachments or to determine adhesive properties at an early stage, since the same granulate can be processed in 3D-printed prototype parts and injection-molded serial production parts. Samples of large-format parts can be created at a lower price than today for e.g. customer presentations or discussions in engineering meetings.

The major challenge at the moment is the comparability between 3D-printed parts and injection-molded parts in terms of mechanical properties. Additively manufactured parts produced with serial injection-molding materials do not have the same mechanical properties as they would have with the injection-molding technology. First of all, the anisotropic characteristics and the weakness of 3D-printed parts in the z-direction between the individual layers must be eliminated, especially when working with semi-crystalline and fiber-reinforced polymers. In a first step, processing conditions need to be optimized, such that the melted, freshly deposited polymer layer partially melts the previous layer and forms a bond between the layers that is equivalent to the in-layer properties. Both the AM-processing parameters and the polymer properties, particularly the melting and crystallization temperatures, need to be adjusted. Material producers and machine manufacturers are called on to make progress in this area.

Furthermore, a material/processing database has to be developed to identify similarities and establish confidence levels when comparing additively manufactured parts and injection-molded parts with regard to mechanical properties. The database can be used to find appropriate 3D-printing material and process combinations for representing injection-molding materials. Based on such a scenario, prototype parts with mechanical properties comparable to injection molding could be 3D-printed and tested, thereby creating information for serial production and speeding up the product development process by eliminating the time for making prototype injection molds. The respective AM materials may not necessarily be of the same polymer groups but the important aim is to create additively manufactured parts with properties close to injection-molded parts and enable test behaviors to directly compare the respective processing method.

6. Part design and process planning

At the beginning it was explained that the triangle of component design, process technology and material technology must be mastered. With this in mind, the following section deals with component design. The economic efficiency of a process is also basically determined by the component design. If the design matches the process used, economic advantages can be exploited. However, if the component is not designed for production, this is usually accompanied by a reduction in economic efficiency. This is especially impactful in the field of vector-based additive manufacturing. Here, each voxel to be produced is approached individually by an application unit. If a component now has many breakthroughs or the need for supports, due to overhangs, the productivity of the system is greatly reduced. This is essentially due to the fact that, depending on the component design, the system uses less time for the actual component production than for switching between production points. This means that when designing a component to be produced as an additive, care should be taken to ensure that the application unit produces the component continuously and uninterrupted and that little or no non-productive time occurs.



Fig. 6: Topology-optimized design for pellet extrusion additive-manufacturing processes

This can be illustrated by the example of a bicycle frame. The bicycle frame shown in Fig. 6 has been designed solely with regard to the manufacturing process. The frame is manufactured completely in vase mode except for the compact underside. The vase mode describes a spiral structure of the product. This allows the extruder to work in a continuous and therefore easily controllable environment. In addition, non-productive times are completely avoided. This leads to an increase in line efficiency. The resulting structure is at the same time very stiff due to the very thick-walled construction and offers the required strength. The advantages of the process must be exploited in order to also be able to benefit from the maximum economic advantages. These include:

- Free wall thickness: Thick wall thicknesses can be produced without cycle time loss. Wall thickness jumps in any spatial direction are also conceivable.
- Use of surface moments of inertia: Due to the design freedom of the additive manufacturing process, hollow-chamber structures can be expanded or combined. This allows the geometric stiffness to be specifically adapted.

Currently, the majority of AM processes only allow the stacking of flat layers in the vertical direction, which can be described as a 2.5D approach. Taking it one step further and out of the 2.5D manufacturing into a true 3D manufacturing, of which the previously presented Space A system is capable, the process planning task is moving from essentially a set of fairly independent 2D path planning problems to a 3D path planning problem of much higher

complexity. To control this complexity the aforementioned design guidelines need to be expanded and ideally implemented in CAD software as a support for product designers and engineers. For this, the capabilities and restrictions of the manufacturing system must be defined and made available in design (CAD) and process planning/simulation (CAM) software. Furthermore, different optimization goals should be available, such as the minimization of production time or maximum part strength/stiffness (e.g. by taking advantage of the inherent anisotropy). These topics are part of the current research at the DLR Institute of Vehicle Concepts.

In the future additive manufacturing machines will give us further advantages if the industry is able to integrate current software possibilities. For this reason, a digital and automated design phase of parts as well as a shared-production approach is the vision to be pointed out here. Using new CAD/CAM routines to create load-path-dependent and manufacturing fitting designs can be named as the first aspect to integrate for easy adaption. This is important because the bottleneck in variant production and lean production will not be in production time but in preparation time. The second aspect to integrate is the use of a cyber-physical production system, where the additive manufacturing machine is only one step in an overall manufacturing approach. Only by using all current software advantages in combination with the possible local manufacturing on demand by means of AM can lead to the complete utilization of the potentials of additive manufacturing processes.

7. Partners

7.1 Akro-Plastic GmbH

Akro-Plastic GmbH is your specialist for innovative and application-oriented plastic compounds. With over 30 years' experience, our comprehensive knowledge of plastic compounding is progressively growing due to the close cooperation with our sister company Feddem (manufacturer of our globally used identical extrusion equipment).

With almost 500 employees in Europe, Asia and South America, we are producing over 165,000 tons of engineering plastic compounds each year and are constantly developing innovative new solutions to make our customers more successful.

We are focusing on high-strength material long- and short-fiber-reinforced as well as highly impact-modified. We differentiate in our market, having the tightest tolerances in place due to our ICX® Technology (innovative compounding and extrusion technology) that enables our customers to produce more competitively and efficiently.

As part of the K.D.Fedderson group, which supports the Feddersen foundation, Akro-Plastic is your long-term focused partner.

7.2 DLR Institute of Vehicle Concepts

The German Aerospace Center (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; DLR) is the national aeronautics and space research center of the Federal Republic of Germany. Its extensive research and development work in aeronautics, space, energy, transport, security and digitalization is integrated into national and international cooperative ventures. As part of the DLR Transport Program, the Institute of Vehicle Concepts researches, develops and evaluates new vehicle concepts and technologies in light of future demands on the transportation system.

One of the technologies being researched in this context is additive manufacturing. This is conducted in the Future Lab for Additive Manufacturing (FLAME), located inside the ARENA2036 research campus in Stuttgart. The lab consists of polymer-based additive manufacturing machines, one powder-bed, using the high-speed sintering (HSS) process, and one Space A SEAM manufacturing cell. This Space A version is especially equipped for research purposes, including extensive process monitoring and quality control systems, as well as the necessary tools for integration into the flexible production environment inside ARENA2036. The goal of FLAME is to push the development of additive manufacturing technologies with a focus on providing partners with know-how and digital tools to extend the use of AM beyond prototyping and to enable applications in the manufacturing of series parts. The range of applications pursued is focused on but not limited to vehicle parts for road and rail. Beside the AM technology, the DLR Institute of Vehicle Concepts also provides testing capabilities such as static and dynamic coupon and component testing, as well as a crash test facility.

7.3 Samvardhana Motherson Peguform (SMP)

SMP is a leading expert in plastic technologies and a system partner to the automotive industry. As a specialist in cockpits, door panels, bumper modules and innovative plastic vehicle body parts, SMP has successfully established a footprint in Europe, China, Mexico, Brazil and USA, supplying well-known automotive manufacturers. More than 14,000 employees in 36 locations around the globe are dedicated to meeting the complex demands of both today's and tomorrow's automotive industry in terms of quality, safety, aesthetics and economic efficiency. Global networking guarantees benefits to the whole group, including highly successful processes and vast industry expertise. In 2018/2019, SMP generated external reve-

nues of €3.7 billion. The company was originally founded in 1959. Since 2011, it has been a member of the Motherson group, one of the 21 largest automotive suppliers with more than 135,000 employees and external sales of USD 11.7 billion in 2018/19. For more information, please visit www.smp-automotive.com and www.motherson.com.

7.4 Yizumi Germany

Yizumi, a Chinese mechanical engineering company with 2,600 employees, manufactures injection-molding machines, die-casting machines, rubber injection-molding machines and thixomolding machines, making it the only machine manufacturer in the world to cover all areas of high-pressure molding. The company ranks second worldwide in terms of production volumes. This is to be changed in the future: Yizumi's ambitious goal is to achieve market leadership through technology-based innovations. An important key technology is additive manufacturing using standard thermoplastics. For this reason in 2018 Yizumi established Yizumi Germany GmbH in Aachen. Located on the campus of the RWTH Aachen University, Yizumi Germany can invent new technologies and organize research and development in Germany and Europe.

Abbreviations

PA	Polyamide
CF	Carbon fiber
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAD	Computer-Aided Design
AM	Additive Manufacturing
FLM	Fused-Layer Manufacturing
PEM	Pellet-Extrusion Manufacturing

Symbols

ζ	$[g/(a*\text{€})]$	Ratio of economic productivity
---------	--------------------	--------------------------------

Radiation cross-linking of plastics as a finishing process in series production

Sebastian Schmitz, Dr. Dirk Fischer,
BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG, Wiehl

Abstract

Constantly increasing requirements with regard to resource conservation and a better CO₂ balance call for lightweight materials. Plastics are often persuasive on account of their good processability and their lightweight construction potential, but depending on the application they must, among other things, withstand high temperatures and extreme conditions. The radiation cross-linking of thermoplastics opens up new possibilities in qualifying conventional plastics for such tasks.

Radiation cross-linking can improve the mechanical, thermal and chemical properties of bulk and engineering plastics using high-energy ionizing radiation such as beta radiation in such a way that they take on the properties of high-performance plastics and in certain applications can replace them. Plastic components thus achieve significantly improved properties with regard to heat resistance, stability, creep behavior and abrasion resistance.

The most commonly finished plastics are polyethylene (PE) and its copolymers, certain polyamides (PA) and polyesters such as PBT. Thermoplastic elastomers (TPE) are also gaining in importance. Some materials with low reactivity require a special cross-linking additive.

High-energy beta or gamma rays trigger chemical reactions in the plastic parts and thus lead to a cross-linking of the molecules – comparable to the vulcanization of rubbers. The durability or load-bearing capacity of the materials increases many times over.

The radiation dose determines the properties of the material within defined limits and is applied in seconds by an electron accelerator. The process is suitable both for the production of smaller quantities as well as for mass production. Since the processing parameters are electrical quantities, the process is highly reproducible. Depending on the energy of the electrons, components with a wall thickness of up to several centimeters can be penetrated by radiation, even when combined with other materials. The durability of irradiated products is remarkable: for example, metals in many functional components can be replaced by radiation-crosslinked, injection-molded plastic components (e.g. PA 66, PA 6 or PBT). This also applies to numerous components in the engine compartment, charge-air components, covers

and fastening elements, E&E applications (cable sheathing, connectors) as well as interior and exterior components.

Compared to thermoset materials, which often require extensive post-processing, or to high-performance plastics, radiation cross-linking offers enormous processing advantages at reduced costs. The original processing methods used on the raw components are retained, only the final product being treated - there is thus no need to change over production.

1. Process engineering of the electron accelerator

Beta rays are accelerated electrons and are generated by electron accelerators that are comparable to a Braun tube. A hot cathode emits electrons that are accelerated in a high vacuum in a strong electric field. In this cyclic alternating field, the electrons reach a maximum energy of 10 MeV (4.45e-19 kWh) in several stages. The electron beam emerging from the accelerator is deflected in an alternating magnetic field in such a way that it fans out before strikes the products to be irradiated.

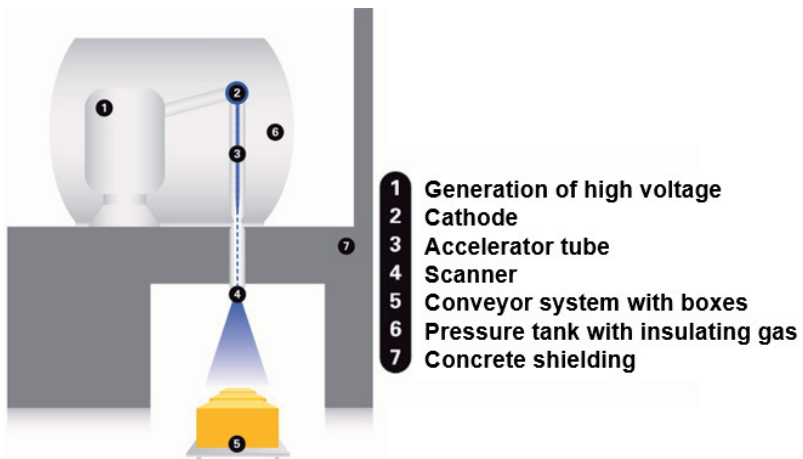


Fig. 1: Schematic structure of an electron accelerator

The products run through the radiation field on an automated transportation system. As a rule, they are guided through the irradiation process in their transportation packaging as individual boxes or as loose bulk material. This only takes a few seconds. The possible layer thickness of the irradiation material depends on the density, the packing scheme and the energy of the electrons.

2. Effects of high-energy radiation on cross-linkable plastics

Radiation cross-linking is based on the effect of high-energy beta rays. The plastic is exposed to a precisely defined dose of beta rays, thus precisely controlling the cross-linking of the plastic molecules. The material properties are precisely defined in advance and achieved through very precise irradiation. During cross-linking, the material absorbs the radiation energy. Chemical bonds are broken, free radicals are formed. In the next step they undergo the desired molecular bonding.

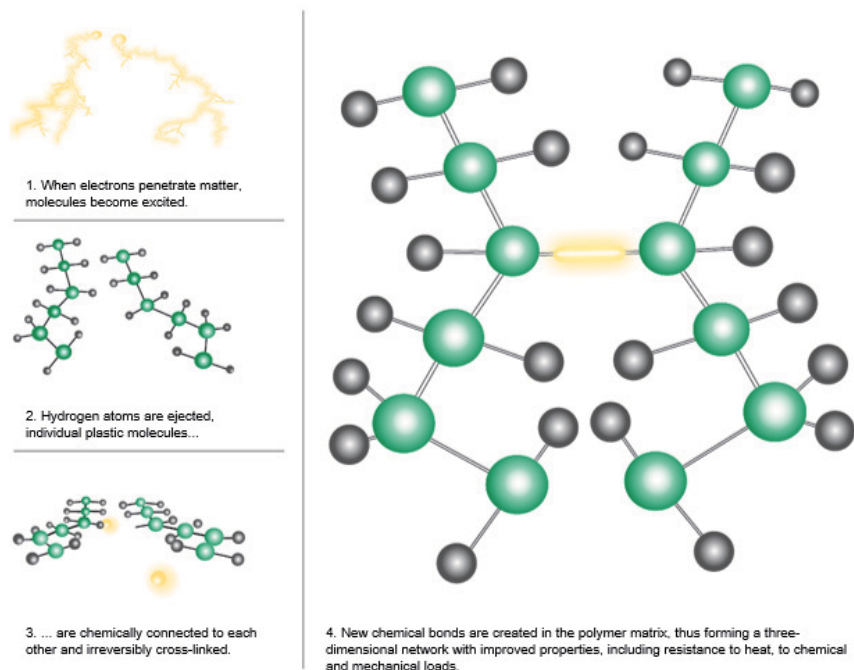


Fig. 2: Cross-linking of macromolecules

In this way an extremely loadable three-dimensional polymer network is created. Radiation cross-linking is basically suitable for plastics where chemical cross-linking using free radical initiators (e.g. peroxides) is also possible. In contrast to chemical cross-linking processes, radiation cross-linking takes place as a physical process at low temperatures. The desired results can be achieved precisely and without quality fluctuations. Most important in terms of

quantity is the cross-linking of PE, PA, polybutylene terephthalate (PBT) and polyvinyl chloride (PVC). The cross-linking of TPE is becoming increasingly important.

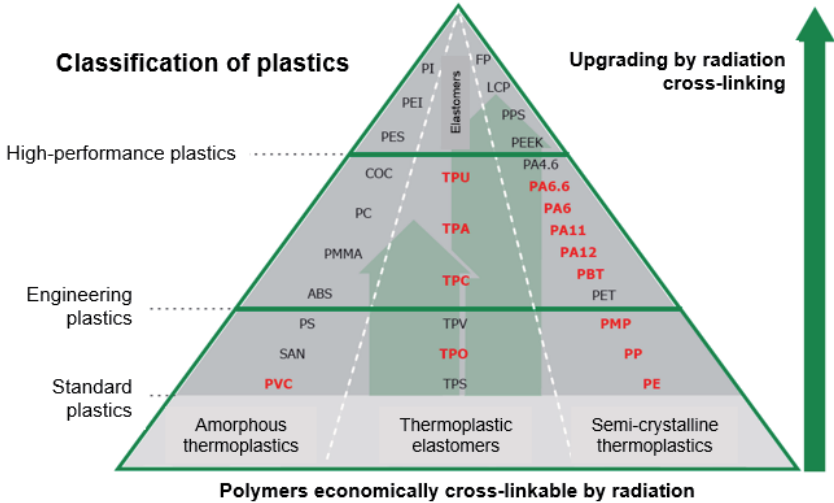


Fig. 3: Radiation-crosslinkable polymers

Radiation cross-linking gives inexpensive bulk or engineering plastics the mechanical, thermal and chemical properties of high-performance plastics. After radiation cross-linking, plastics can be used under conditions that they would otherwise not be able to withstand. Radiation cross-linking basically takes place after shaping - injection-molding, extruding, blow-molding or thermoforming is carried out as usual by the manufacturer with the usual raw materials. The range of properties that can be achieved depends on the particular base polymer used. For some plastics, special additives are required. The cross-linking additives can be added during the production of the plastic granules (compounding) or immediately before molding (e.g. master batches). The additives enable or improve crosslinkability and can further optimize the property profiles of the plastic. The cross-linking agents known from the plastics and rubber industry, such as TAIC, are used. Following irradiation, special tests for plastics are carried out in order to assess the changes effected in properties.

Table 1: Radiation-crosslinkable polymers

Radiation-crosslinkable polymers			
	Name	Cross-linking additive	
		Yes	No
Thermoplastics	Polyethylene PE (LLDPE/LDPE/MDPE/HDPE/UHMWPE)		X
	Polypropylene (PP) (homopolymers/copolymers)	X	
	Polyamide PA (PA6, PA66, PA11, PA12)	X	
	Polybutylene terephthalate (PBT)	X	
	Polyvinylidene fluoride (PVDF)	X	
	Ethylene tetrafluorethylene (ETFE)	X	
	Polyvinylchloride (PVC) (soft PVC only)	X	
	Ethylene-vinyl acetate copolymers (EVA)		X
	Chlorinated polyethylene (PE-C)		X
Thermoplastic elastomers	Polyetherester block copolymers (TPE-E)		X
	Polyurethane block copolymers (TPE-U)	X	
	Polyether-block amide-block copolymers (TPE-A)		X
Elastomers	Styrene butadiene rubber (SBR)	X	
	Silicone rubber		X

2.1. Improvements in thermal properties

Thermoplastic materials become thermoelastic during radiation cross-linking. The cross-linking reaction creates a network that prevents the plastic from flowing – at higher temperatures, the material behaves like an elastomer. The improved temperature resistance and the significantly improved mechanical characteristics at elevated temperatures are key characteristics of radiation cross-linking. Accordingly, in the case of PA66 that is not cross-linked, the moduli above the crystallite melting temperature practically drop to zero. In contrast, the much higher moduli of a cross-linked plastic ensure a sufficiently high strength even at temperatures of more than 350 °C. In addition, the coefficient of thermal expansion is reduced. A cross-linked PA66 has a temperature index improved by 20 °C (5000 h; 60% decrease in elongation at break).

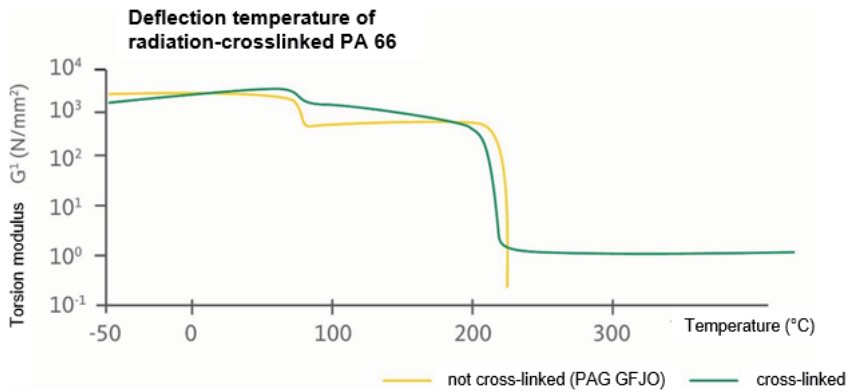


Fig. 4: Deflection temperature of radiation-crosslinked PA66

2.2 Improvement in mechanical properties

Radiation cross-linking improves the mechanical strength of reinforced plastics even at room temperature. This is primarily due to the better coupling of the fillers to the polymer matrix, which is caused by activation of the interfaces. Radiation cross-linking also increases the weld strength of vibration-welded components as well as bond strength in material combinations (e.g. polymer/polymer and polymer/metal).

2.3 Improvement in tribological properties

An important selection criterion for machine elements made of plastic is their friction and wear behavior. As the operating temperatures of slide bearings and gears keep increasing so does friction and wear shorten their service life. As a rule, the amorphous portions, which for production-related reasons are increased at the surface of the plastic parts, have unfavorable wear behavior. It is however precisely the amorphous areas that can be cross-linked especially well by radiation, which can significantly improve their wear behavior. In the case of polyamides, for example, radiation cross-linking can increase the continuous operating temperature by up to 100 ° C and prevent melting. In the case of cross-linked parts made of polyamide, significantly higher sliding speeds can be achieved with a simultaneous reduction in the wear coefficient.

2.4 Improvement in chemical properties

The cross-linking of plastics significantly reduces solubility or swelling due to solvents. This is used, for example, by the extraction test in order to determine the degree of cross-linking. The gel value determined in this way correlates directly with the degree of cross-linking: when the degree of cross-linking increases, the degree of swelling decreases at the same time. Similarly, radiation crosslinking also improves resistance to aggressive media (e.g. brake fluid) and hydrolysis. This can be seen, among other things, in improved stress-cracking resistance and a significantly reduced drop in strength after exposure to solvents.

3. Economic aspects of radiation cross-linking

A direct comparison of the procurement costs of high-performance plastics and radiation-crosslinked polymers reveals a clear potential for savings. Depending on the level of procurement costs for the particular high-performance plastic, substitution with a radiation-crosslinked material can lead to considerable direct savings.

The savings potential becomes even clearer if, in addition to the outlay on molding compound, the process costs for the manufacture of the components are also taken into consideration.

Compared to high-performance plastics, radiation-crosslinkable compounds are characterized above all by their easier processing. In particular, the lower processing temperatures of radiation-crosslinkable polymers compared to high-performance plastics have a positive effect on manufacturing costs.

Table 2: Processing temperatures of different polymers

Material	Injection temperature	Tool temperature
PEI	350–400 °C	135–170 °C
PES	330–380 °C	120–170 °C
PPS	300–370 °C	125–160 °C
PEEK	360–400 °C	150–210 °C
PA (SV)	240–290 °C	60–100 °C

Lower energy consumption, shorter cycle times and lower tool costs with a longer tool life have a direct impact on the manufacturing costs of the components. The potential of radiation cross-linking can be fully exploited if the radiation-crosslinked material is taken into ac-

count at the beginning of the development process and is not used only through a substitution process.

4. Areas of application

Plastics are becoming increasingly important as raw materials in the automotive industry. At the same time, these materials are subject to high thermal, mechanical and chemical stresses. Radiation cross-linking offers itself as a solution here, with whose help the range of uses of cheaper and already introduced materials (e.g. PA) can be expanded. This helps to save raw material costs and at the same time enables the increasing variety of raw materials to be kept within limits. If the plastics are exposed to aggressive media or high mechanical loads in addition to high temperatures, radiation cross-linking improves aging behavior. Even thermoplastic elastomers, whose use is often limited by insufficient compression sets, can be optimized by radiation cross-linking so that they meet the high requirements in vehicle construction. Other possible applications are, for example, elastomer seals that are manufactured by two-component injection molding and then cross-linked by radiation. Assuming a suitable material combination, the housing and the injected TPE seal are cross-linked in a single operation.

4.1 Metal replacement / lightweight construction

Fastening elements such as screws and nuts, brackets or clips made of metal can be substituted with radiation-crosslinked polyamide. The large number of fasteners used in and on the vehicle and a possible weight reduction by a factor of more than 5 offer potential savings in terms of total weight and manufacturing costs (metal machining vs. injection molding). Load-bearing body components made of thermoplastic fiber-composite materials are also conceivable.

4.2 Organic sheets

Multi-material modes of construction should meet the requirements placed on them at minimal weight. Thermoplastic organic sheets are also becoming more important in high-volume production. Radiation cross-linked components, which are stronger and have a higher heat resistance, accelerate the processes in 3D thermoforming.

4.3 LED technology

Temperature development is greater in LED headlights than in conventional headlight systems due to their compact design and power electronics. The requirements profile for hous-

ing components and especially for the reflectors is changing significantly – and can be met through radiation cross-linking.

4.4 Vehicle electrical system

Some electric vehicles have 800V batteries that can be charged at up to 350 kilowatts at fast-charging stations. When direct current is used, the current strength can be up to 500 amps. Likewise, energy transfer from the battery to the drive calls for cable systems with large conductor cross-sections and temperature-resistant insulation materials.

4.5 Autonomous driving

Assistance systems are the basis for automated driving functions. Servomotors perform a wide range of tasks: for example, in lane-departure warning systems, throttle control for adaptive cruise control, in electrical braking systems or automatic transmissions. These motors must be compact, light, quiet and durable or maintenance-free.

The requirements applicable to the materials for transmissions and sliding components, such as gears, bearing bushes and plain bushes, are changing significantly. Radiation cross-linked components can here offer an economic alternative to metallic materials or expensive polymers (PEEK, PAI etc.).

5. Cross-linked components in series production

Cross-linked plastics are already in series production today at well-known automobile manufacturers. The areas of application include, for example, blow-by pipes in internal combustion engines, which discharge complex mixtures of oil, exhaust gas, unburned fuel and water from the crankshaft housing. The requirements regarding temperature and chemical resistance are correspondingly high. Polyamide (PA6, PA66) is used here. Other examples include hydrogen tanks with PE in-liners, axle boots, bellows, air ducting elements, brackets and fastening clips made by two-component injection molding, or plain and roller bearings, in which improved tribological properties lead to reduced abrasion and wear and less tendency to creep. The so-called glow wire test allows a relative comparison of the ignitability of different materials. A measuring device presses a glowing wire tip onto the component. While a conventional plastic is penetrated in seconds and ignites at the filament, treated materials withstand this.

Using irradiated parts and components in series production requires that the associated processes run smoothly and, above all, quickly. Compared to thermoset materials, which often

require extensive post-processing, or to high-performance plastics, radiation cross-linking offers enormous processing advantages at reduced costs. The original processing methods used with the raw components are retained, only the final product being treated - there is thus no need to change over production. Radiation cross-linking is the last step after shaping and can be integrated into the production chain on the way to the end customer. It is important that all project participants work together right from the start: from the plastic supplier to the manufacturer.

Strahlenvernetzung von Kunststoffen als Veredelungsprozess in der Serienproduktion

Sebastian Schmitz, Dr. Dirk Fischer,
BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG, Wiehl

Kurzfassung

Stetig wachsende Anforderungen hinsichtlich Ressourcenschonung und einer besseren CO₂-Bilanz erfordern leichte Werkstoffe. Kunststoffe überzeugen oft mit ihrer guten Verarbeitbarkeit und ihrem Leichtbaupotenzial, müssen jedoch je nach Anwendung unter anderem hohen Temperaturen und extremen Bedingungen standhalten. Um herkömmliche Kunststoffe für entsprechende Aufgaben zu qualifizieren, eröffnet die Strahlenvernetzung thermoplastischer Kunststoffe neue Möglichkeiten.

Durch Strahlenvernetzung lassen sich die mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften von Massen- und technischen Kunststoffen mittels energiereicher ionisierender Strahlung wie Betastrahlung derart verbessern, dass sie Eigenschaften von Hochleistungskunststoffen annehmen und diese in bestimmten Anwendungen ersetzen können. Damit erreichen Kunststoffkomponenten signifikant verbesserte Eigenschaften hinsichtlich Hitzebeständigkeit, Stabilität, Kriechverhalten und Abriebfestigkeit.

Die am häufigsten veredelten Kunststoffe sind Polyethylen (PE) und seine Copolymere, bestimmte Polyamide (PA) und Polyester wie PBT. An Bedeutung gewinnen auch die thermoplastischen Elastomere (TPE). Einige Werkstoffe mit geringer Reaktivität benötigen dazu ein spezielles Vernetzungsadditiv.

Energereiche Beta- oder Gammastrahlen lösen chemische Reaktionen in den Kunststoffteilen aus und führen so zu einer Vernetzung der Moleküle – vergleichbar mit der Vulkanisation bei Kautschuken. Die Haltbarkeit beziehungsweise Belastbarkeit der Werkstoffe erhöht sich dadurch um ein Vielfaches.

Die Strahlendosis bestimmt innerhalb definierter Grenzen die Eigenschaften des Werkstoffs und wird mittels Elektronenbeschleuniger innerhalb von Sekunden aufgebracht. Das Verfahren eignet sich sowohl für die Herstellung kleinerer Stückzahlen als auch für die Massenproduktion. Da es sich bei den Verarbeitungsparametern um elektrische Größen handelt, ist der Prozess hoch reproduzierbar. Abhängig von der Energie der Elektronen lassen sich Bauteile von bis zu mehreren Zentimetern Wandstärke durchstrahlen, auch im Verbund mit anderen Werkstoffen. Die Haltbarkeit bestrahlter Produkte ist beachtlich: Beispielsweise lassen sich

Metalle in vielen Funktionsbauteilen durch strahlenvernetzte, spritzgegossene Bauteile aus Kunststoff (z. B. PA 66, PA 6 oder PBT) ersetzen. Dies gilt ebenso für zahlreiche Bauteile im Motorraum, Ladeluftkomponenten, Abdeckungen und Befestigungselemente, E&E-Anwendungen (Kabelummantelungen, Steckverbinder) sowie Komponenten im Interieur- und Exterieurbereich.

Verglichen mit Duroplastwerkstoffen, die oft eine aufwendige Nachbearbeitung erfordern, oder Hochleistungskunststoffen bietet die Strahlenvernetzung dabei enorme Verarbeitungsvorteile bei reduzierten Kosten. Die ursprünglichen Verarbeitungsverfahren der Rohbauteile bleiben erhalten, nur das Endprodukt wird behandelt – die Produktion muss also nicht umgestellt werden.

1. Verfahrenstechnik des Elektronenbeschleunigers

Bestrahlen sind beschleunigte Elektronen und werden durch Elektronenbeschleuniger erzeugt, die mit einer Braun'schen Röhre vergleichbar sind: Eine Glühkathode emittiert Elektronen, die im Hochvakuum in einem starken elektrischen Feld beschleunigt werden: In diesem zyklischen Wechselfeld erreichen die Elektronen in mehreren Stufen eine maximale Energie von 10 MeV (4,45e-19 kWh). Der aus dem Beschleuniger austretende Elektronenstrahl wird in einem magnetischen Wechselfeld so abgelenkt, dass er aufgefächert auf die zu bestrahlenden Produkte trifft.

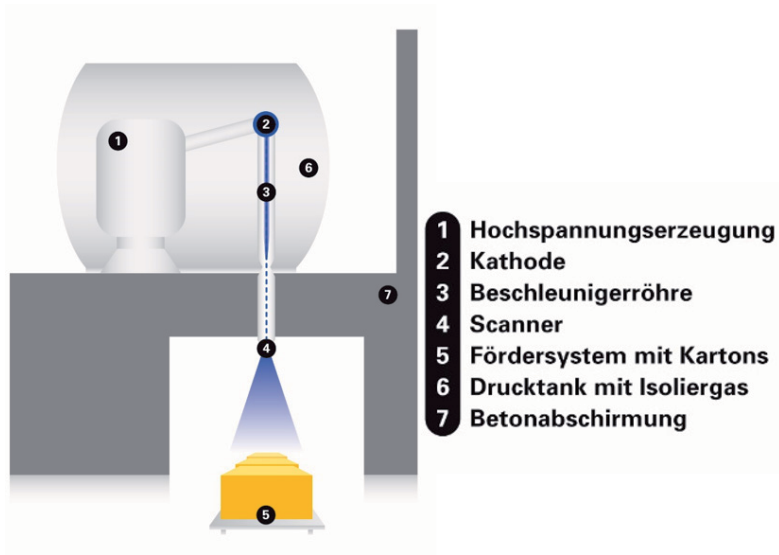


Bild 1: Schematischer Aufbau Elektronenbeschleuniger

Die Produkte laufen mithilfe einer automatisierten Transportanlage durch das Bestrahlungsfeld. In der Regel werden sie in der Transportverpackung als einzelne Kartons oder loses Schüttgut durch den Bestrahlungsprozess geführt. Dieser dauert nur wenige Sekunden. Die mögliche Schichthöhe des Bestrahlungsgutes hängt dabei von der Dichte, dem Packschema und der Energie der Elektronen ab.

2. Auswirkungen hochenergetischer Strahlung auf vernetzbare Kunststoffe

Die Strahlenvernetzung beruht auf der Wirkung hochenergetischer Betastrahlen. Der Kunststoff wird einer exakt festgelegten Dosis an Betastrahlen ausgesetzt und so die Vernetzung der Kunststoffmoleküle präzise gesteuert. Die Materialeigenschaften werden im Voraus genau definiert und durch die punktgenaue Bestrahlung erreicht. Bei der Vernetzung absorbiert das Material die Strahlungsenergie. Chemische Bindungen werden gespalten, es entstehen freie Radikale. Diese gehen im nächsten Schritt die gewünschte Molekularverbindung ein.

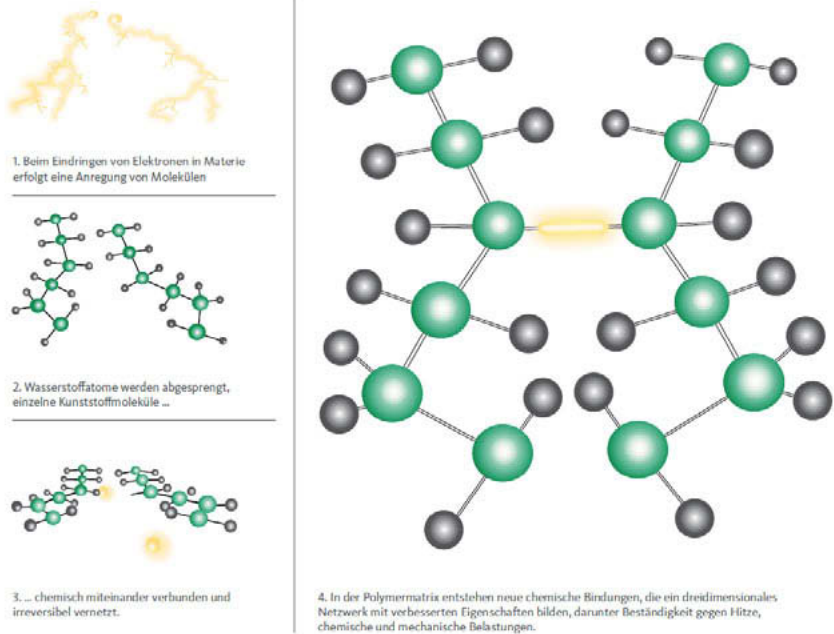


Bild 2: Darstellung Vernetzung Makromoleküle

So entsteht ein extrem belastbares dreidimensionales Polymernetzwerk. Die Strahlenvernetzung eignet sich grundsätzlich für Kunststoffe, bei denen auch die chemische Vernetzung mittels radikalischer Initiatoren (z. B. Peroxiden) möglich ist. Anders als bei den chemischen Vernetzungsverfahren findet die Strahlenvernetzung als physikalisches Verfahren bei niedrigen Temperaturen statt. Die gewünschten Ergebnisse lassen sich exakt und ohne qualitative Schwankungen erreichen. Mengenmäßig am bedeutendsten ist die Vernetzung von PE, PA, Polybutylenterephthalat (PBT) und Polyvinylchlorid (PVC). Die Vernetzung von TPE gewinnt zunehmend an Bedeutung.

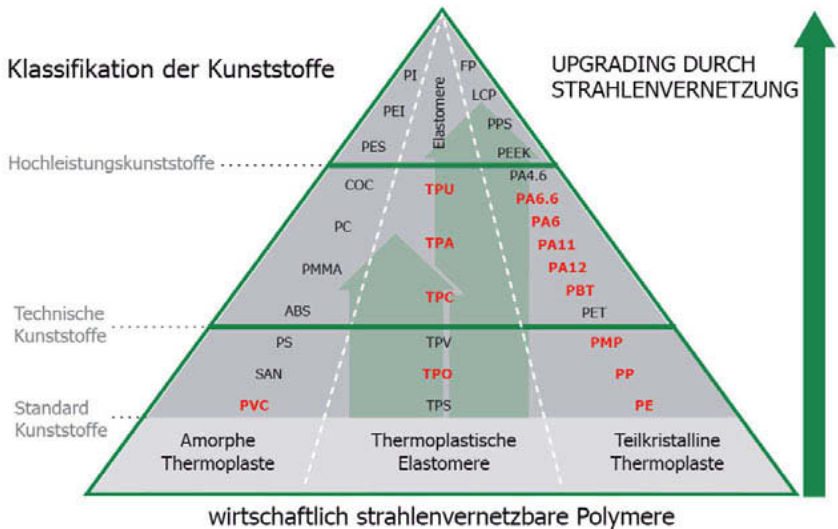


Bild 3: Strahlenvernetzbare Polymere

Die Strahlenvernetzung verleiht preiswerten Massen- oder technischen Kunststoffen die mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften von Hochleistungskunststoffen. Nach der Strahlenvernetzung können Kunststoffe unter Bedingungen eingesetzt werden, denen sie ansonsten nicht standhalten würden. Die Strahlenvernetzung findet grundsätzlich nach der Formgebung statt – das Spritzgießen, Extrudieren, Blas- oder Thermoformen nimmt je gewohnt der Hersteller mit den üblichen Rohstoffen vor. Welches Eigenschaftsspektrum sich erzielen lässt, hängt vom jeweiligen Basispolymer ab. Für einige Kunststoffe sind spezielle Additive erforderlich. Die Zugabe der Vernetzungsadditive kann bei der Herstellung des Kunststoffgranulates (Compoundieren) oder unmittelbar vor der Formgebung (z. B. Masterbatches) erfolgen. Die Additive ermöglichen oder verbessern die Vernetzbarkeit und können die Eigenschaftsprofile des Kunststoffs weiter optimieren. Zum Einsatz kommen die aus der Kunststoff- und Kautschukindustrie bekannten Vernetzungshilfen wie TAIC. Zur Beurteilung der erzielten Eigenschaftsveränderungen erfolgen im Anschluss an die Bestrahlung spezielle Kunststoffprüfungen.

Tabelle 1: Strahlenvernetzbare Polymere

Strahlenvernetzbare Polymere			
	Bezeichnung	Vernetzungsadditiv	
		Ja	Nein
Thermoplaste	Polyethylen PE (LLDPE/LDPE/MDPE/HDPE/UHMWPE)		X
	Polypropylen PP (Homo-/Copolymere)	X	
	Polyamid PA (PA6, PA66, PA11, PA12)	X	
	Polybutylenterephthalat PBT	X	
	Polyvinylidenfluorid PVDF	X	
	Ethylen-Tetrafluorethylen ETFE	X	
	Polyvinylchlorid PVC (nur Weich-PVC)	X	
	Ethylvinylacetat-Copolymere EVA		X
	Chloriertes Polyethylen (PE-C)		X
Thermoplastische Elastomere	Polyetherester-Blockcopolymere (TPE-E)		X
	Polyurethan-Blockcopolymere (TPE-U)	X	
	Polyether-Block-Amid-Block-Copolymer (TPE-A)		X
Elastomere	Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)	X	
	Silikonkautschuk		X

2.1. Thermische Eigenschaftsverbesserungen

Thermoplastische Materialien werden bei der Strahlenvernetzung thermoelastisch. Durch die Vernetzungsreaktion entsteht ein Netzwerk, das die Fließfähigkeit des Kunststoffes unterbindet – bei höheren Temperaturen verhält sich das Material wie ein Elastomer. Die verbesserte Temperaturbeständigkeit und die bei erhöhten Temperaturen deutlich verbesserten mechanischen Kennwerte sind wesentliche Kennzeichen der Strahlenvernetzung. Demnach fallen bei unvernetztem PA66 die Moduln oberhalb der Kristallitschmelztemperatur praktisch auf null. Dagegen gewährleisten die wesentlich höheren Moduln eines vernetzten Kunststoffes eine ausreichend hohe Festigkeit auch bei Temperaturen von mehr als 350 °C. Zusätzlich verringert sich der thermische Ausdehnungskoeffizient. Ein vernetztes PA66 weist einen um 20 °C verbesserten Temperaturindex auf (5.000 h; 60 % Abfall der Bruchdehnung).

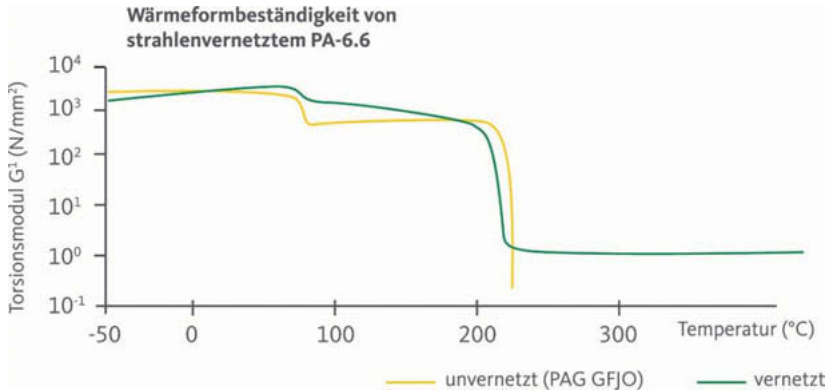


Bild 4: Wärmeformbeständigkeit von strahlenvernetztem PA66

2.2 Mechanische Eigenschaftsverbesserung

Die Strahlenvernetzung verbessert die mechanische Festigkeit verstärkter Kunststoffe schon bei Raumtemperatur. Hierzu trägt vor allem die bessere Ankopplung der Füllstoffe an die Polymermatrix bei, die durch eine Aktivierung der Grenzflächen verursacht wird. Auch die Schweißnahtfestigkeit an vibrationsgeschweißten Bauteilen sowie die Verbundfestigkeit zwischen Materialkombinationen (z. B. Polymer/Polymer und Polymer/Metall) werden durch die Strahlenvernetzung erhöht.

2.3 Tribologische Eigenschaftsverbesserung

Ein wichtiges Auswahlkriterium für Maschinenelemente aus Kunststoff ist deren Reibungs- und Verschleißverhalten. Bei immer höheren Einsatztemperaturen von Gleitlagern und Zahnrädern verkürzen Reibung und Verschleiß ihre Lebensdauer. In der Regel weisen die herstellungsbedingt in der Oberfläche der Kunststoffteile erhöhten amorphen Anteile ein ungünstiges Verschleißverhalten auf. Gerade die amorphen Bereiche sind besonders gut strahlenvernetzbar, wodurch sich ihr Verschleißverhalten deutlich verbessern lässt. Bei Polyamiden beispielsweise kann die Strahlenvernetzung die Dauereinsatztemperatur um bis zu 100 °C erhöhen und ein Aufschmelzen verhindern. Bei vernetzten Teilen aus Polyamid lassen sich wesentlich höhere Gleitgeschwindigkeiten bei gleichzeitig reduziertem Verschleißkoeffizienten erzielen.

2.4 Chemische Eigenschaftsverbesserung

Die Vernetzung von Kunststoffen verringert die Löslichkeit beziehungsweise die Quellung durch Lösungsmittel deutlich. Dies wird beispielsweise zur Bestimmung des Vernetzungsgrads durch den Extraktionsversuch genutzt. Der so ermittelte Gel-Wert korreliert direkt mit dem Vernetzungsgrad: Nimmt der Vernetzungsgrad zu, sinkt gleichzeitig der Quellungsgrad. Gleichermaßen verbessert die Strahlenvernetzung die Beständigkeit gegen aggressive Medien (z. B. Bremsflüssigkeit) und Hydrolyse. Dies zeigt sich unter anderem in verbesserter Spannungsrisssbeständigkeit und deutlich reduziertem Festigkeitsabfall nach Einwirkung von Lösungsmitteln.

3. Wirtschaftliche Aspekte der Strahlenvernetzung

Ein direkter Vergleich der Beschaffungskosten von Hochleistungskunststoffen und strahlenvernetzten Polymeren zeigt ein deutliches Einsparpotenzial. Je nach Höhe der Beschaffungskosten für den jeweiligen Hochleistungskunststoff kann die Substitution durch ein strahlenvernetztes Material zu erheblichen direkten Einsparungen führen.

Noch deutlicher wird das Einsparpotenzial, wenn neben den Aufwendungen für das Granulat auch die Prozesskosten für die Herstellung der Bauteile betrachtet werden.

Gegenüber Hochleistungskunststoffen zeichnen sich strahlenvernetzbare Compounds vor allem durch ihre einfachere Verarbeitung aus. Insbesondere die geringeren Verarbeitungstemperaturen strahlenvernetzbarer Polymere im Vergleich zu Hochleistungskunststoffen wirken sich positiv auf die Herstellungskosten aus.

Tabelle 2: Verarbeitungstemperaturen unterschiedlicher Polymere

Werkstoff	Spritztemperatur	Werkzeugtemperatur
PEI	350–400 °C	135–170 °C
PES	330–380 °C	120–170 °C
PPS	300–370 °C	125–160 °C
PEEK	360–400 °C	150–210 °C
PA (SV)	240–290 °C	60–100 °C

Geringerer Energieverbrauch, kürzere Zykluszeiten sowie niedrigere Werkzeugkosten bei einer längeren Standzeit haben einen direkten Einfluss auf die Herstellungskosten der Bauteile.

Das Potenzial der Strahlenvernetzung lässt sich maximal ausschöpfen, wenn das strahlenvernetzte Material zu Beginn des Entwicklungsprozesses berücksichtigt wird und nicht erst durch einen Substitutionsprozess zur Anwendung kommt.

4. Anwendungsbereiche

Kunststoffe werden als Rohstoffe in der Automobilindustrie immer wichtiger. Gleichzeitig unterliegen die Materialien hohen thermischen, mechanischen und chemischen Beanspruchungen. Hier bietet sich die Strahlenvernetzung als Lösung an, mit deren Hilfe sich das Einsatzspektrum kostengünstigerer und bereits eingeführter Materialien (z. B. PA) erweitern lässt. Dies hilft, Rohstoffkosten zu sparen, und ermöglicht gleichzeitig, die steigende Vielfalt an Rohstoffen einzugrenzen. Sind die Kunststoffe zusätzlich zu hohen Temperaturen beispielsweise aggressiven Medien oder hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt, verbessert die Strahlenvernetzung das Alterungsverhalten. Auch thermoplastische Elastomere, deren Einsatz häufig durch unzureichende Druckverformungsreste beschränkt ist, können durch Strahlenvernetzung so optimiert werden, dass sie die hohen Anforderungen im Fahrzeugbau erfüllen. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind beispielsweise Elastomerdichtungen, die im Zweikomponenten-Spritzguss hergestellt und anschließend strahlenvernetzt werden. Eine geeignete Werkstoffkombination vorausgesetzt, werden das Gehäuse und die eingespritzte TPE-Dichtung in einem Arbeitsgang vernetzt.

4.1 Metallersatz / Leichtbau

Befestigungselemente wie Schrauben und Muttern, Halterungen oder Clips aus Metall lassen sich durch strahlenvernetztes Polyamid substituieren. Die große Anzahl eingesetzter Befestigungselemente im und am Fahrzeug und eine mögliche Gewichtsreduktion um einen Faktor >5 bieten Einsparpotenzial beim Gesamtgewicht und bei den Herstellungskosten (Metallbearbeitung vs. Spritzguss). Denkbar sind zudem tragende Karosseriebauteile zum Beispiel aus thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen.

4.2 Organobleche

Multimaterial-Bauweisen sollen die an sie gestellten Anforderungen bei minimalem Gewicht erfüllen. Thermoplastische Organobleche werden dabei auch in der Großserie wichtiger. Strahlenvernetzte Bauteile, die fester sind und eine höhere Wärmeformbeständigkeit aufweisen, beschleunigen die Prozesse einer 3D-Thermoumformung.

4.3 LED-Technik

Die Temperaturentwicklung in LED-Scheinwerfern ist aufgrund der kompakten Bauweise und der Leistungselektronik höher als in herkömmlichen Scheinwerfersystemen. Das Anforderungsprofil an Gehäusebauteile und vor allem an die Reflektoren ändert sich deutlich – und ist mittels der Strahlenvernetzung erfüllbar.

4.4 Bordnetz

Elektrofahrzeuge verfügen zum Teil über 800-Volt-Akkus, die sich mit bis zu 350 Kilowatt an Schnell-Ladestationen laden lassen. Beim Einsatz von Gleichstrom kann die Stromstärke dabei bis zu 500 Ampere betragen. Ebenso erfordert der Energietransfer vom Akku zum Antrieb Kabelsysteme mit großen Leiterquerschnitten und temperaturbeständigen Isolationswerkstoffen.

4.5 Autonomes Fahren

Assistenzsysteme sind die Basis für automatisierte Fahrfunktionen. Stellmotoren leisten dabei vielfältige Aufgaben: zum Beispiel in Spurhalteassistenten, der Drosselklappensteuerung für den Abstandsregeltempomaten, in elektrischen Bremssystemen oder automatischen Getrieben. Die Motoren müssen kompakt, leicht, leise und langlebig beziehungsweise wartungsfrei sein.

Die Anforderungen an die Werkstoffe für Getriebe und Gleitkomponenten, wie Zahnräder, Lager- und Gleitbuchsen, verändern sich deutlich. Strahlenvernetzte Bauteile können hier eine wirtschaftliche Alternative zu metallischen Werkstoffen oder teuren Polymeren (PEEK, PAI etc.) sein.

5. Vernetzte Bauteile im Serieneinsatz

Bereits heute sind vernetzte Kunststoffe bei namhaften Automobilherstellern im Serieneinsatz. Die Anwendungsgebiete umfassen zum Beispiel Blow-by-Rohre in Verbrennungsmotoren, die komplexe Mixturen aus Öl, Abgas, unverbranntem Kraftstoff und Wasser aus dem Kurbelwellengehäuse ableiten. Die Anforderungen hinsichtlich Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit sind entsprechend hoch. Zum Einsatz kommt dabei Polyamid (PA6, PA66). Weitere Beispiele sind Wasserstofftanks mit PE-Inliner, Achsmanschetten, Faltenbälge, Luftführungselemente, Halter und Befestigungsclips aus Zweikomponenten-Spritzguss oder Gleit- und Rollenlager, bei denen die verbesserten tribologischen Eigenschaften zu reduziertem Abrieb und Verschleiß und geringerer Kriechneigung führen. Einen relativen Vergleich der Entzündbarkeit

unterschiedlicher Werkstoffe erlaubt der sogenannte Glühdrahttest. Dabei drückt eine Messvorrichtung eine glühende Drahtspitze auf das Bauteil. Während herkömmlicher Kunststoff in Sekunden durchdrungen wird und am Glühdraht entflammt, halten behandelte Materialien diesem stand.

Um bestrahlte Bauteile und Komponenten in der Serienfertigung einzusetzen, müssen die angegliederten Verfahren reibungslos und vor allem schnell ablaufen. Verglichen mit Duroplastwerkstoffen, die oft eine aufwendige Nachbearbeitung erfordern, oder Hochleistungskunststoffen bietet die Strahlenvernetzung dabei enorme Verarbeitungsvorteile bei reduzierten Kosten. Die ursprünglichen Verarbeitungsverfahren der Rohbauteile bleiben erhalten und nur das Endprodukt wird behandelt – die Produktion muss also nicht umgestellt werden. Die Strahlenvernetzung erfolgt als letzter Schritt nach der Formgebung und lässt sich in die Produktionskette auf dem Transportweg zum Endabnehmer integrieren. Wichtig ist, dass alle Projektbeteiligten von Beginn an zusammenarbeiten: vom Kunststofflieferanten bis zum Hersteller.

'Electro Cult' as a new design signature for e-mobility

Chinese vs. European design identity

Jörg Friedrich, Car Men GmbH, Glashütten

Abstract

This presentation deals with the realignment of interior and exterior design in connection with alternative drive systems. Every brand strives to develop a distinctive, individual design signature for its vehicles and to use it to find the best possible fit to current and future customer tastes. New design languages and styles emerge, which we present and group here under the heading 'Electro Cult'. In connection with the increasing e-mobility in the various vehicle segments, most premium and even mainstream manufacturers are selecting an entirely different design language to that of conventionally powered vehicles. This applies both to the interior and to the exterior design. We are seeing an increasingly independent and growing awareness of design, especially in the case of the emerging young Chinese premium brands. The design role-model function of the European manufacturers is crumbling. China is on the way up ...

Contents:

- An overview of **general design developments** in vehicle exteriors and interiors
- The **ingredients of 'Electro Cult'** as a new design signature of e-mobility
- Focus on **Chinese vs. European** design orientations
- An **outlook** on upcoming, possible developments in connection with the major change through digitalization, e-mobility and autonomous driving

Fig. 1: EV signature vehicle front-end: comparison China vs. Europe



Fig. 2: Premium interior interpretation: comparison China vs. Europe



"Electro Cult" als neue Design Signatur der E-Mobilität

Chinesische vs. Europäische Designidentität

Jörg Friedrich, Car Men GmbH, Glashütten

Kurzfassung

Der Vortrag behandelt die Neuausrichtung des Interior und Exterior Designs in Verbindung mit alternativen Antrieben. Jede Marke ist bestrebt, eine unverwechselbare, individuelle Design Signatur für ihre Fahrzeuge zu entwickeln und mit dieser, eine größtmögliche Passung zum aktuellen und zukünftigen Kundengeschmack zu finden. Es entstehen neue Designsprachen und Stile, die wir unter der Überschrift "Electro Cult" im Vortrag zeigen und herleiten. In Verbindung mit der zunehmenden E-Mobilität in den unterschiedlichen Fahrzeugsegmenten wählen die meisten Premium und auch Mainstream-Hersteller eine komplett andere Designsprache, im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen. Das gilt für das Interior sowie auch für das Exterior Design. Besonders bei den neu auftauchenden Chinesischen jungen Premium-Marken sehen wir ein zunehmend eigenständiges und wachsendes Designbewußtsein. Die Design-Vorbildfunktion der europäischen Hersteller bröckelt. China ist im Kommen...

Inhaltsübersicht:

- Eine Übersicht **allgemeiner Designentwicklungen** der Fahrzeug Exteriors / Interiors
- Die **Ingredienzien von "Electro Cult"** als neue Design Signatur der E-Mobilität
- Focus auf **China vs. Europa** Designausrichtungen
- Ein **Ausblick** auf kommende, mögliche Entwicklungen in Verbindung mit den Wandel durch Digitalisierung, E-Mobilität und Autonomes Fahren

Bild 1: EV-Signatur Fahrzeug Front - Vergleich China vs. Europa

Exterior
Logo / Grill
Treatment

Illumination is replacing galvanic chrome plating.
If chrome – the PVD technology is developing quickly and is getting more cost effective.
Despite the aerodynamic requirements, we can see 3D pattern on the grill.
The illumination brand signature is increasingly important.



Bild 2: Premium Interior Interpretation - Vergleich China vs. Europa

Interior
Use of Metal
Production cars

The new Porsche Taycan offers interesting warm tone metal colours with a titanium and a copper tone direction which fits with the wooden deco surfaces.
Byton and Wey are using metal as added value area in their cockpit for expressive button and control components.



Highly integrative smart plastic shift fork

Dipl.-Ing. **Jana Horn**, GK Concept GmbH, Dresden;
Dr.-Ing. **Bernd Schulze**, Dipl.-Ing. **Roman Kolmorgen**,
KOKI TECHNIK Transmission Systems GmbH, Niederwürschnitz

Abstract

KOKI Technik Transmission Systems GmbH has tackled the eternal challenge of producing components more easily and inexpensively by developing and manufacturing a plastic shift fork. The shift fork and the associated plastic injection mold were designed in collaboration with GK Concept GmbH. With the integration of all relevant components in a final production step (one-shot process), it was possible to meet the cost requirements. The additional integration of contactless sensors into the plastic matrix also enables on-line monitoring of the assembled plastic shift fork.

1. Motivation

KOKI Technik Transmission Systems GmbH sees itself as a user of the latest technologies in the production of components and systems for internal gearshifting in vehicle transmissions. At the same time, in the search for new, innovative material applications, the traditional is questioned and reassessed. This was the case with the shift fork as an example, since plastic was available as an alternative to conventionally used materials such as steel and aluminum. KOKI has been using plastics for shift fork manufacturing for over 20 years. However, producing a shift fork made entirely of plastic was and is a completely new challenge. A straightforward material substitution is not a suitable solution, especially considering the temperature conditions prevailing in the transmission. The option of a composite lightweight construction gives more wiggle room and formed the basic idea for the solution described below.

With the additional incorporation of sensors into the plastic matrix of the shift fork, there is the possibility, among other things, of improving the accuracy of predictions of component life. This should be understood as a demonstrator and gives an outlook regarding further possibilities for expanding the functionality of components.

2. Plastic shift fork for a high-performance transmission in the one-shot process

2.1 High-performance plastics / material selection

The starting point for the development of a series-compatible plastic shift fork was the results of a search for suitable available plastics. Relevant requirements, derived from several current specifications for dual clutch transmissions, were:

- High stiffness at operating temperatures up to 150°C
- High strength throughout the entire temperature range of -40°C to +150°C
- Chemical resistance (oil resistance)
- High toughness (dynamic stress)
- Low thermal expansion and water absorption
- Acceptable price (since the known target for the aluminum shift fork should be undercut).

It emerged that none of the high-performance plastics considered proved to be a suitable matrix material. For this reason, PA66 and PPA were also considered, since these have clear advantages, particularly in terms of cost-effectiveness.

Table 1: Material properties

		Aluminum	PEEK	PEEK CF 30	PA 66 CF 30	PPA	PPA GF 50	PPA CF 30	PPA CF 40
Density	[g/cm ³]	2.7	1.3	1.4	1.3	1.2	1.6	1.3	1.4
Tensile modulus 23°	[GPa]	70	4.0	24	24	3.2	18	30	36
Tensile modulus 120°	[GPa]	65	3.9	19		3.0	16		27
Tensile strength	[MPa]	240	85	250	240	75	250	365	290
Shrinkage	[%]	0.5	1	0.4	0.3	0.7	0.4	0.1	0.1
Water absorption	[%]	-	0.5	0.4	1.9	0.7	0.1	0.3	0.2
Theor. expansion coefficient longitudinal	[E ⁻⁶ /K]	24	60	10	10		15	24	
Continuous operating temp.	[°C]	150	250		120		150	165	

Due to its very good mechanical and thermal properties and also its comparatively low costs as compared to PEEK, PPA with a 30-40% carbon-fiber content emerged as the preferred material.

2.2 Load-oriented component design

The aluminum die-cast shift fork served as a reference for the component design, the performance of which had to be achieved and its weight and manufacturing costs undercut.

The lack of stiffness of the plastic as compared to aluminum was initially largely compensated for by geometric stiffening measures. To this end, the installation space

available in the transmission assembly was used in the best possible way. The arms of the shift fork were given a higher profile height, and their connection to the shift shaft ensured the best possible load transfer by means of solid ribs. As a result, the construction achieved a greater stiffness at room temperature than the aluminum shift fork. In order to secure the mechanical performance of the shift fork even at temperatures above 100°C, the fork arms were reinforced with a highly rigid insert.

The production of the shift fork by thermoplastic injection molding offers the possibility of integrating the functional elements, such as shift shaft and magnet assembly, directly in the so-called one-shot process and thus eliminating downstream assembly and processing steps (Fig. 1). For a conventional aluminum shift fork, this initially involves deflashing the injection molding blank, machining it and also a number of downstream assembly processes. Above all it is the large number of successive manufacturing processes that enormously increases production costs as well as the necessary investments in machines and devices.

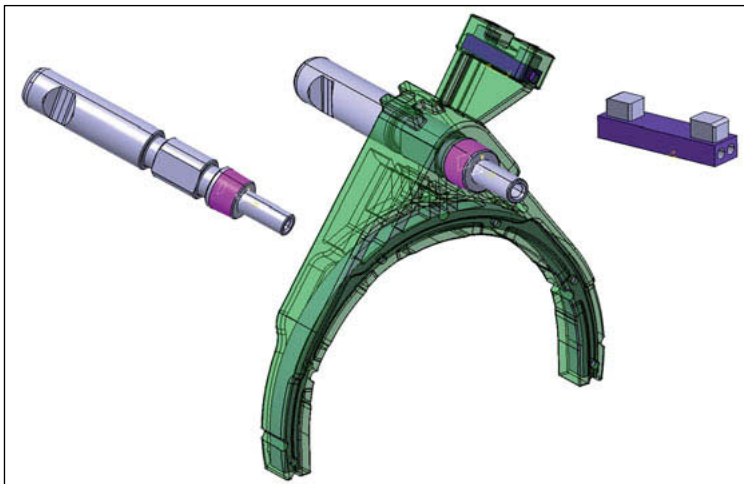


Fig. 1: Design of the plastic shift fork with reinforcement insert, shift shaft and magnet assembly

Following the basic definition of the plastic shift fork geometry with integrated metal components, with maximum geometric rigidity, the overall rigidity of the component was calculated using structural simulations.

The decisive load case for the shift fork results from the gearshifting process (Fig. 2). Here, when the gear is engaged, the shift shaft is moved axially and transmits the movement to the sliding sleeve via the two flaps at the ends of the two arms of the fork. The load applied to

the two flaps is 1500N, the operating temperature was defined at 120°C. A maximum permissible deformation of the aluminum shift fork of significantly less than 0.8 mm at 120°C served as the evaluation criterion.

With the help of structural simulations, the different geometry and material variants for the reinforcement insert were examined. The greatest stiffening was achieved with a wound carbon-fiber insert that contains only 0° fiber layers.

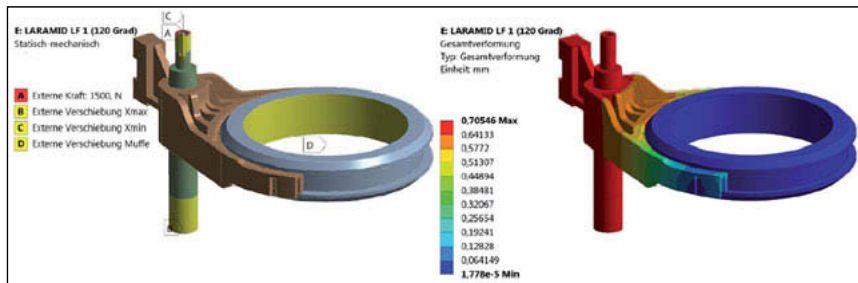


Fig. 2: Mounting constraints for the plastic shift fork

The second relevant load case is an abuse loading case of 2400N at 160°C. Here the shift fork must not break or be permanently deformed. Even these requirements are met by the final plastic shift fork.

Three main challenges had to be overcome in the task of replacing an aluminum die-cast shift fork by a plastic shift fork:

- Ensuring mechanical stability - valid for fast load transfers over the service life
- Ensuring low thermal expansion - important for a smooth interaction of the transmission components in all temperature ranges
- Achieving a high dimensional accuracy in the manufacturing process - a rework-free final geometry due to low shrinkage and residual stresses.

The reinforcement insert makes an important contribution to all three objectives.

2.3 Tool design

For the design of the injection molding tool, it was essential to be able to position and fix the three insert parts – steel shaft, magnet assembly and plastic-carbon-fiber insert – precisely and without damage. The carbon-fiber insert proved to be particularly challenging. On the one hand, the plastic part could only be exposed to a limited extent to the clamping force of the tool; on the other hand, it had to be completely encased in the matrix.

This problem was solved using several ejector systems. In the opening direction of the tool there was a system of 6 flat ejectors in each tool half, between which the insert was clamped in the axial direction. Here, adjusting the height of the gap between the two tool halves to the thickness of the insert was very important in order to avoid breaking the fibers. Another ejector system on the movable side of the tool was used for positioning in the radial direction. At the start of the injection molding cycle, both systems were moved up in order to position and hold the insert in the cavity (Fig. 3). Once all the insert parts have been positioned in the tool, the injection process begins. Shortly before the cavity is completely filled, the ejectors on the flanks and end faces of the carbon-fiber insert are pulled back so that these areas also can be filled with melt and the insert be completely encased by the thermoplastic matrix.

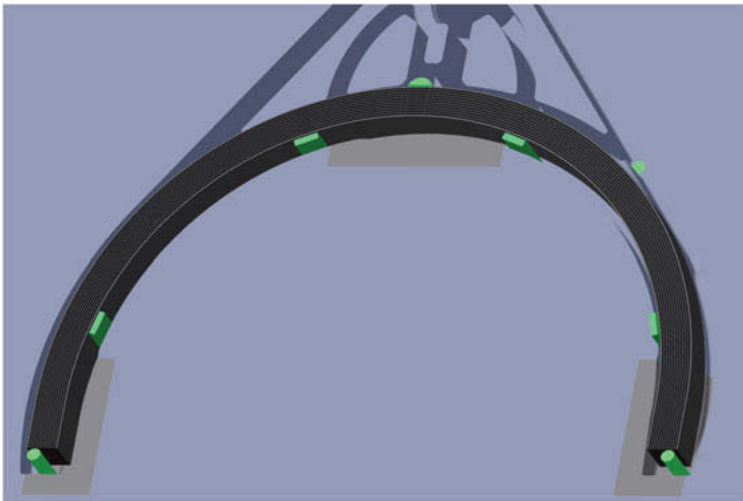


Fig. 3: Fixing the carbon-fiber insert in the plastic injection mold

With regard to the warpage and dimensional accuracy of the finished molding, an optimal process with a well-balanced filling was important. Various gating concepts were investigated using injection-molding simulations. Gating via a tunnel gate in the area of the shift shaft receptacle proved to be optimal for the component because it was then possible to achieve an even filling without any pressure peaks (Fig. 4).

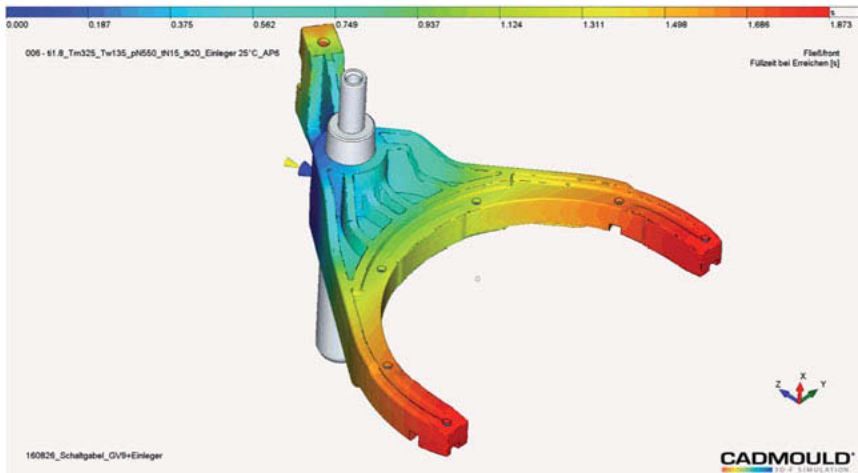


Fig.4: Shift fork mold filling

2.4 Validation

The result of the shift fork design and the following prototype production as well as the validation was consistently positive. The shift fork delivers the required stiffnesses in all temperature ranges as also the fatigue strength within the scope of the test interval specified in the specification, namely over 70,000 cycles per temperature range. In addition to the technical goals being achieved, the part price was reduced by 10%. This is due not to a cost advantage deriving from the material used, but rather to the massive savings in manufacturing steps, especially through the integration of functions directly in the injection-molding process. These functions include the injected magnets, of course, but also all of the functional surfaces, some of which in the metal reference product required machining. By saving not only these mechanical processing steps but also additional assembly work, necessary investments were also reduced by over 50%.

Once the requirements made of the plastic fork had been met to this extent, the procedure described above was used to inject RFID chips as inserts in order to further increase the functionality of the assembly. Direct encapsulation in the one-shot process had the advantage of making a direct connection on the one hand and on the other hand of protecting the chip at all times against external influences.

3. The smart shift fork

3.1 Preliminary considerations

Sensors help with the monitoring of machines, equipment, real estate, vehicles, and so on. In terms of technical implementation, monitoring the temperature in a refrigerator or in the transmission of a vehicle is a similar matter. In both cases, stationary sensors are used, which are fixed at suitable locations. It is of no consequence here that the refrigerator does not move during temperature monitoring whereas the transmission together with the vehicle undergoes changes in location. The same applies when using sensors with which component vibrations can be measured. As long as the sensor, hard-wired to the receiver unit, is in a position of the measurement object suitable for taking measurements or is in its surroundings, the technical challenges in implementing this measurement task will correspond to daily practice. In addition, the monitoring of moving parts within modules and systems always raises the question of how long a component can withstand the loads that occur before it fails. This would be a special starting point for sensor use, provided there are sensors that allow the contactless transmission of information.

3.2 Task formulation

The monitoring of moving, cyclically loaded parts, using contactless sensors, raises the following issues in the assessment of the feasibility of this task:

- How is the signal transmitted from the component to the receiver?
- How long is the sensor ready for operation?
- How is it ensured that the sensor remains permanently connected to the component to be monitored?
- What influence does the sensor have on the properties of the component?

The first two aspects can be answered or resolved positively using RFID sensor technology. The aspects of operational readiness and duration as well as those of signal transmission using RFID transponders are deliverable because they do not require their own energy supply. In contrast, sensor technology with an integrated stationary energy supply, battery or power connection is only of limited use in the above-mentioned application case. Replacing batteries is not always feasible and involves additional effort. When there are moving parts, using a permanent power supply does not make sense. Information and energy transmission in the case of RFID transponders takes place contactlessly via electromagnetic waves in the LF, HF and UHF frequency ranges.

The last two aspects aim at a suitable selection of the sensor's position on the component, on the one hand to ensure signal transmission to the transmitting and receiving unit and on

the other hand not to cause component damage. The sensor can be fixed onto the surface of the component using customary joining techniques. The possibility of integrating the sensor into the material matrix of the component is also available. The circuitry of the sensor itself must be protected against external influences.

The data transfer rate, distance between sensor and transmitting and receiving unit, resistance to environmental influences and also a guarantee of recyclability are further boundary conditions that must be observed when using sensors.

3.3 Consideration of benefits

The essential question, which justifies not only the use of a sensor, is the benefit that can be derived from it. Sensors including transmission and reception technology as well as the information processing and evaluation software required represent an outlay and this must be measured against the benefits. Focusing purely on the monetary advantage would significantly limit the potential of sensor use. Sensors and their peripherals not only mean additional costs but also a significantly higher added value, which will be evident from the explanations which follow.

Questions regarding the identity of components, 'Who am I?', as well as the location of parts, 'Where am I?', often come up in everyday life and can be answered reliably with the help of sensors. The question regarding component condition, 'How am I?', is already a challenge. If the last question is linked to an assessment of the condition of a part which, for example, rotates, then the monitoring options are currently reaching their limits.

If the behavior of components while they are in operation, can be monitored with, for example, the help of a vibration sensor, then it will also be possible to determine the changes resulting from the load. The deviations from a reference signal that are measured with target/actual comparison routines can be used to characterize the vibration behavior of sensor-equipped components and their surroundings. The risk of premature component failure due to repetitive, changing and/or pulsating loads can be significantly reduced by employing on-line component monitoring. Component fatigue, starting from cracks in the microscopic crystal structure, can lead to macroscopic cracks and ultimately to component fracture. Except in the case of overloads (misuse), load-related component changes do not occur suddenly but are linked to the interaction of various boundary conditions of fracture mechanics (geometry, strength, manufacturing, load), which correspond to more gradual failure phenomena [1]. The ability to detect these failure phenomena in the microstructure as early as possible bears fruit in precisely the above-mentioned added value.

Knowing whether a component still has a sufficiently high level of operational stability is essential when it comes to assessing component safety (no failure before the rated service life has been reached for a required theoretical failure probability). Since it is not possible to determine exactly the microstructural changes in a component in situ while it is in operation or to calculate them in advance using simulation calculations, there will be uncertainties in the component design. Or to put it simply, uncertainty is a fellow-traveler here. In practice, this means that components are provided with safety features in order to prevent unforeseen failures. Critical component areas are determined using simulation calculations based on phenomenological material models, but it is not possible to predict when and where exactly the worst case will occur. To improve prediction accuracy, visioelastic calculation approaches among other things can be used for the material models, these approaches describing the changes in the microstructure of the materials [2]. Whether the enormous amount of calculation involved is worthwhile is something that needs to be considered. Another possibility is the aforementioned use of sensors in order to be able to monitor the behavior of the components either permanently or temporarily. Ideally with the ability to integrate the sensors directly in the component matrix and at the same time to transfer information contactlessly.

3.4 Application example: the plastic shift fork

Equipping the plastic shift fork with sensors was a good option for further increasing its functionality. Shift forks are used for transferring the shift command from the external gearshift via the sliding sleeve to the synchronizer of a manual transmission. The shift fork is conventionally equipped with magnets in order to determine the position of the shift fork in the transmission during operation. Shift forks are designed taking into account the available installation space and the associated load requirements. The load requirements in particular are based on data from fatigue strength tests determined in the test laboratory. Since no values are available for the exact characterization of component behavior under real load conditions in the transmission, the default values are for safety reasons based on the maximum loads possible. Moreover, since the shift forks are subjected to cyclically high loads during gearshifting, there are differences between the default values and the real values. The integration of contactless sensors into or onto the shift fork would be a step towards supporting load-oriented component design. The integration in particular of vibration sensors into or onto the shift fork could make a contribution here (Fig. 5).

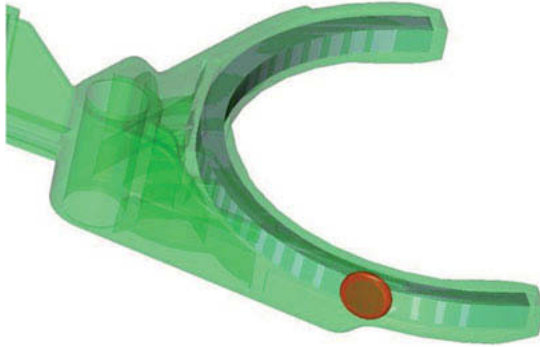


Fig. 5: Shift fork with integrated contactless RFID transponder for vibration measurement

The use of plastics, especially thermoplastics, opens up the possibility of satisfying precisely the aforementioned boundary conditions, by embedding sensors in the material matrix. In other words, the sensors are completely or partially encased in the plastic matrix. In order to obtain reproducible measurement results, it must be ensured during the injection process that the sensors in the mold cavity do not undergo any change in location. The temperature of the melt also poses a special challenge for the sensors as regards maintaining their function. A standard upper temperature limit of 180°C which RFID chips can briefly tolerate is already set very high. Since the melt temperature is over 360°C, this exactly represents the main challenge.

3.5 Outlook - component monitoring

A particularly attractive use of on-line information relating to component condition aims at the early indication of a possible component failure for forecasting purposes. Changing external conditions as well as the resulting changes at or in the object (component) during its use have different effects on its function, lifespan and appearance. A purely visual observation of components, for example using cameras or scanners, offers the possibility of visible component changes being detected. This involves waiting until something evaluable can be discerned on the component's surface or in its shape or form. This morphological approach more resembles reacting to a change in state. In order to be able to actively influence a process, information about the component's behavior is required very early on. Actively influencing means taking the initiative. If changes in shape are perceived, then

critical changes will already have taken place within the object, in its microstructure. With the on-line monitoring of vibration and temperature behavior at or in the object, there is an opportunity of recognizing at an early stage microstructure-related changes in properties. This extends the response period by the time window between detection of a microstructural change or malfunction and its becoming visible on the component surface.

Components that are exposed to a pulsating or changing load can experience material fatigue, which can lead to functional change and, in extreme cases, to component failure. To ensure that a component fulfills its function over its entire service life, computational and experimental life expectancy assessments based on operational strength tests are carried out during the component design phase. Since these are estimates, generous safety margins are common practice and not just for one part, but for all parts of a system, machine, vehicle and so on that are exposed to mechanical loads.

If it is possible to draw conclusions regarding the behavior of systems (equipment, vehicles) from the analysis of distinctive changes in individual components that can be measured on-line, new opportunities will emerge, for example with the background of 'predictive maintenance'. Estimation of maintenance intervals is replaced by the real assessment of the status of monitored units. The effort required to maintain systems is significantly reduced since, among other things, an early reaction to expected complications or changes becomes possible [3]. There is a shift away from waiting until something happens and towards active action in the maintenance of systems in the broadest sense.

4. Results and conclusion

The plastic shift fork as designed and manufactured was able to meet the requirements throughout the full transmission test run. The implementation methodology presented here demonstrates an innovative way of being able to use plastic in interaction with other materials even under atypical boundary conditions and thus opening up new potential in component design. The plastic shift fork was used as a demonstrator and upgraded using a temperature and 3D vibration sensor. Measuring the temperature directly in the component can be used on the one hand purely to monitor the operating state and/or in the case of a prototype or pre-series application, to represent the actual load in operation much more precisely. The former paves the way for the predictive maintenance already described. Under certain circumstances, the latter makes possible a further optimization of the component, since the actual temperature in the temperature range between 110°C and 160°C has an enormous influence on the choice of base polymer and thus on the raw material price. The situation is similar with the 3D vibration sensor, which also shows the possibility of being able

to measure the synchronization process directly. This offers the opportunity of uncovering further potential in the design of the components, particularly in the case of transmissions with high loads (in commercial vehicles, for example).

References

- [1] Cetin Morris Sonsino (2008): Betriebsfestigkeit - Eine Einführung in die Begriffe und ausgewählte Bemessungsgrundlagen. Materials Testing: Vol. 50, No. 1-2, pp. 77-90.
- [2] B. Schulze, J. Leopold, G. Schmidt, A. Bertz (1994) - Technologische Voraussetzungen für Mikrovisioplastische Untersuchungen. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Vol. 25, No. 5, pp. 183-190.
- [3] Thomas Bartz-Beielstein, Jochen Blaurock, Sebastian Krey, Yixi Fu, Niclas Kallenbach, Marc Möller (2017): Structural Health Monitoring von Faserverbundstrukturen mittels Piezosensoren – Untersuchungen zum experimentellen Design. CIPlus, pp. 1-18, TH Cologne.

Hochintegrierte smarte Kunststoff-Schaltgabel

Dipl.-Ing. **Jana Horn**, GK Concept GmbH, Dresden
Dr.-Ing. **Bernd Schulze**, Dipl.-Ing. **Roman Kolmorgen**,
KOKI TECHNIK Transmission Systems GmbH, Niederwürschnitz

Kurzfassung

Die Fa. KOKI Technik Transmission Systems GmbH stellte sich dem immerwährenden Anspruch Bauteile leichter und preiswerter herzustellen, indem eine Kunststoffschaltgabel entwickelt und hergestellt wurde. Gemeinsam mit der Fa. GK Concept GmbH erfolgte die Auslegung der Schaltgabel sowie des zugehörigen Kunststoffspritzwerkzeuges. Mit der Integration aller relevanten Bauteile in einem finalen Fertigungsschritt (One-shot-Verfahren) gelang es, den kostenseitigen Anforderung gerecht zu werden. Die zusätzliche Einbindung von kontaktlos arbeitenden Sensoren in die Kunststoffmatrix erlaubt zudem die online-Überwachung der bestückten Kunststoffschaltgabel.

1. Motivation

Die Fa. KOKI Technik Transmission Systems GmbH versteht sich als Anwender modernster Technologien bei der Fertigung von Komponenten und Systemen der Inneren Schaltung bei Fahrzeuggetrieben. Gleichzeitig wird bei der Suche nach neuen, innovativen Werkstoffanwendungen Althergebrachtes hinterfragt und neu bewertet. Das traf am Beispiel der Schaltgabel zu, indem Kunststoff als Alternative zu den konventionell verwendeten Werkstoffen, wie Stahl und Aluminium, zur Disposition stand. KOKI verwendet Kunststoffe für die Schaltgabelfertigung schon seit über 20 Jahren. Eine Schaltgabel komplett aus Kunststoff herzustellen, war und ist jedoch eine komplett neue Herausforderung. Die reine Werkstoffsubstitution stellt, besonders unter der Berücksichtigung der im Getriebe vorherrschenden Temperaturverhältnisse, keine geeignete Lösungsvariante dar. Die Option des Verbundleichtbaus lässt mehr Spielraum zu und bildete die Grundidee für den nachfolgend beschriebenen Lösungsansatz.

Mit der zusätzlichen Einbringung von Sensoren in die Kunststoffmatrix der Schaltgabel ergibt sich u. a. die Möglichkeit die Genauigkeit von Vorhersagen der Bauteillebensdauer zu verbessern. Dieses soll als Versuchsträger verstanden werden und gibt einen Ausblick auf weitere Möglichkeiten zur Erweiterung der Funktionalität von Bauteilen.

2. Kunststoffschaltgabel für ein Hochleistungsgetriebe im One-Shot-Verfahren

2.1 Hochleistungskunststoffe/ Materialauswahl

Ausgangspunkt der Entwicklung einer serienfähigen Kunststoff-Schaltgabel waren die Ergebnisse einer Recherche nach geeigneten verfügbaren Kunststoffen. Maßgebliche Anforderungen, abgeleitet aus mehreren aktuellen Lastenheften für Doppelkupplungsgetriebe, waren:

- hohe Steifigkeit bei Einsatztemperaturen bis 150°C
- hohe Festigkeit im gesamten Temperaturbereich von -40°C bis +150°
- chemische Beständigkeit (Ölbeständigkeit)
- hohe Zähigkeit (dynamische Beanspruchung)
- geringe Wärmedehnung und Wasseraufnahme
- akzeptabler Preis (da das bekannte Target für die Aluminiumschaltgabel unterschritten werden sollte)

Im Ergebnis erwies sich keiner der betrachteten Hochleistungskunststoffe als passendes Matrixmaterial. Deshalb wurden auch PA66 und PPA betrachtet, die insbesondere hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit deutliche Vorteile aufweisen.

Tabelle 1: Materialeigenschaften

		Aluminium	PEEK	PEEK CF 30	PA 66 CF 30	PPA	PPA GF 50	PPA CF 30	PPA CF 40
Dichte	[g/cm ³]	2.7	1.3	1.4	1.3	1.2	1.6	1.3	1.4
Zug E-Modul 23°	[GPa]	70	4.0	24	24	3.2	18	30	36
Zug E-Modul 120°	[GPa]	65	3.9	19		3.0	16		27
Zugfestigkeit	[MPa]	240	85	250	240	75	250	365	290
Schwindung	[%]	0.5	1	0.4	0.3	0.7	0.4	0.1	0.1
Wasseraufnahme	[%]	-	0.5	0.4	1.9	0.7	0.1	0.3	0.2
th. Ausdehnungs- koeffizient längs	[E ⁻⁶ /K]	24	60	10	10		15	24	
Dauergebrauchs- temperatur	[°C]	150	250		120		150	165	

Aufgrund der sehr guten mechanischen und thermischen Eigenschaften sowie vergleichsweise geringen Kosten zu PEEK kristallisierte sich PPA mit 30-40% Kohlefaseranteil als das Vorzugsmaterial heraus.

2.2 Belastungsgerechte BauteilAuslegung

Für die BauteilAuslegung diente die Aluminiumdruckguss-Schaltgabel als Referenz, deren Performance es zu erreichen und Gewicht und Herstellkosten zu unterbieten galt.

Die fehlende Steifigkeit des Kunststoffes gegenüber Aluminium wurde zunächst weitestgehend durch geometrische Versteifungsmaßnahmen ausgeglichen. Dazu wurde der verfügbare Bau-raum in der Getriebebaugruppe bestmöglich genutzt. Die Arme der Schaltgabel erhielten mehr Profilhöhe, deren Anbindung zur Schaltwelle durch massive Rippen für eine bestmögliche Lasteinleitung sorgte. Im Ergebnis erreichte die Konstruktion bei Raumtemperatur eine höhere Steifigkeit als die Aluminiumschaltgabel. Um die mechanische Performance der Schaltgabel auch bei Temperaturen oberhalb 100°C zu erhalten, wurde die Verstärkung der Gabelarme mit einem hochsteifen Einleger vorgesehen.

Die Herstellung der Schaltgabel im thermoplastischen Spritzguss bietet die Möglichkeit, die Funktionselemente, wie Schaltwelle und Magnetbaugruppe direkt im sogenannten One-Shot-Prozess zu integrieren und somit nachgelagerte Montage- und Bearbeitungsschritte zu eliminieren (Bild 1). Für eine herkömmliche Aluminiumschaltgabel sind das zunächst die Entgratung des Spritzgussrohlings, dessen mechanische Bearbeitung sowie etlicher nachgelagerter Montageprozesse. Vor allem die Vielzahl der nacheinander stattfindenden Fertigungsprozesse erhöht die Herstellungskosten sowie auch die nötigen Investitionen an Maschinen und Vorrichtungen enorm.

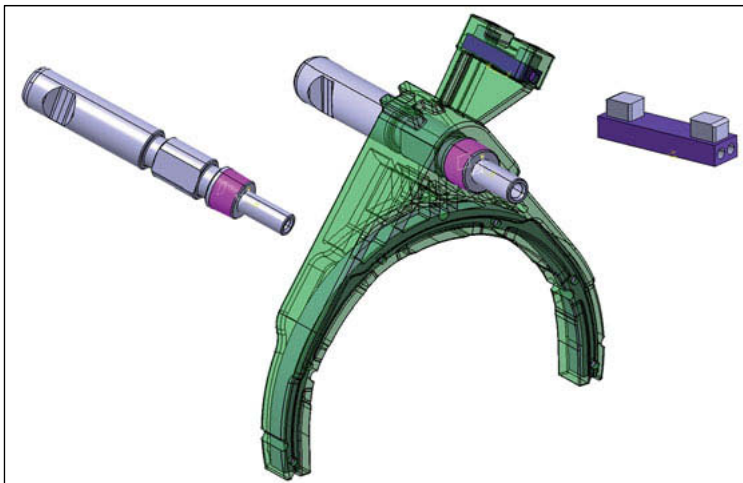


Bild 1: Auslegung der Kunststoff-Schaltgabel mit Verstärkungseinleger, Schaltwelle und Magnetbaugruppe

Nach der grundlegenden Definition der Kunststoff-Schaltgabelgeometrie mit integrierten Metallbauteilen, bei maximaler geometrischer Steifigkeit, wurde mittels Struktursimulationen die Gesamtsteifigkeit des Bauteils berechnet.

Der maßgebliche Lastfall für die Schaltgabel ergibt sich aus dem Schaltvorgang (Bild 2). Dabei wird mit dem Einlegen des Gangs die Schaltwelle axial verschoben und überträgt die Bewegung über die beiden Patten an den Enden der beiden Arme der Gabel auf die Schiebemuffe. Die Höhe der auf die beiden Patten eingeleiteten Last beträgt 1500N, die Betriebstemperatur wurde mit 120°C definiert. Als Bewertungskriterium diente eine maximal zulässige Verformung der Al-Schaltgabel von deutlich unter 0.8 mm bei 120°C.

Mithilfe der Struktursimulationen wurden die verschiedenen Geometrie- und Materialvarianten für den Verstärkungseinleger untersucht. Die größte Versteifung wurde mit einem gewickelten Kohlefasereinleger erreicht, der ausschließlich 0° Faserlagen enthält.

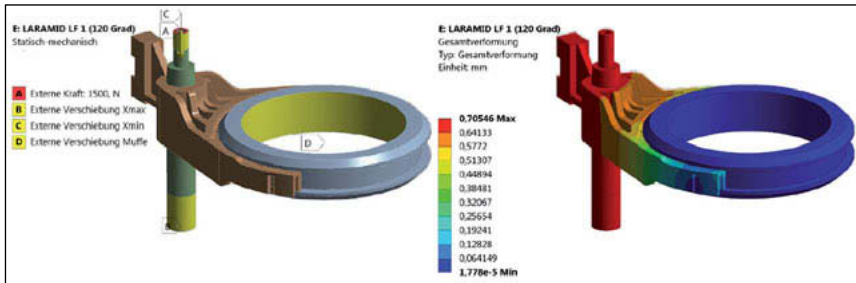


Bild 2: Lagerungsrandbedingungen Kunststoff-Schaltgabel

Der zweite relevante Lastfall ist eine Missbrauchslast von 2400N bei 160°C. Dabei darf die Schaltgabel nicht brechen oder bleibend verformt werden. Auch diese Anforderungen erfüllt die finale Kunststoff-Schaltgabel.

Drei wesentliche Herausforderungen galt es bei der Aufgabe, eine Aluminiumdruckguss-Schaltgabel durch eine Kunststoff-Schaltgabel zu ersetzen, zu erfüllen:

- Gewährleistung der mechanische Stabilität – gültig für schnelle Lastübertragungen über die Lebensdauer
- Sicherstellung einer geringen Wärmeausdehnung – wichtig für ein reibungsfreies Zusammenspiel der Getriebekomponenten in allen Temperaturbereichen
- Erzielung einer hohen Maßhaltigkeit im Fertigungsprozess – nacharbeitsfreie finale Geometrie durch geringe Schwindung und Eigenspannungen

Für alle drei Aufgaben leistet der Verstärkungseinleger einen wichtigen Beitrag.

2.3 Werkzeugauslegung

Für die Konzeption des Spritzgusswerkzeuges war es wesentlich, die drei Einlegeteile Stahlwelle, Magnetbaugruppe und Kunststoff-Kohlefaser-Einleger beschädigungsfrei und exakt positionieren und fixieren zu können. Als besonders anspruchsvoll hat sich dabei der Kohlefaser-Einleger gezeigt. Zum einen durfte das Kunststoffteil nur begrenzt der Schließkraft des Werkzeuges ausgesetzt werden, zum anderen musste es vollflächig von der Spritzgussmatrix umhüllt werden.

Gelöst wurde diese Aufgabe über mehrere Auswerferpakete. In Öffnungsrichtung des Werkzeuges gab es in beiden Werkzeughälften je ein Paket von 6 Flachauswerfern, zwischen denen der Einleger stirnflächig in axialer Richtung geklemmt wurde. Hier war die Höhenabstimmung des Spaltes zwischen beiden Werkzeughälften zur Dicke des Einlegers sehr wichtig, um die Fasern nicht zu zerbrechen. Ein weiteres Auswerferpaket auf der beweglichen Seite des Werkzeuges diente zur Positionierung in radialer Richtung. Zum Start des Spritzgießzyklus sind beide Pakete vorgefahren, um den Einleger in der Kavität zu positionieren und zu halten (Bild 3). Nachdem alle Einlegeteile im Werkzeug positioniert sind, beginnt der Spritzprozess. Kurz bevor die Kavität vollständig gefüllt ist, werden die Auswerfer an den Flanken und Stirnseiten des Kohlefaser-Einlegers zurückgezogen, so dass auch diese Bereiche mit Schmelze gefüllt werden und der Einleger vollständig von der thermoplastischen Matrix umschlossen wird.

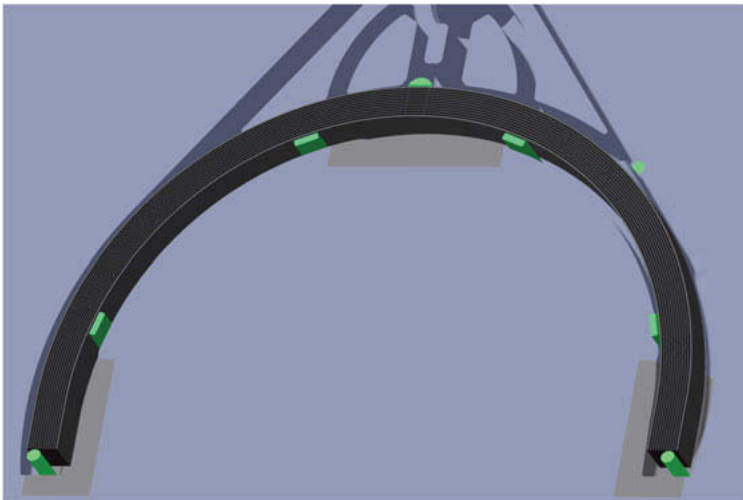


Bild 3: Fixierung des Kohlefaser-Einlegers im Kunststoffspritz-Werkzeug

Im Hinblick auf Verzug und Maßhaltigkeit des fertigen Kunststoffspritzteils war ein optimaler Prozess mit einer balancierten Formteillfüllung wichtig. Mittels Spritzgussimulationen wurden verschiedene Anspritzkonzepte untersucht. Die Anspritzung über einen Tunnelanguss im Bereich der Aufnahme der Schaltwelle erwies sich als optimal für das Bauteil, weil dabei eine gleichmäßige Füllung ohne Druckspitzen realisiert werden konnte (Bild 4).

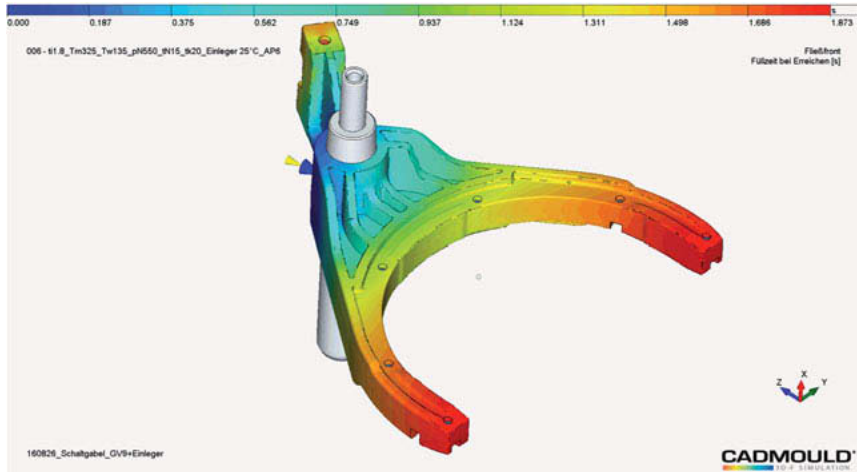


Bild 4: Formfüllung Schaltgabel

2.4 Validierung

Das Resultat der Schaltgabelauslegung und der angeschlossenen Prototypenfertigung sowie der Validierung war durchweg positiv. Die Schaltgabel erfüllt in allen Temperaturbereichen die geforderten Steifigkeiten und ebenso die Wechselfestigkeit im Rahmen des im Lastenheft vorgeschriebenen Prüfintervalls von über 70.000 Zyklen pro Temperaturbereich. Zusätzlich zum Erreichen der technischen Ziele, konnte der Teilepreis um 10% gesenkt werden. Dies ist nicht auf einen Kostenvorteil beim eingesetzten Material zurückzuführen, sondern ergab sich durch die massive Einsparung von Fertigungsschritten, vor allem durch die Integration von Funktionen direkt im Spritzprozess. Zu diesen Funktionen zählen natürlich die eingespritzten Magneten, aber ebenso auch alle Funktionsflächen, welche beim metallischen Referenzprodukt zum

Teil aufwändig mechanisch bearbeitet werden mussten. Mit der Einsparung von besagten mechanischen Bearbeitungsschritten sowie weiterer Montageaufwendungen reduzierten sich auch die nötigen Investitionen um über 50%.

Nachdem die Anforderungen an die Kunststoffgabel soweit erfüllt sind, wurden mit Hilfe der schon oben beschriebenen Vorgehensweise, RFID Chips als Einlegeteile eingespritzt um die Funktionalität der Baugruppe noch weiter zu erhöhen. Das direkte Umspritzen im One-Shot-Prozess hatte zum einen den Vorteil der direkten Anbindung und zum anderen, dass der Chip vor äußeren Einflüssen stets geschützt bleibt.

3. Die smarte Schaltgabel

3.1 Vorbetrachtungen

Sensoren helfen bei der Überwachung von Maschinen, Anlagen, Immobilien, Fahrzeugen etc. Ob es gilt, die Temperatur in einem Kühlschrank oder im Getriebe eines Fahrzeuges zu überwachen, ist von Seiten der technischen Umsetzung ähnlich zu betrachten. In beiden Fällen werden stationäre Sensoren verwendet, die an geeigneten Stellen fest platziert sind. Dass sich bei der Temperaturüberwachung der Kühlschrank nicht bewegt, demgegenüber das Getriebe mit dem Fahrzeug Ortsveränderungen erfährt, ist hierbei unwesentlich. Gleiches gilt bei der Verwendung von Sensoren mit denen Schwingungen von Bauteilen messbar sind. Solange sich der Sensor, fest verdrahtet mit der Empfängereinheit, an einer für die Messwertermittlung geeigneten Position des Messobjektes oder in dessen Umgebung befindet, entsprechen die technischen Herausforderungen für die Umsetzung dieser Messaufgabe der täglichen Praxis. Weiterführend steht mit der Überwachung von sich bewegendenden Teilen innerhalb von Modulen und Systemen immer die Frage, wie lang ein Bauteil den auftretenden Belastungen ohne Ausfall standhalten kann. Hier wäre ein besonderer Ansatzpunkt für den Sensoreinsatz gegeben, vorausgesetzt es gibt Sensoren, die eine kontaktlose Informationsübertragung zulassen.

3.2 Aufgabenstellung

Die Überwachung von sich bewegendenden, zyklisch belasteten Teilen, anhand kontaktlos arbeitender Sensoren, wirft folgende Aspekte bei der Bewertung der Machbarkeit dieser Aufgabenstellung auf:

- Wie erfolgt die Signalübertragung vom Bauteil zum Empfänger?
- Wie lang ist der Sensor betriebsbereit?
- Wie wird gewährleistet, dass der Sensor bleibend mit dem zu überwachenden Bauteil verbunden bleibt?
- Welchen Einfluss hat der Sensor auf die Eigenschaften des Bauteils?

Die beiden erstgenannten Aspekte lassen sich unter Nutzung der RFID-Sensortechnik positiv beantworten bzw. lösen. So sind die Themen der Betriebsbereitschaft und –dauer sowie die der Signalübertragung unter Verwendung von RFID-Transpondern möglich, da diese keine eigene Energieversorgung benötigen. Demgegenüber ist Sensortechnik mit integrierter stationärer Energieversorgung, Batterie oder Stromanschluss, für den o. g. Einsatzfall nur bedingt nutzbar. Der Austausch von Batterien ist nicht immer machbar und mit Zusatzaufwand verbunden. Die Verwendung einer permanenten Stromversorgung bei sich bewegenden Teilen ist nicht sinnvoll. Die Informations- und Energieübertragung bei RFID-Transpondern erfolgt kontaktlos über elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich LF, HF und UHF.

Die beiden letztgenannten Aspekte zielen auf die geeignete Auswahl der Position des Sensors auf dem Bauteil, um zum einen die Signalübertragung zur Sende- und Empfängereinheit zu gewährleisten und zum anderen keine Bauteilschädigung zu verursachen. Die Fixierung des Sensors auf der Oberfläche des Bauteils ist mit den üblichen Fügetechniken realisierbar. Auch steht die Möglichkeit der Integration des Sensors in die Werkstoffmatrix des Bauteils zur Disposition. Der Schaltkreis des Sensors selbst ist vor äußeren Einflüssen geschützt auszuführen. Datenübertragungsrate, Abstand Sensor Sende-/ Empfängereinheit, Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen bis hin zur Gewährleistung der Recyclingfähigkeit sind weiterführende Randbedingungen, die bei einem Sensoreinsatz zu beachten sind.

3.3 Nutzens Betrachtung

Die wesentliche Frage, die nicht nur einen Sensoreinsatz rechtfertigt, ist die nach dem Nutzen, der sich daraus ableiten lässt. Sensoren inkl. Sende- und Empfangstechnik sowie die erforderliche Informationsverarbeitungs- und Auswertesoftware stellen Aufwand dar und sind dem Nutzen gegenüberzustellen. Sich dabei rein auf den monetären Vorteil zu fokussieren, würde das Potential des Sensoreinsatzes deutlich einschränken. Sensoren und deren Peripherie verursachen nicht nur Mehrkosten, sondern einen deutlich höheren Mehrwert, was anhand der nächsten Ausführungen erkennbar werden soll.

Die Fragen nach der Identität von Bauteilen, „Wer bin ich?“, sowie nach dem Standort von Teilen, „Wo bin ich?“, begegnen häufig im täglichen Leben und können mit Hilfe von Sensoren sicher beantwortet werden. Die Frage nach dem Bauteilzustand, „Wie geht es mir?“, stellt schon eine Herausforderung dar. Verbindet sich mit dieser letztgenannten Frage die Beurteilung des Zustandes eines Teiles, das z. B. rotiert, dann stoßen die Überwachungsmöglichkeiten gegenwärtig an Grenzen.

Gelingt es, z. B. mit Hilfe eines Schwingungssensors, das Verhalten von Bauteilen im laufenden Betrieb zu überwachen, dann lassen sich daraus belastungsbedingte Veränderungen ermitteln. So können die mit Soll-IST-Vergleich-Routinen gemessenen Abweichungen von einem Referenzsignal zur Charakterisierung des Schwingungsverhaltens von sensorbestückten Bauteilen und deren Umgebung dienen. Die Gefahr eines frühzeitigen Bauteilausfalls, aufgrund wiederholend auftretender wechselnder u/o schwellender Belastungen, ist mit der Anwendung einer online-Bauteilüberwachung deutlich reduzierbar. Eine Bauteilermüdung, ausgehend von Rissen im mikroskopischen Kristallgefüge, kann zu makroskopischen Rissen und letztendlich zum Bauteilbruch führen. Ausgenommen bei Überlastungen (Missbrauch), treten belastungsbedingte Bauteilveränderungen nicht plötzlich auf, sondern sind an das Zusammenspiel verschiedener Randbedingungen der Bruchmechanik (Geometrie, Festigkeit, Fertigung, Belastung) geknüpft, die mehr allmählich auftretenden Ausfallerscheinungen entsprechen[1]. Diese in der Mikrostruktur beginnenden Ausfallerscheinung möglichst frühzeitig detektieren zu können, bringt genau den o. g. Mehrwert.

Denn das Wissen, ob ein Bauteil noch über eine ausreichend hohe Betriebsfestigkeit verfügt, ist wesentlich, wenn es um die Bewertung der Bauteilsicherheit (kein Ausfall vor Erreichen der Bemessungslbensdauer für eine geforderte rechnerische Ausfallwahrscheinlichkeit) geht. Da es nicht gelingt, die mikrostrukturellen Veränderungen eines im Einsatz befindlichen Bauteils in situ exakt zu bestimmen bzw. über Simulationsrechnungen vorauszuberechnen, gibt es Unsicherheiten bei der Bauteilauslegung. Oder einfach ausgedrückt, die Unsicherheit fährt mit. In der Praxis bedeutet das, dass Bauteile mit Sicherheiten versehen werden, um unvorhergesehene Ausfälle zu vermeiden. Mit Simulationsrechnungen, die auf phänomenologischen Werkstoffmodellen basieren, werden kritische Bauteilbereiche ermittelt, jedoch ist es nicht möglich, vorauszubestimmen, wann und wo genau im Einzelfall der Fall der Fälle eintritt. Zur Schärfung der Vorhersagegenauigkeit können u. a. visioelastische Berechnungsansätze für die Werkstoffmodelle dienen, die die Veränderungen in der Mikrostruktur der Werkstoffe beschreiben [2]. Abzuwägen ist, ob sich der damit verbundene enorm hohe Berechnungsaufwand lohnt. Eine andere Möglichkeit ist die o. g. Verwendung von Sensoren, um das Verhalten der Bauteile permanent oder temporär überwachen zu können. Am besten mit dem Anspruch der direkten Einbindung der Sensoren in die Bauteilmatrix und gleichzeitiger kontaktloser Informationsübertragung.

3.4 Anwendungsbeispiel Kunststoff-Schaltgabel

Die Kunststoff-Schaltgabel zusätzlich mit Sensoren auszustatten, war eine gute Option, um deren Funktionalität weiter zu erhöhen. Schaltgabeln dienen der Übertragung des Schaltbefehls von der externen Schaltung über die Schiebemuffe auf die Synchronisierung eines Schaltgetriebes. Die Schaltgabel ist konventionell mit Magneten ausgestattet, um die Position der Schaltgabel im Getriebe während des Betriebes bestimmen zu können. Die Auslegung der Schaltgabeln erfolgt unter Beachtung des vorhandenen Bauraums sowie den zugehörigen Lastanforderungen. Speziell die Lastanforderungen basieren auf im Prüflabor ermittelten Daten der Betriebsfestigkeitsuntersuchungen. Da keine Werte zur exakten Charakterisierung des Bauteilverhaltens unter realen Lastbedingungen im Getriebe vorliegen, orientieren sich die Vorgabewerte aus Sicherheitsgründen auf maximal mögliche Belastungen. Da zudem die Schaltgabeln während des Schaltvorgangs zyklisch hohen Belastung unterzogen werden, ergeben sich Unterschiede zwischen den Vorgabewerten und den reell auftretenden Werten. Die Integration von kontaktlos arbeitenden Sensoren in oder auf der Schaltgabel wäre ein Schritt, um die belastungsorientierte Bauteilauslegung zu unterstützen. Die Integration speziell von Schwingungssensoren in oder auf die Schaltgabel könnte dazu einen Beitrag liefern (Bild 5).

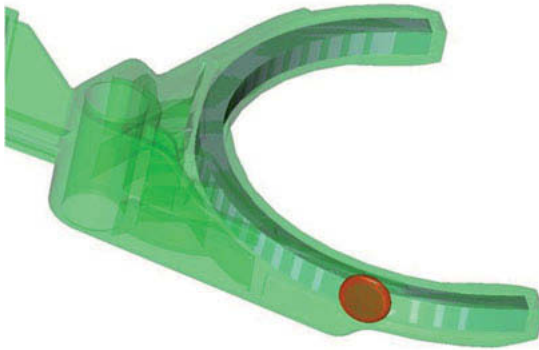


Bild 5: Schaltgabel mit integriertem kontaktlosem RFID-Transponder zur Schwingungsmessung

Die Verwendung von Kunststoffen, speziell Thermoplasten, eröffnet die Möglichkeit, genau die e. g. Randbedingungen zu erfüllen, Sensoren in die Werkstoffmatrix einzubetten. D.h. die Sensoren werden in die Kunststoffmatrix komplett oder teilweise eingeschlossen. Um reproduzierbare Messergebnisse zu erzielen, ist während des Spritzvorgangs darauf zu achten, dass die Sensoren in der Kavität des Kunststoffspritzwerkzeuges keine Ortsveränderung erfahren. Auch stellt die Temperatur des Spritzgutes eine besondere Herausforderung für die Sensoren dar, um deren Funktion aufrechtzuerhalten. So ist eine gängige Temperaturobergrenze für kurzzeitig ertragbare Temperatur bei RFID-Chips mit 180°C schon sehr hoch angesetzt. Bei einer Schmelztemperatur von jenseits 360°C, stellt genau das die wesentliche Herausforderung dar.

3.5 Ausblick - Bauteilüberwachung

Eine besonders attraktive Nutzung von online-Informationen des Bauteilzustandes zielt auf die frühzeitige Indikation eines möglichen Bauteilausfalls für Prognosezwecke hin. Die sich verändernden äußeren Bedingungen sowie die sich ergebenden Veränderungen am/ im Objekt (Bauteil) während dessen Nutzung wirken sich unterschiedlich auf dessen Funktion, Lebensdauer und Erscheinungsform aus. Die reine Beobachtung von Bauteilen, z. B. mit Kameras und Scannern, bietet die Möglichkeit, sichtbare Bauteilveränderungen zu erkennen. Damit verbunden ist das Warten bis etwas Auswertbares an der Bauteiloberfläche/ -form bzw. -gestalt erkennbar wird. Diese morphologische Herangehensweise entspricht mehr einem Reagieren auf eine Zustandsänderung. Um einen Vorgang aktiv beeinflussen zu können, sind sehr frühzeitig Informationen über das Bauteilverhalten erforderlich. Aktiv beeinflussen heißt, die Initiative ergreifen. Werden Gestaltsveränderungen wahrgenommen, dann haben im Inneren des Objektes, in der Mikrostruktur, schon teilweise kritische Veränderungen stattgefunden. Mit der online-Überwachung des Schwingungs- und Temperaturverhaltens am/ im Objekt besteht die Chance, mikrostrukturell bedingte Eigenschaftsveränderungen frühzeitig zu erkennen. Damit verlängert sich der Reaktionszeitraum um das Zeitfenster vom Erkennen einer mikrostrukturellen Veränderung/ Störung bis zum Sichtbarwerden dieser an der Bauteiloberfläche.

Bei Bauteilen, die einer schwellenden oder wechselnden Belastung ausgesetzt sind, kann es zur Materialermüdung kommen, die weiterführend zur Funktionsänderung bis, im Extremfall, zum Bauteilausfall führen kann. Damit ein Bauteil über die gesamte Einsatzdauer die Funktion erfüllt, werden bei der Bauteilauslegung anhand von Betriebsfestigkeitsuntersuchungen rechnerische sowie versuchstechnische Lebensdauerabschätzungen vorgenommen. Da es sich um Abschätzungen handelt, sind Sicherheitsaufschläge gängige Praxis und das nicht nur für

ein Teil, sondern für alle Teile einer Anlage/ Maschine/ Fahrzeug/ etc., die einer mechanischen Belastung ausgesetzt sind.

Gelingt es, anhand der Analyse von markanten, online messbaren Veränderungen an Einzelbauteilen auf das Verhalten von Systemen (Anlagen, Fahrzeuge) Rückschlüsse zu ziehen, dann ergeben sich neue Möglichkeiten z. B. mit dem Hintergrund „Predictive Maintenance“. Die Abschätzung von Wartungsintervallen wird von der realen Bewertung des Zustandes überwachter Einheiten abgelöst. Der Aufwand zur Aufrechterhaltung von Systemen reduziert sich deutlich, da u. a. frühzeitig auf zu erwartende Komplikationen/ Veränderungen reagiert werden kann [3]. Weg vom Warten bis etwas passiert und hin zum aktiven Handeln bei der Instandhaltung von Anlagen im weitesten Sinne.

4. Ergebnisse/ Fazit

Die konzipierte und hergestellte Kunststoff-Schaltgabel konnte die gestellten Anforderungen im kompletten Getriebetestlauf erfüllen. Die dargelegte Umsetzungsmethodik zeigt einen innovativen Weg, Kunststoff auch unter untypischen Randbedingungen im Zusammenspiel mit anderen Werkstoffen verwenden zu können und damit neues Potential bei der Bauteilauslegung zu eröffnen. Die Kunststoff-Schaltgabel wurde als Versuchsträger herangezogen und mittels Temperatur- und 3D-Schwingungssensor aufgewertet. Die Messung der Temperatur direkt im Bauteil kann zum einen der reinen Überwachung des Betriebszustandes dienen und/ oder im Falle einer Prototypen- oder Vorserienanwendung die tatsächliche Belastung im Betrieb deutlich genauer darstellen. Ersteres ebnet den Weg zur bereits beschriebenen Predictive Maintenance. Letzteres ermöglicht unter Umständen eine weitere Optimierung am Bauteil, da die anliegende reale Temperatur gerade im Temperaturbereich zwischen 110°C und 160°C einen enormen Einfluss auf die Wahl des Grundpolymers und somit auch auf den Rohstoffpreis hat. Ähnlich verhält es sich mit dem 3D-Schwingungssensor, der zusätzlich die Möglichkeit aufzeigt, den Synchronisierungsprozess direkt messen zu können. So bietet sich die Chance, besonders bei hoch belasteten Schaltungen (bspw. im Nutzfahrzeug), weiteres Potential in der Auslegung der Bauteile aufzudecken.

Literaturhinweise

- [1] Cetin Morris Sonsino (2008): Betriebsfestigkeit - Eine Einführung in die Begriffe und ausgewählte Bemessungsgrundlagen. Materials Testing: Vol. 50, No. 1-2, pp. 77-90.
- [2] B. Schulze, J. Leopold, G. Schmidt, A. Bertz (1994) - Technologische Voraussetzungen für Mikrovisioplastische Untersuchungen. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Vol. 25, No. 5, pp. 183-190.
- [3] Thomas Bartz-Beielstein, Jochen Blaurock, Sebastian Krey, Yixi Fu, Niclas Kallenbach, Marc Möller (2017): Structural Health Monitoring von Faserverbundstrukturen mittels Piezosensoren – Untersuchungen zum experimentellen Design. CIPlus, S. 1-18, TH Köln.

New class-A sheet molding compounds for automotive exterior components using a single-step surface hybridization

Co-compression molding of high-quality surfaces

Marton Kardos, Olaf Täger, Enrico Körner,
Volkswagen AG, Wolfsburg

Kurzfassung

Sheet molding compound (SMC) Materialien haben gravierende Vorteile gegenüber Metalle für Außenhautanwendungen. Sie stellen eine Leichtbaualternative dar mit verbesserten Designfreiheit und mit der Möglichkeit für Antennenintegration. Deren Formgebung erfolgt im Fließpressverfahren, welches im Vergleich mit Metallumformung kosten- und zeiteffizienter ist. Jedoch entspricht die Oberfläche von lackierten SMC-Teilen oft nicht den hohe Anforderungen der Automobilindustrie. Herstellungsbedingt beinhaltet dieses stark heterogene Material eine nicht vernachlässigbare Menge an eingeschlossener Luft, was zu die Entstehung von Lack-Fehlstellen während des Lackierprozesses führt. Dieser Studie präsentiert einen Lösungsansatz namens Co-Compression Molding (CCM), einem Herstellungsverfahren für hybride Bauteile mit verbesserter Lackierbarkeit in einem Prozessschritt. Eine modifizierte Pressmasse wurde entwickelt um die verbesserte Oberflächenqualität zu gewährleisten, was auf der Hinterseite des Bauteils durch ein herkömmliches Class-A SMC unterstützt wird. Durch den kontrollierten Fließvorgang des CCM-Verfahrens lässt sich ein Hybridbauteil herstellen. Die Anwendbarkeit der Technologie wurde durch die Herstellung von Demonstratorbauteilen nachgewiesen, die im Anschluss lackiert und mit herkömmlichen SMC-Materialien verglichen wurden.

Abstract

Sheet-molding compounds have inherent advantages over metals for body panel applications. They make possible lightweight exterior parts with improved design freedom and antenna integration capability. Due to simple manufacturing and assembly processes they can be produced in a cost- and time-efficient manner, even compared to steel structures. However, their painted surface quality tends to fall short of the high standards of the automotive

industry. The material contains a non-negligible level of porosity intrinsic to its heterogeneous nature and to the compounding process, which leads to the formation of paint defects during high-temperature paint drying. This study presents co-compression molding as an approach to a solution; in other words, the single-step manufacturing of a hybrid material component with improved paintability. A modified SMC has been developed to function as the surface compound, and is supported by a conventional SMC on the B-side. By preventing the mixing of these compounds during compression molding, a hybrid component can be manufactured. Proof of concept was achieved by molding and painting full-scale SMC body panels employing this hybrid molding technology, and directly comparing them to commercially available SMC panels.

1. Introduction

Sheet-molding compounds (SMC) are made up of a thermosetting resin matrix, fillers such as calcium carbonate or hollow-glass spheres, chopped reinforcing fibers (usually glass or carbon), and additives. They are widely used in many segments of industry due to their excellent mechanical properties, low density, corrosion resistance and other inherent advantages over thermoplastics and metals, such as their low coefficient of thermal expansion and transparency to electromagnetic radiation [1-3].

However, SMC panels often develop certain characteristic types of paint defect during the coating process, such as paint pops and pin-holes. Depending on their size and depth, these defects require the affected part to be locally reworked, fully repainted or scrapped which in turn leads to erratic additional costs [4-9]. These issues associated with paintability have for decades been hindering the widespread application of SMCs.

As presented by Kardos et al. [10], lowering the fiber weight fraction (W_f) of a Class-A SMC from the conventional approx. 30 wt% to 10 wt% significantly reduces the level of final porosity (φ_{pf}) in the molded material. On the one hand, this leads to improved surface quality with regard to both waviness (as measured in the short- and long-wavelength range) and the occurrence of paint defects. On the other hand, reducing the amount of reinforcing fibers will lead to a significant deterioration of mechanical properties, as predicted by the modified rule of mixtures [11-12]. To counteract this negative effect, a modified compression molding pro-

cess of a hybrid material charge is proposed and investigated, hereinafter referred to as co-compression molding (CCM)¹.

CCM denotes the process of compression molding more than one material in a single step. As opposed to a conventional molding, CCM employs a hybrid material charge which consists of at least two individual molding compounds, as shown in Fig. 1. This hybrid charge is then placed into the mold to fill the cavity and form a hybrid component in a single stroke. To obtain a hybrid part from the multi-material charge it is important to prevent the materials from mixing during compression flow, achieving this through an understanding of the relative movements of the individual layers. Intuitively, longer flow paths and complex geometries permit more mixing and intermingling during the flow. However, molding compounds require a certain amount of flow in order to promote porosity elimination and the breakup of fiber bundles at the surface [5]. It is therefore important to identify optimal molding parameters, such as closing speed, charge placement and mold coverage.

The relative movement of individual SMC layers in a charge during compression molding has been studied scarcely at all, and when so, the studies typically employ the same material in all layers of the charge, using colored SMC sheets to aid visual distinguishability. Hence, the notion of compression-molding a hybrid material SMC charge in order to obtain a full-area hybrid part has remained almost completely unexamined. Barone and Caulk [13] investigated the kinematic mechanisms controlling the flow of molding compounds by stacking black and white layers of the same SMC and conducting molding trials with varying speeds, temperatures and charge heights. They used a conventional Class-A compound with 30 wt% glass fiber and 40 wt% CaCO₃ filling. They found that all layers of the SMC charge extend uniformly, with little to no relative movement. This is especially true of higher molding speeds and lower mold temperatures. Olsson et al. [14] used colored SMC sheets to investigate relative movement and found that a high vacuum, low ram velocity and low mold temperature lead to a more homogeneous flow.

¹ Co-molding usually denotes the process of compression-molding a flowable compound with inserts placed in the cavity. These inserts are typically made of other materials such as metals or unidirectionally reinforced, preconsolidated prepregs, and do not flow with the compound. The name co-compression molding emphasizes that all materials are compressed and cured at the same time.

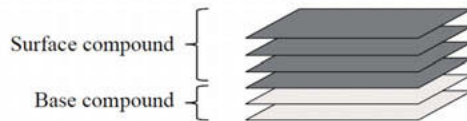


Fig. 1: Schematic representation of hybrid SMC charge, comprising of four layers of surface compound and two layers of the base compound.

This paper presents the investigation of the proposed process using test panels and full-scale demonstrator parts in order to prove its applicability for series production and to permit the cost-efficient manufacturing of SMC panels with an improved surface appearance. The relative movement of rheologically distinct materials is examined, along with porosity content and the mechanical and thermal behavior of molded hybrid parts.

2. Materials

Investigation of the proposed process was performed by studying the molding behavior of two materials: a conventional Class-A SMC to provide mechanical stability, hereinafter referred to as the *base compound*, and its modified version with a reduced fiber weight fraction and used as the outer layer on the side to be painted, hereinafter referred to as the *surface compound*. This layout is presented in Fig. 2, with the base and surface compounds colored white and black respectively.

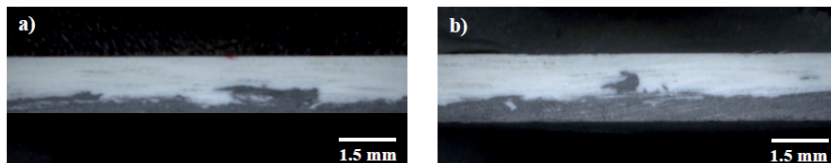


Fig. 2: Micrographs of cross-sections of hybrid parts molded employing the CCM technique. Micrograph (a) shows the flow zone, while (b) was extracted from the region covered by the charge prior to compression.

The commercially available *HUP 14/30 RN-1090* 30-wt% glass-fiber-reinforced Class-A compound manufactured by Polynt Composites Germany GmbH was chosen as the base material for the detailed investigation. This SMC is a 1.9 g/cm³ density, conventional Class-A compound with an unsaturated polyester matrix, CaCO₃ filler and low-profile additives. This

material was employed in all further experiments as the base material in order to provide structural stability on the B-side of the molded part. A modified version of the base material was defined according to the results presented in a previous study [10]. The modified material was chemically and in every other aspect identical to the base material, with the only difference being the lower fiber-weight fraction. The modified material was chosen to contain 10 wt% glass fibers with a fiber length L_f of 25 mm. It is important to note that there is no commercially available SMC on the market with such a low fiber-weight fraction of glass fibers: 10 wt% accounts for a mere 7 vol%.

All materials were produced at the suppliers, employing the same recipe for the paste. For preliminary trials investigating the flow mechanism of co-compression molding, a colored version of the 10 wt% SMC was produced with the addition of a small amount of carbon black. Using this material in combination with a natural-colored (white) 30 wt% compound allowed the simple and unambiguous visual recognition of materials even after compression molding.

Materials for preliminary trials (black and white combinations) were compounded on a research-grade SMC line, delivering 80 cm wide rolls. (At this stage the supplier tested the modified compound to see if any issues arose during production due to the higher flowability and altered manageability.) For paint quality examinations the supplier compounded both materials on the same series-production SMC line to ensure identical manufacturing conditions and thus comparability and - at this stage - reproducibility for a potential series application. These rolls were 150 cm wide, as is usual in series production. At this stage of the investigation the two materials were uncolored (white) in order to avoid the potential influence of colorants on paintability.

The area density of the commercially available 30 wt% SMC was 5000 g/m². The compounding process had to be scaled down for the 10 wt% SMC to avoid producing a compound with an overly thick layer of paste and to provide manageability and stiffness for handling. Hence, the area density of the 10 wt% SMC was set at 2500 g/m², exactly half of the grammage of the conventional compound. This made it possible to match the amount of base compound used in the charge, by simply doubling the layers of surface compound, as shown in Fig. 1.

3. Experimental

Lowering the W_f is expected to reduce the extensional viscosity of the compound, leading to improved flowability and a lower compression stress needed for the flow. Hence, the surface

compound is expected to begin flowing before the base compound does, thus engulfing the base compound. This pre-flow phenomenon is essentially similar to the squish flow² exhibited by the thin layer of material in direct contact with the heated tool in monolithic SMC compression molding. The temperature of this thin layer of material is higher than that of the bulk material, which leads to a decrease in extensional viscosity and thus to the ejection of material, i.e. squish. This phenomenon is expected to be much more pronounced in the case of CCM, since instead of a thin layer of warmer material, all layers of the surface compound exhibit lower extensional viscosity. This was proven by initial trials performed on flat plate molds with black and white material combinations. The following section presents the further examination of the squish effect.

3.1 Preliminary investigation

To further investigate mixing and flow behavior during CCM, a 450 mm x 450 mm plate mold equipped with a constant thickness U-section was employed. Features such as the four radii in a U-section force the material to change direction, potentially disturbing the stable extensional flow and bringing about mixing. The mold was equipped with a shear edge and vacuum assistance, and all molding parameters were set according to the supplier's recommendations: closing speed was 1 mm/s, molding pressure was 100 bar, tool temperature was 140°C, while curing time in the closed mold was 120 s.

Samples were compression-molded employing a mold coverage of 50% and 25%, with central charge placement. The charges were comprised of two base compound layers and four surface compound layers, amounting to a 1:1 ratio by weight. Molded plates were first visually inspected to assess the severity of mixing and squish – as shown in Fig. 3, showing a plate molded using 50% mold coverage. The individual layers of the charge did not mix during compression flow since the surface compound was undisturbed in the case of all molded plates. The squish effect was visible and increasingly pronounced as mold coverage decreases. The local ratio of base to surface compound along the diameter was chosen as the indicator to aid the identification of squish-dominated zones and to help quantify material distribution along the cross-section. The ratio was calculated with tailor-made image analysis software in MATLAB™ and will hereinafter be referred to as the *mixture ratio*. Samples were divided into 100 segments along the cross-section and the number of white and black pixels

² Squish flow is the first stage of compression molding SMC, followed by plug flow and boiling, as presented by Odenberger et al [17].

were calculated for each segment. If the number of pixels displaying the black material equals the number of pixels showing white material, the ratio Π be 0.5 or 50%. If a given section contains only black pixels, the mixture ratio will have a value of 0. Plotting the ratio against the normalized length of the cross section thus reveals abrupt changes, such as the onset of the squish zone, where values near zero are expected.



Fig. 3: Photographs of the two sides of the trial parts molded with 50% mold coverage and central charge placement.

3.2 Porosity

The porosity of the molded SMC materials was investigated via X-ray computer tomography (XCT) analysis, which proved to be a very adequate analysis method [7, 15]. Samples were extracted from molded plates by water-jet cutting. Three samples were taken from each material at varying locations in order to account for potential spatial variations. Gray-scale analysis was employed to determine the pore content of the samples.

The through-thickness distribution of φ_{pf} in CCM hybrid samples was analyzed as well. It has been shown that the surface material has a reduced level of porosity in comparison with the conventional base material [10], but the main goal remains to keep the side to be painted of molded parts free of sub-surface voids in order to minimize the probability of paint defects occurring. With respect to this objective, the location of pores in the molded part is also very important, as sub-surface pores are critical with regard to paintability. Accordingly, porosity distribution along the thickness was also determined on the basis of the XCT analysis.

3.3 Thermal expansion

One major concern regarding any hybrid material system is warpage arising from the difference in the thermal expansion behavior of the individual materials. To investigate warpage, the coefficient of thermal expansion (CTE) of both compounds was measured individually and also as a hybrid material combination. Measurements were performed employing both a conventional dilatometer and a visual inspection system based on digital image correlation (DIC). Dilatometers usually require a small oblong sample, in the case of the employed device 2mm x 2mm x 20 mm. It is challenging to ensure that the extracted samples contain a balanced mixture of the heterogeneous material constituent, i.e. fibers and resin-rich regions, especially in the case of a hybrid part.

The DIC-based measurements, on the other hand, were performed on full-size molded outer panels. Identification points were applied to the sample surface, the position of which were monitored by the DIC system during the heating cycle in a circulating air oven. Through a window on the side of the oven the camera system monitored the thermal expansion of samples along three horizontal and six vertical lines. Changes in the distance between identification points due to thermal expansion were measured during heating from room temperature (approx. 30°C) to 80°C.

3.4 Full-scale demonstrator parts

The CCM process was conceived for Class-A parts, which normally have a constant wall thickness throughout, lacking ribs or other features that could potentially disturb the flow and cause the compounds to mix. However, to gain an understanding of the boundaries of the technique, its application in a semi-structural truck exterior panel was also investigated, using a series-production truck fender mold from MAN. The geometry consists of many complex features including surface offsets, thickness variations between 3 mm and 10 mm, and ribs and screw bosses on the back. The weight of a single fender is 9.7 kg molded from a 1.9 g/cm³ density SMC material. To enable the rapid visual assessment of mixing behavior, the first trials were performed on a black and white material combination, the surface compound being colored using carbon black³. Mold coverage was approx. 50% with a central charge

³ Note that the materials used for the black and white combination were similar to those used in the previous section, but were provided by the Polytec Group.

placement. The squish effect is expected to dominate the circumferential area of the part due to the complexity of the geometry.

In order to compare the paintability of the CCM parts to the conventional monolithic material and to ensure reproducibility, a representative batch of twenty-five fenders was molded employing the same material combination and molding parameters used in the preliminary investigations. The two compounds were uncolored for the reasons discussed in Section 2, and delivered from a series-production SMC line on rolls 150 cm wide. The molded parts were painted in the series-production painting process and subsequently compared to series production parts.

4. Results

4.1 Preliminary investigations

As discussed in the previous section, the mixing behavior was quantified employing the mixture ratio along the cross-section of samples. As shown in Fig. 4, the squish-dominated areas at the ends of the 50% mold coverage part are symmetrical and account for approx. 2% of the total length. The mixture ratio for most of the part varies around 50%, which is the mean value of the entire part, as shown by the dashed horizontal red line. This applies to the U-section and to the horizontal section that follows as well, which indicates that these geometrical features of the cavity do not disturb the flow. In the case of the 25% mold coverage samples, the variation around the mean value is somewhat more pronounced but the same observation applies: the flow through the U-section did not cause the individual materials to mix. As mentioned earlier, the squish zones at the two ends are longer but symmetrical, accounting for approx. 8% of the cross-section at each end. The results suggest that a mold coverage of 50% leads to less variation in the mixture ratio and a less pronounced squish zone and thus is recommended for part production employing the CCM technique.

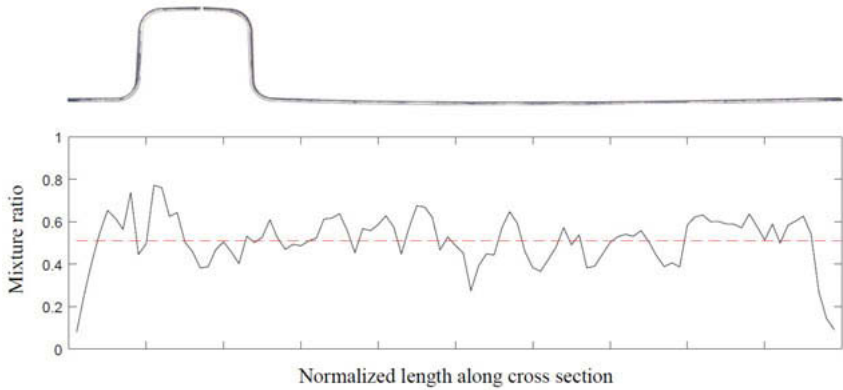


Fig. 4: Cross-sectional analysis of a U-profile sample molded with 50% mold coverage. The image shows the cross-section of the sample in the middle plane while the graph shows the mixture ratio along the length of the sample.

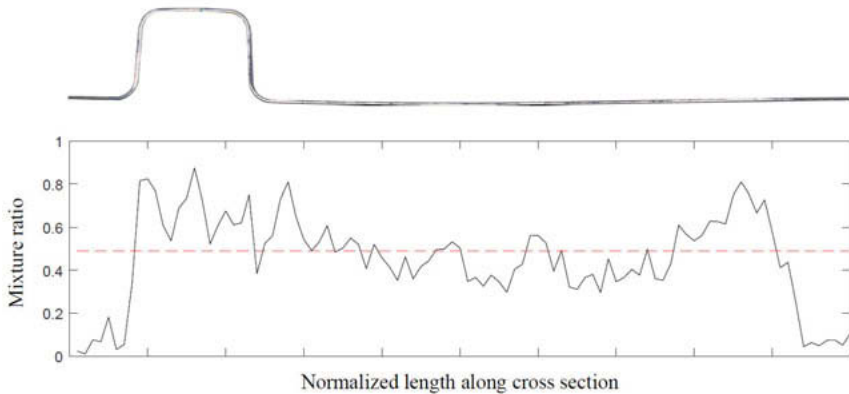


Fig. 5: Cross-sectional analysis of a U-profile sample molded with 25% mold coverage. The image shows the cross-section of the sample in the middle plane while the graph shows the mixture ratio along the length of the sample.

4.2 Porosity

The base material exhibits a significantly higher final porosity (φ_{pf}) coupled with increased variation as compared with the surface compound, as shown in Fig. 6a. Porosity of the hybrid

CCM samples lies between that of the individual materials, as does its variation. As such, it was shown that the hybrid nature of the CCM plates did not give rise to mechanisms leading to substantial out-of-plane pore flow, since porosity distribution is mainly centered around the middle third of the thickness, in a similar way to the distribution of monolithic compounds [7,15]. The porosity distribution of the 50% mold coverage CCM material is plotted against the normalized thickness in Fig. 6b.

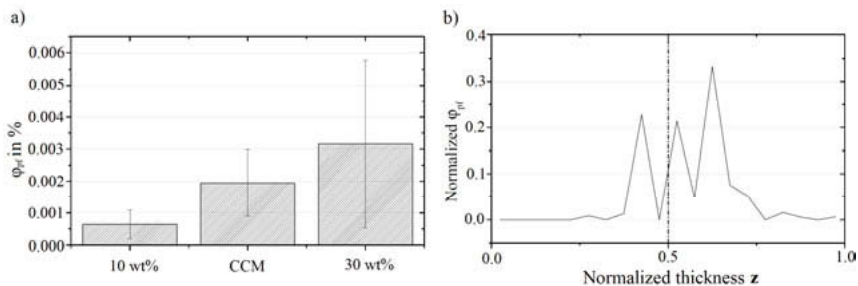


Fig. 6: Final porosity of the surface, base and hybrid materials (a) and its distribution (b) along the thickness for the CCM hybrid.

4.3 Thermal expansion

The coefficient of thermal expansion (α) for both individual materials and their 1:1 ratio CCM combination is plotted in Fig. 7. Both dilatometry and DIC results have very similar results, with α showing a linear correlation to W_i , as expected from the rule of mixtures. The slight difference between the surface and base compounds ($17,5 \times 10^{-6} 1/K$ and $10 \times 10^{-6} 1/K$) was deemed unproblematic for exterior body panel applications. This finding was supported by the fact that no warpage was observed during the heat cycling of hybrid exterior panels.

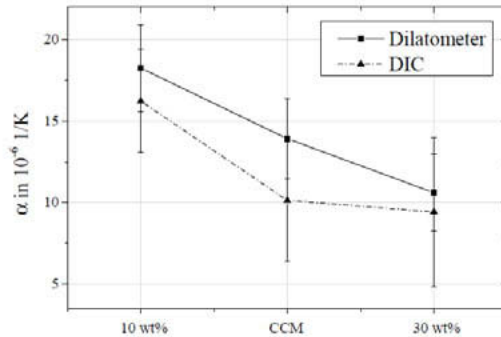


Fig. 7: Coefficient of thermal expansion for the hybrid material and their individual constituents measured by both dilatometry and digital image correlation by the GOM Artemis system.

4.4 Full-scale demonstrator parts

Fig. 8 shows photographs of the molded truck fender, employing the black and white material combination. The front side (a) shows an almost undisturbed surface material where, apart from small areas around the most complex geometrical features, the materials did not mix as the compounds filled the mold cavity. These small areas mark local disturbances in the plug flow, which led to the compounds mixing during flow. Examining the back side of the fender (b) it is clear that the squish-dominated areas around the edge of the part are very pronounced due to the relatively small mold coverage and the complex geometry. This circumferential area is covered by the surface compound from both sides, which suggests that the outer approx. 10 cm strip along the edge of the fender consists solely of the surface material. Since this area hosts all force-transmission points of the semi-structural part, it is crucial to ensure the desired mechanical performance, which is mainly determined by the local fiber content.

Screw bosses along the squish-dominated edge area were extracted to determine the local fiber weight fraction via the ashing method. These five areas are marked with red circles on Fig. 8b. A resulting local W_f higher than 10% would indicate that the extracted material does not consist purely of the surface compound, but is rather a mixture of that and the 30 wt% base compound.

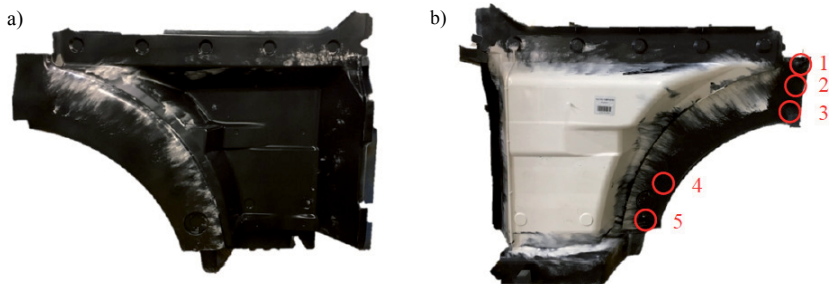


Fig. 8: Photographs showing the mixing behavior of a co-compression-molded truck fender with 50% mold coverage on the (a) Class-A side and the (b) back side.

Averaged local W_f for the five investigated features was $15.62\% \pm 1.86\%$. This result proves that, although the surface of the extracted areas is completely dominated by the black 10 wt% surface compound on both the front and the back sides, the 30 wt% compound is also present in the extracted volume. Part-level mechanical testing of the molded parts will determine whether the local W_f is adequate with regard to mechanical properties. Note that compounds with lower viscosity are expected to flow more easily into complex geometrical features, such as the aforementioned ribbed screw bosses. Hence, a greater amount of the lower-viscosity compound can always be expected in such regions, but the circumferential squish-dominated area can be minimized in several ways, such as by choosing a higher mold coverage or modified charge placement. Other methods to minimize squish will be studied further in future work.

Since both the base and surface compounds were uncolored (white) in the case of the representative batch molding, visual distinguishability of the individual compounds was challenging. Round samples with a 2.5 mm diameter were extracted from several positions on the molded parts, to be polished and imaged via cross-sectional microscopy. The resulting images display one side with noticeably more fiber bundles than the other, thus proving that the compounds did not mix in the mold during flow, as was expected from the black and white material trials. Fig. 9 shows one of these cross-sectional micrographs.

The results of the comparison indicate an overall improvement in appearance with regard to waviness and porosity, in particular in low-pressure regions of the mold, where molding compounds are known to display artifacts and increased waviness. The material combination and

the process of co-compression molding has thus been proven to be applicable to semi-structural painted components with complex geometries and large surface areas as well.



Fig. 9: Micrograph of sample cross-section, showing more fibers in the upper half of the thickness, marking the side of the base material.

5. Discussion

It has been shown that co-compression molding has the capability to produce full-area hybrids in a single molding step, as opposed to other solution approaches such as in-mold coating (IMC), where additional equipment, modified tooling and supplementary process steps are needed. Employing IMC will generally mean significant additional costs and longer cycle times while sacrificing some aspects of the design freedom as well [1,16]. Co-compression molding, on the other hand, enables hybrid parts to be produced without the need for additional equipment or tool modifications. Cycle times and molding steps can be directly adopted from conventional molding. The only additional equipment required for switching over to CCM from conventional molding is a second SMC cutter for the surface material.

Although the circumferential area of parts was dominated by the surface compound due to extensive squish, the thereby deteriorated mechanical performance can be counteracted by increasing the local thickness of the part or by minimizing the squish. Techniques for minimizing the squish effect will be studied in future work. It was also shown that both the porosity and the coefficient of thermal expansion follow the rule of mixtures in the case of CCM hybrids. No difference was observed between the through-thickness porosity distribution of a monolithic SMC and the CCM hybrids, since most of the air was found in the middle third of the thickness.

Apart from the full-area hybrids presented in this study, locally hybridized components are also feasible with this technology, especially in the case of processes using multiple charges

to fill the mold cavity. This is very advantageous for components with Class-A and non-Class-A areas on the same side. During the preliminary testing of the CCM technology, sandwich structures were also produced, proving that the technique is applicable to various layouts with multiple materials.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to everyone who supported the activities presented in this study, with special thanks to AUDI AG for providing the U-section tooling, and Polynt Composites Germany GmbH for their constant support and for supplying the specialty materials. The authors also acknowledge MAN for kindly providing the fender tooling and for their assistance with the presented activities, as well as the Polytec Composites-Germany GmbH & Co. KG for their support and for hosting the molding trials.

References

- [1] L. Orgeas and P. J. J. Dumont, "Sheet Molding Compound," in *Molding of Thermosetting Plastics*, 2012, pp. 75-85.
- [2] J. Maxwell, "Exteriors," in *Plastics in the Automotive Industry*, Woodhead Publishing, 2010, pp. 91-118.
- [3] H. Schuerman, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2005.
- [4] L. M. Abrams and J. M. Castro, "Powder coating of sheet molding compound (SMC) body panels," *Polymer Composites*, vol. 22, no. 5, pp. 702-709, 1 10 2001.
- [5] W. Michaeli and K. Skrodolies, "Verbesserung der Oberflächeneigenschaften von SMC-Bauteilen mit Hilfe der Prozesssimulation," *Zeitschrift Kunststofftechnik/Journal of Plastics Technology*, no. 4, 2006.
- [6] E. Comte, D. Merhi, V. Michaud and J. A. Manson, "Void formation and transport during SMC manufacturing: Effect of the glass fiber sizing," 2006.
- [7] D. Ferré Sentis, L. Orgéas, P. J. Dumont, S. Rolland du Roscoat, M. Sager and P. Latil, "3D in situ observations of the compressibility and pore transport in Sheet Molding Compounds during the early stages of compression moulding," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 92, pp. 51-61, 2017.

- [8] Peter Stachel, "DaimlerChrysler fits coupes with SMC," *Reinforced Plastics*, vol. 47, no. 9, p. 4, 1 10 2003.
- [9] T. Schuh, P. Hilzendege and M. Polotzki, "SMC Technology 4.0: New roads for collaboration on the automotive value chain," in *VDI Conference*, Mannheim, 2016.
- [10] M. Kardos, E. Körner and O. Täger, "Novel material and manufacturing concepts for the medium volume production of lightweight composite body panels," Wolfsburg, 2018.
- [11] S. Fu, "Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers," *Composites Science and Technology*, vol. 56, no. 10, pp. 1179-1190, 2002.
- [12] F. Garesci and S. Fliegenger, *Young's modulus prediction of long fiber reinforced thermoplastics*, vol. 85, 2013, pp. 142-147.
- [13] M. R. Barone and D. A. Caulk, "Kinematics of flow in sheet molding compounds," *Polymer Composites*, vol. 6, no. 2, pp. 105-109, 1985.
- [14] N. Olsson, T. Lundström and K. Olofsson, "Compression Moulding of SMC: Coupling Between the Flow and the Local Void Contents," *International Conference on Composite Materials, ICCM 16*, 2007.
- [15] T. H. Le, P. J. Dumont, L. Orgéas, D. Favier, L. Salvo and E. Boller, "X-ray phase contrast microtomography for the analysis of the fibrous microstructure of SMC composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, no. 1, pp. 91-103, 2008.
- [16] S. Arnason, "In-mold coating of sheet molding compound moldings," *US Patent*, vol. 6, p. 222, 2000.
- [17] P. T. Odenberger, H. M. Andersson and T. S. Lundström, "Experimental flow-front visualisation in compression moulding of SMC," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 10, pp. 1125-1134, 1 10 2004.

HiPIMS technology opens up new possibilities for decorative plastic coating

Carl Schulz, M.Sc., Kunststoff-Institut Lüdenscheid

Abstract

The use of the modern HiPIMS (High-Power Impulse Magnetron Sputtering) technology promises a significant increase in quality in the field of plastic finishing in order to open up new, market-relevant applications. In addition to the advantages and possibilities that HiPIMS technology offers for the decorative market, the functionality of HiPIMS is explained and what should be taken into account when integrating it into existing DC sputtering systems for coating plastics.

1. Motivation

Poor adhesion or a lack of robustness of PVD layers often frustrates the desire in the decorative field to apply a robust PVD coating directly (without primer coating) to the plastic substrate or conversely a PVD coating to a primer (with no protective lacquer) in order to save process costs, to minimize scrap, to get a better gloss finish, to be able to reproduce structured plastic surfaces perfectly, or to implement a pre-coating for electroplating. The HiPIMS process offers opportunities of successfully achieving these goals.



Fig. 1: HiPIMS for finishing plastics (source: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH)

2. What does HiPIMS mean?

HiPIMS (High-Power Impulse Magnetron Sputtering) is a modern PVD process that boosts the interaction between the plastic and the PVD coating to a whole new level. Responsible for this is a pulser unit that can be integrated into DC magnetron sputtering systems with little effort. This pulser handles the constant energy supply pulsed during a DC sputtering process. Short pulses (e.g. 50 μ s) with significantly higher energy than is the case in DC magnetron sputtering and with relatively long off-times increase the plasma density significantly so that a significant portion of the coating material is ionized during the PVD process.

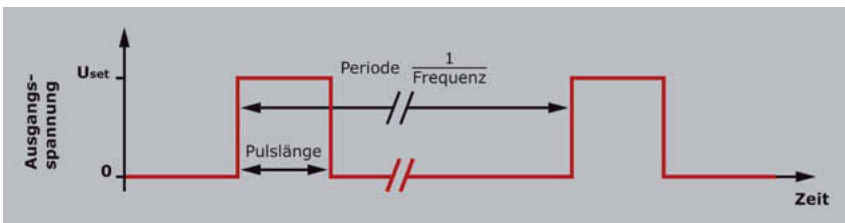


Fig. 2: Voltage profile of an HiPIMS process (source: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH)

3. Integration into a DC sputtering system

The possibility of integration into existing technologies is a great advantage for a new technology in gaining acceptance. HiPIMS technology can take advantage of this by a relatively simple incorporation of the pulse generator between the DC generator and the cathode (target).



Fig. 3: HiPIMS system at the Kunststoff-Institut Lüdenscheid equipped with a Magpul MP 2 pulse generator and a Plasus Emicon plasma emission spectrometer (source: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH)

In planning the upgrading of a DC sputtering system to an HiPIMS system, the most important aspects are:

- Output of the DC generator
- Cathode area
- Power supply between pulse generator and cathode
- Plasma monitoring options

Output of the DC generator: The DC generator, which in every DC sputtering system is responsible for the constant energy supply to the cathodes, must be able to deliver sufficient power to achieve the desired HiPIMS effect (significant ionization of the coating material). In HiPIMS processes, process temperatures are usually higher, so that the aspect of low thermal stability must be taken into account when coating plastics. It is therefore not advisable to purchase a very powerful DC generator for the upgrade if the plastic substrates would already be thermally damaged at only a moderate or low utilization of the DC generator. There

is thus a high probability that the output of the existing DC generators is suitable for the HiPIMS processing of plastics.

Cathode area: The larger the existing cathode area, the more powerful the pulse generator must be. The pulse generator must supply sufficient current per area, which makes the cost of purchasing a suitable pulse generator higher for large cathode areas than for small cathodes. $1\text{A}/\text{cm}^2$ is used as a guide value for the required current strength of the pulse generator.

Power supply between pulse generator and cathode: The power line must have a sufficiently large cross-section. The peak current with HiPIMS is many times higher (e.g. over 300 A) than the current in DC sputtering with a constant current. The power supply line between the pulse generator and cathode should be as short as possible in order to keep interference sources and electrical resistance to a minimum. The best possible result can be achieved by connecting the pulse generator directly to the cathode.

Plasma monitoring options: The sputtering process is a complex process. In addition to parameters such as process pressure, process gas, cathode current, target material, substrate temperature, BIAS and distance to the target, the HiPIMS process extends this parameter list to include the duty cycle at the pulse generator and the associated peak current, as well as the ionization of the coating material. To be able to establish an optimal setting for the HiPIMS process (e.g. the highest possible degree of ionization), it is necessary to monitor the species in the plasma by means of a so-called plasma monitoring. For this purpose, an optical sensor connected to the spectrometer via optical fibers is aligned with the plasma zone directly above the target surface.

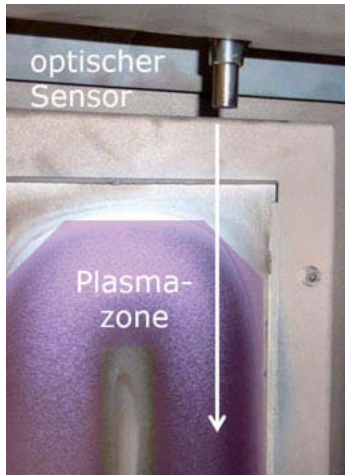


Fig. 4: Integration of an optical sensor for monitoring the species in the plasma
(source: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH)

As soon as the plasma is ignited, the emitted light is directed to the analyzer. Each species in the plasma produces characteristic intensities for different wavelengths. Within the wavelength spectrum from 200 nm to 1000 nm, atoms and ions in the plasma can be detected by their characteristic peaks.

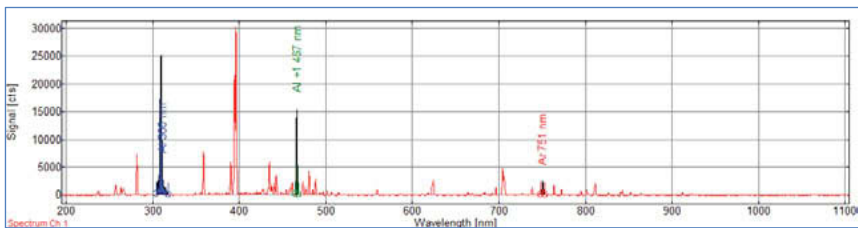


Fig. 5: Emission plasma spectrum of an HiPIMS process with aluminum as target
(blue = peak area aluminum atoms, green = peak area aluminum ions, red = argon)
(source: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH)

The peak area for the ionized coating material can be significantly increased by a suitable setting of the pulse duty factor at the pulse generator. It should be noted that the peak areas (integrated) are not to be regarded as absolute values and the ion/atom peak ratio is not representative of the ionization content of the coating material in the process. It is rather a rela-

tive value that should help to set the optimal process (the maximum achievable level of ionization) for the target material in question. Nor does it make sense to compare the ion/atom peak ratio to other target materials.

4. Advantages and new opportunities

The ionized coating material improves interactions with the surface of the plastic and generates more homogeneous and more robust layer properties. This opens up new possibilities for the decorative field. This offers opportunities for more robust coating systems using just a single layer of lacquer. The spectrum of protective lacquers that can be used in direct metalization can be enlarged here and this robustness achieved due to improved adhesion. Furthermore, such a layer system offers the possibility of precisely reproducing fine structures in the plastic substrate (e.g. eroded surfaces). Layers deposited by the HiPIMS process have an improved reproductive capability (which is also useful in gold coating for SEM images).

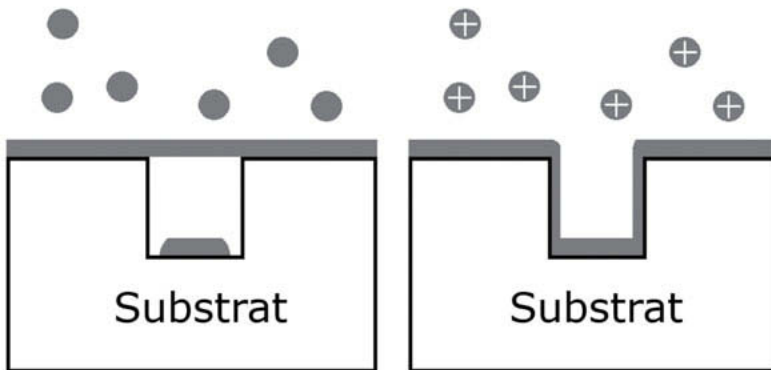


Fig. 6: Schematic of the better reproductive capability with HiPIMS (left, in DC sputtering, atoms close off the recess; right, with HiPIMS, ions reproduce the recess) (source Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH)

With a suitable primer coating and a suitable PVD material, the protective lacquer can be dispensed with in order to significantly reduce the costly wastage that arises with the protective coating. A more homogeneous layer structure results in an increase in the degree of gloss, which improves the appearance for high-gloss surfaces.

In plastic electroplating, the REACH regulation requires in the long term a renunciation of the chromium (VI), which is currently used in pickling ABS plastics. Here HiPIMS technology of-

fers opportunities for presenting an alternative pretreatment with the same strong adhesive bond as with a chromium (VI) pickle.

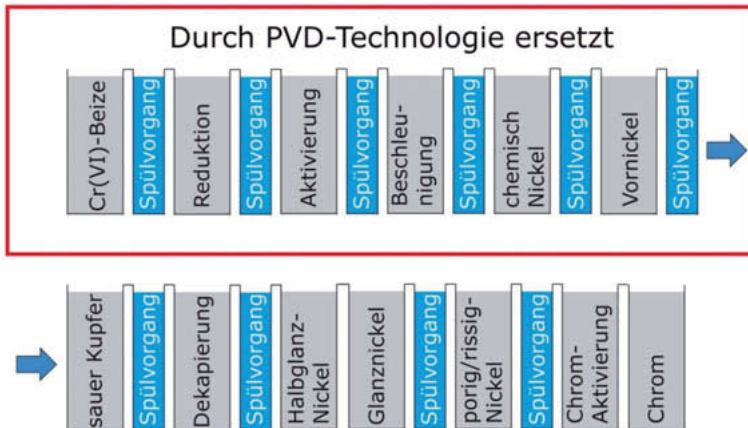


Fig. 7: HiPIMS coating as an alternative pretreatment in the plastic electroplating process (source: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH)

HiPIMS technology also offers reactive sputtering processes that are more stable and particularly relevant to dark PVD optics (e.g. chromium carbide, DLC layers). The biggest drawback of HiPIMS technology is that the layer growth rates for the coating of metals, depending on the target material, are sometimes significantly reduced for metallization processes. This disadvantage is only of minor importance for decorative applications since sputtering times are generally very short (up to 1 minute) and ventilation time is the decisive factor for the cycle times. Within the group project 'PVD coating of plastics 3' the advantages and disadvantages as compared to DC sputtering are examined and presented.

Neue Möglichkeiten für die dekorative Kunststoffbeschichtung durch die HiPIMS-Technologie

Carl Schulz, M. Sc., Kunststoff-Institut Lüdenscheid

Kurzfassung

Der Einsatz der modernen HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering) -Technologie verspricht eine signifikante Qualitätssteigerung im Bereich der Kunststoffveredlung, um daraus neue, marktrelevante Einsatzmöglichkeiten zu erschließen. Neben den Vorteilen und Möglichkeiten, die die HiPIMS-Technologie für den dekorativen Markt bietet, wird die Funktionsweise von HiPIMS erläutert, und worauf bei der Integration in bereits vorhandene DC-Sputteranlagen für die Beschichtung von Kunststoffen geachtet werden sollte.

1. Motivation

Der Wunsch im dekorativen Bereich eine robuste PVD-Beschichtung direkt (ohne Primerlackierung) auf dem Kunststoffsubstrat oder andersherum eine PVD-Schicht auf einen Primerlack (ohne Schutzlack) aufzubringen, um Prozesskosten zu sparen, Ausschuss zu minimieren, ein besseres Glanzbild zu erhalten, strukturierte Kunststoffoberflächen perfekt abbilden zu können oder eine Vorbeschichtung für die Galvanik zu realisieren, wird oft durch eine geringe Haftung oder nicht robuster PVD-Schichten getrübt. Für die erfolgreiche Umsetzung bietet das HiPIMS-Verfahren für die genannten Vorhaben Chancen.



Bild 1: HiPIMS für die Veredlung von Kunststoffen, Quelle: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH

2. Was bedeutet HiPIMS?

Das moderne PVD-Verfahren HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering) steigert die Wechselwirkung zwischen Kunststoff und PVD-Beschichtung auf eine ganz neuen Ebene. Grund dafür ist eine Pulser-Einheit, die mit geringem Aufwand in DC-Magnetron-Sputteranlagen integriert werden kann. Dieser Pulser dient dazu die konstante Energieeinspeisung während eines DC-Sputterprozesses gepulst auszuführen. Durch kurze Pulse (z.B. 50µs) mit deutlich höherer Energie als beim DC-Magnetron-Sputtern und relativ langen Auszeiten, wird die Plasmadichte deutlich erhöht, so dass ein signifikanter Teil des Beschichtungsmaterials während des PVD-Prozesses ionisiert wird.

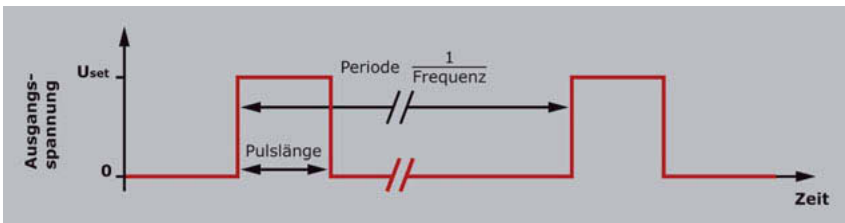


Bild 2: Spannungskurvenprofil eines HiPIMS-Prozesses, Quelle: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH

3. Integration in eine DC-Sputteranlagen

Für die Durchsetzung einer neuen Technologie, ist die Integrierbarkeit in bereits vorhandene Technologien ein großer Vorteil. Diesen Vorteil kann die HiPIMS-Technologie durch eine relativ einfache Einbindung des Pulsgenerators zwischen dem DC-Generator und der Kathode (Target) nutzen.



Bild 3: Mit einem Pulsgenerator (MP 2 der Fa. Magpul) und Plasmaemissionspektrometer (Emicon der Fa. Plasus) aufgerüstete HiPIMS-Anlage am Kunststoff-Institut Lüdenscheid, Quelle: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH

Bei der Planung der Aufrüstung einer DC-Sputteranlage zu einer HiPIMS-Anlage sind die wichtigsten Aspekte aufgeführt:

- Leistung des DC-Generators
- Kathodenfläche
- Stromzuführung zwischen Pulsgenerator und Kathode
- Möglichkeiten zum Plasma-Monitoring

Leistung des DC-Generators: Der DC-Generator, der bei jeder DC-Sputteranlage für die konstante Energieeinspeisung der Kathoden zuständig ist, muss ausreichend Leistung liefern können, um den gewünschten HiPIMS-Effekt (signifikante Ionisierung des Beschichtungsmaterials) zu erzielen. Bei HiPIMS-Prozessen fallen die Prozesstemperaturen in der Regel höher aus, so dass bei der Beschichtung von Kunststoffen der Aspekt der geringen thermischen Stabilität berücksichtigt werden muss. Es ist somit nicht ratsam sich einen sehr

leistungsstarken DC-Generatoren für die Aufrüstung anzuschaffen, wenn bei nur mäßiger oder geringer Auslastung des DC-Generators die Kunststoffsubstrate bereits thermisch geschädigt werden. Somit besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die Leistung der bereits vorhandenen DC-Generatoren für den HiPIMS-Prozess von Kunststoffen geeignet ist.

Kathodenfläche: Je größer die vorhandene Kathodenfläche ist, desto leistungsfähiger muss der Pulsgenerator sein. Der Pulsgenerator muss ausreichend Strom pro Fläche liefern, was die Kosten für die Anschaffung eines geeigneten Pulsgenerators für große Kathodenflächen höher ausfallen lässt, als für kleine Kathoden. Als Richtwert für die benötigte Stromstärke des Pulsgenerators wird $1\text{A}/\text{cm}^2$ herangezogen.

Stromzuführung zwischen Pulsgenerator und Kathode: Die Stromleitung muss einen ausreichend großen Querschnitt aufweisen. Die Peak-Stromstärke beim HiPIMS fällt um ein Vielfaches höher aus (z.B. über 300 A) als die Stromstärke beim DC-Sputtern mit konstanter Stromstärke. Die Stromzuführung zwischen Pulsgenerator und Kathode sollte so kurz wie möglich sein, um Störquellen und elektrischen Widerstand so gering wie möglich zu halten. Das bestmögliche Ergebnis kann erzielt werden, wenn der Pulsgenerator unmittelbar mit der Kathode verbunden ist.

Möglichkeiten zum Plasma-Monitoring: Das Sputterverfahren ist ein komplexes Verfahren. Neben den Parametern wie z.B. Prozessdruck, Prozessgas, Kathodenstromstärke, Targetmaterial, Substrattemperatur, BIAS und Abstand zum Target, erweitert das HiPIMS-Verfahren diese Parameterliste um das Tastverhältnis am Pulsgenerator und der damit eingehenden Peak-Stromstärke, sowie der Ionisierung des Beschichtungsmaterials. Um den HiPIMS-Prozess optimal einstellen zu können (z.B. höchstmöglichen Ionisierungsgrad), ist die Überwachung der Spezies im Plasma durch ein sogenanntes Plasma-Monitoring notwendig. Ein über Lichtleiter mit dem Spektrometer verbundener optischer Sensor wird hierfür auf die Plasmazone direkt über der Target-Oberfläche ausgerichtet.

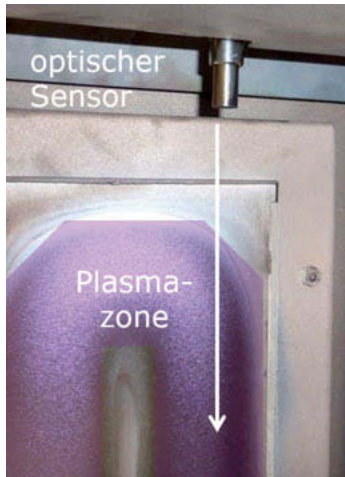


Bild 4: Integration eines optischen Sensors zur Überwachung der Spezies im Plasma,
Quelle: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH

Sobald das Plasma gezündet wird, wird das emittierte Licht zum Analysator geleitet. Jede Spezies im Plasma erzeugt charakteristische Intensitäten für unterschiedliche Wellenlängen. Innerhalb des Wellenlängenspektrums von 200 nm bis 1000 nm Wellenlänge können somit über charakteristische Peaks Atome und Ionen im Plasma nachgewiesen werden.

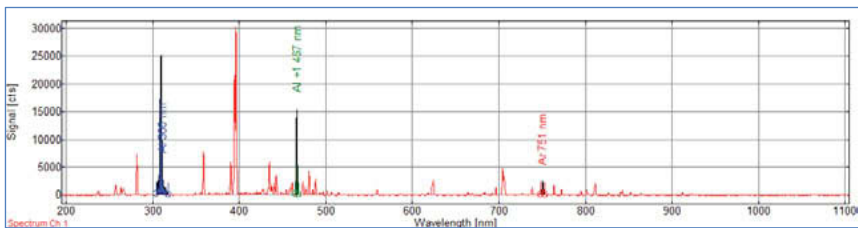


Bild 5: Emissionsplasma-Spektrum eines HiPIMS-Prozesses mit Aluminium als Target
(Blau=Peakfläche Aluminium-Atome, Grün= Peakfläche Aluminium-Ionen,
Rot=Argon), Quelle: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH

Durch eine geeignete Einstellung des Tastverhältnisses am Pulsgenerator, kann die Peakfläche für das ionisierte Beschichtungsmaterial deutlich erhöht werden. Es muss angemerkt werden, dass die Peakflächen (integriert) nicht als Absolutwerte anzusehen sind und das Ion/Atom-Peakverhältnis nicht repräsentativ für den Ionisierungsanteil des Beschichtungsma-

terials im Prozess ist. Es ist ein relativer Wert, der dabei helfen soll den optimalen Prozess (den maximal erreichbaren Ionierungsanteil) für das jeweilige Targetmaterial einzustellen. Auch ein Vergleich des Ion/Atom-Peakverhältnisses zu anderen Targetmaterialien ist nicht sinnvoll.

4. Vorteile und neue Möglichkeiten

Durch das ionisierte Beschichtungsmaterial wird die Wechselwirkungen zur Kunststoffoberfläche verbessert, sowie homogenere und robustere Schichteigenschaften generiert. Dies ergibt für den dekorativen Bereich neue Möglichkeiten. So bieten sich Chancen robustere Schichtsysteme mit nur einer Lackschicht zu realisieren. Dabei kann das Spektrum an anwendbaren Schutzlacken bei einer Direktmetallisierung vergrößert werden und dieses durch die verbesserte Haftung robust gestaltet werden. Weiterhin bietet ein solches Schichtsystem die Möglichkeit feine Strukturen im Kunststoffsubstrat (z.B. erodierte Oberflächen) exakt abzubilden. Schichten, die über das HiPIMS-Verfahren abgeschieden wurden, weisen hierfür eine verbesserte Abformung auf (was auch bei der Goldbeschichtung für REM-Aufnahmen sinnvoll ist).

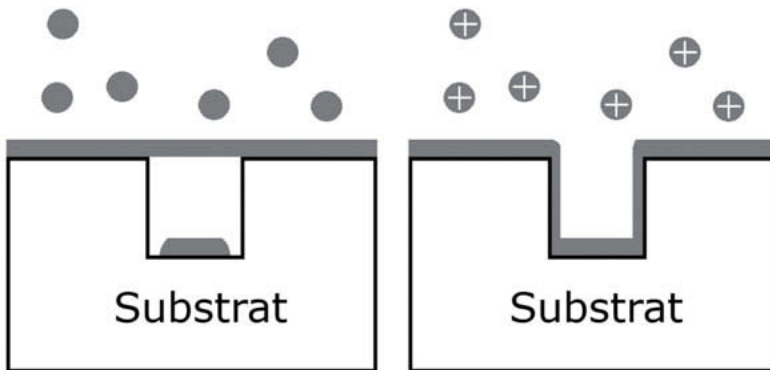


Bild 6: Schematische Darstellung der besseren Abformung durch HiPIMS (links: DC-Sputtern; Atome setzen Vertiefung zu; rechts: HiPIMS; Ionen formen Vertiefung ab), Quelle: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH

Bei einer geeigneten Primerlackierung und geeignetem PVD-Material kann auf den Schutzlack verzichtet werden, um kostspieligen Ausschuss, der bei der Schutzlackierung entsteht, deutlich zu mindern. Durch eine homogenere Schichtstruktur resultiert eine Erhöhung des Glanzgrades, was das Erscheinungsbild für Hochglanzoberflächen verbessert.

Die REACH-Verordnung verlangt langfristig bei der Kunststoffgalvanisierung auf Chrom-(VI), welches aktuell bei der Beize der ABS-Kunststoffe eingesetzt wird, zu verzichten. Hier bietet die HiPIMS-Technologie Chancen bei gleichstarkem Haftverbund wie bei einer Chrom-(VI)-Beize eine alternative Vorbehandlung darzustellen.

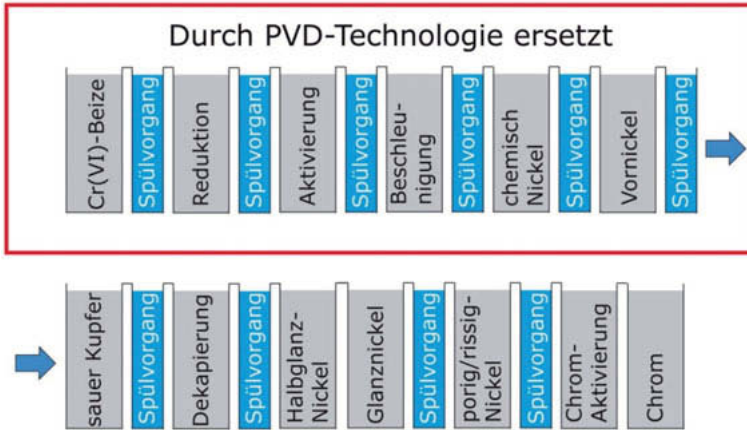


Bild 7: HiPIMS-Beschichtung als alternative Vorbehandlung im Kunststoffgalvanikprozess, Quelle: Kunststoff-Institut Lüdenscheid GmbH

Weiterhin bietet die HiPIMS-Technologie stabilere Reaktiv-Sputterprozesse, die gerade für dunkle PVD-Optiken relevant sind (z.B. Chrom-Carbid, DLC-Schichten). Der größte Nachteil der HiPIMS-Technologie ist, dass für Metallisierungsprozesse die Schichtwachstumsraten für die Beschichtung von Metallen, je nach Targetmaterial, teilweise signifikant verringert sind. Für dekorative Anwendungen fällt dieser Nachteil nur geringfügig ins Gewicht, da die Sputterzeiten generell sehr kurz (bis 1 Minute) und die Be- und Entlüftungszeit die entscheidenden Faktoren für die Taktzeiten sind. Innerhalb des Firmenverbundprojektes „PVD-Beschichtung von Kunststoffen 3“ werden die Vorteile und auch Nachteile im Vergleich zum DC-Sputtern untersucht und aufgezeigt.

Haptic structures of interior decorative bezels in the new Ford Puma utilizing the three-dimensional overlay method (TOM)

Dipl.-Ing. **Stefan Bürger**, Dipl.-Ing. (FH), **Torsten Voigt**,
Aydemir Kaplangiray, Ford Werke GmbH, Cologne

Abstract

A strategy for the decorative components was to be developed for the new Ford Puma, which aimed to offer a further series differentiation in addition to the new 2K decorative bezels with a 3D depth effect, in which the focus was on visually and haptically consistent, natural-looking materials and surfaces. Here the customer is intended to be surprised by a combination of visual and tactile effects, improved aesthetic properties and an impression of very high quality being conveyed thereby.

The visual aha! experience for the customer, called ' Surprise & Delight' in the design brief, results from a fascinating interplay between visual appearance and tactile perception in order to achieve thereby a multi-sensory harmony. Here a major role was played by meeting the customer's expectations when he touches a natural material in order to thus arouse an authentic feeling in the customer.

The commercial side of the project represents a not inconsiderable aspect of the requirements profile for the decorative bezels. The additional material costs resulting from the use of the film are offset by comparatively small investments, since injection molds can be taken over from the Ford Fiesta and the device for component pick-up in the TOM laminating system is associated with comparatively low investments.

This extensive work with its diverse requirements took the form of an in-house development project carried out by a closely networked, interdisciplinary team consisting of employees from the OEM's, the plastics processor, the film manufacturer and the equipment manufacturer under the direction of the vehicle manufacturer.

1. State of the art for decorative bezels in the vehicle interior

In line with the current state of the art, decorative bezels in automotive applications are usually designed with lacquer-system surfaces, as in-mold laminated or film-insert-molded components (IML, FIM) or as in-mold-decorated components (IMD).



Fig. 1.1 IML decorative surface



Fig. 1.2 High-gloss lacquer decorative surface

Lacquer-system surfaces have the disadvantage that the high reject rates which occur in production have a negative effect on the part price. In-mold laminated or film-insert-molded components (IML, FIM) or in-mold-decorated components (IMD) have high material costs due to the use of the film.

Also new in terms of high-gloss, transparent surfaces are decorative bezels in 2-component injection molding, such as those used in the Ford Fiesta. The combination of a transparent, partly tinted top layer and the 3D grain structure with effect pigments gives an unmatched brilliance and depth effect.



Fig. 1.3 2-component decorative bezel
Ford Fiesta Vignale
Soft Diamond Black Ruby



Fig. 1.4 2-component decorative bezel
Ford Fiesta Vignale
Carbon Black

This contrasts with the trend towards natural materials or their imitation, which usually goes hand in hand with a low degree of gloss and a structured surface. In this regard, the three-dimensional overlay method (TOM) is a cost-effective way of realizing film-laminated interior decorative bezels with a natural, high-quality surface.



Fig. 1.5 TOM decorative bezel
Ford Puma ST-Line X
Rubber Weave



Fig. 1.6 TOM decorative bezel
Ford Puma Titanium X
Downtown

The structured surface is retained during the processing sequence and generates a tactile feedback which creates the harmony of visual and sensory perception and thus an extremely high quality impression for the customer.

2. Motivation

A strategy for the decorative components was to be developed for the new Ford Puma, which aimed to offer a further series differentiation in addition to the new 2K decorative bezels with a 3D depth effect, in which the focus was on visually and haptically consistent, natural-looking materials and surfaces.

The visual aha! experience for the customer, called ' Surprise & Delight' in the design brief, results from a fascinating interplay between visual appearance and tactile perception in order to achieve thereby a multi-sensory harmony. Here a major role was played by meeting the customer's expectations when he touches a natural material in order to thus arouse an authentic feeling in the customer.

The commercial side of the project represents a not inconsiderable aspect of the requirements profile for the decorative bezels. The additional material costs resulting from the use of the film are offset by comparatively small investments, since injection molds can be taken over from the Ford Fiesta and the device for component pick-up in the TOM laminating system is associated with comparatively low investments. Furthermore, the aim of the project was to optimize both film waste and output per cycle by using multi-cavity molds, thereby minimizing costs.

Other objectives included both a maximum use of existing investments and also maximum flexibility in responding to customer requests. The latter also under the condition of minimizing variant-specific investments.

3. Technical implementation

3.1 Presentation of the components

The TOM decorative trims of the new Ford Puma continue to use the injection-molding components known from the Fiesta for the driver and front passenger side decorative bezels. Instead of the high-gloss black lacquer surface, the new Ford Puma uses film lamination in the three-dimensional overlay manufacturing process. In the following, particular focus is placed on the driver-side bezel, its geometry making this the greater challenge, both technically and commercially. Initially, only a commercially unattractive single-cavity mold appeared feasible.

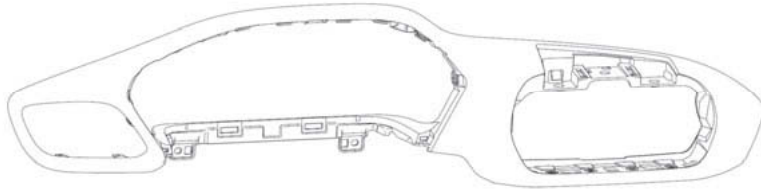


Fig. 3.1.1 Driver-side decorative bezel of the Ford Fiesta / Puma

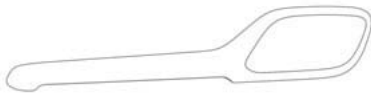


Fig. 3.1.2 Front-passenger-side decorative bezel of the Ford Fiesta / Puma

The project was implemented in a cross-functional team with close collaboration between the partners involved, OEMs, suppliers, film and machine manufacturers.

3.2 Generic process steps and plant layout of the three-dimensional overlay manufacturing process

By way of an introduction, the TOM process will be briefly described and its differentiation with respect to in-mold lamination (IML) will also be discussed below.

The basic element of the production system in the TOM process is formed by the two vacuum half-chambers, in the parting plane of which the film is placed and clamped using a clamping frame. The component is arranged in the lower box on a height-adjustable work table. In the upper box there is a heating element for heating the film over its entire surface.

At the beginning of the cycle, in the first process step, the component in the lower box is positioned in a receptacle on the work table and the film is placed in the parting plane using a clamping frame.

In the second process step which follows, the upper box is lowered, sealed to the lower box on the parting plane and both boxes evacuated. The film is heated at the same time to the forming temperature.

In the next step, the work table travels upwards until it is positioned on the parting plane, and the component touches the film locally at its projecting points. The movement of the work table brings about a first stretching.

The next two work steps include firstly the pressure compensation of the upper box against the ambient pressure and then the application of an overpressure. The vacuum in the lower box is maintained during these two steps. The film is stretched further until it contacts the entire surface of the component, including any undercuts.

In the last step, after equalization of the pressure in the two boxes, the work space is opened to remove the laminated component. The work table then moves back to its lower position in preparation for the next cycle.

The positioning of the components in the work space, the initial stretching due to movement of the work table, and lamination of the entire surface of the component geometry as a result of the vacuum in the lower box and the overpressure in the upper box are fundamental elements of the process. Their precise coordination with the component holder contributes significantly to the quality of the laminated component.

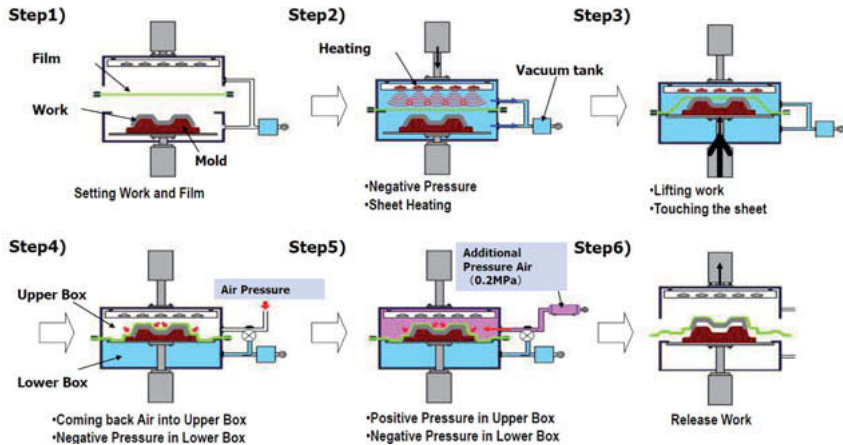


Fig. 3.2.2 TOM process
[1] Source: IK Inabata Europe GmbH

3.3 IML and TOM compared

Both methods use films that are similar in structure. The designs are applied to a carrier substrate (ABS, PC, PVC). This can be done in one or more colors, be partially or fully pigmented or even metallized. In contrast to IML films, films for the TOM process have an additional adhesive layer that ensures adherence to the component.

Furthermore, there are differences in the process, in the costs and then mainly in the appearance of the finished component due to the film appearance and feel.

The differences are briefly summarized in the table below.

Table 3.3.1 Comparison of IML and TOM

	IML	TOM
invest	o	+
piece price	o	- (o)
foil price	+	++
part geometry complexity	o	+
multipurpose usage	o	++
surface finish	+	++
series differentiation	+	++
foil process temperature	over glass transition	below glass transition
process pressure on foil	90 bar	3 bar
melt temperature	140°C-290°C	N/A
melt pressure	600 bar	N/A

For both IML and TOM components, the initial expenditure is on an injection mold. Since in the TOM process, due to the vacuum, the film extends even over the parting line in the case of the plastic component, any substrate can be used – there are no dedicated requirements regarding component boundaries. With the IML process, there are requirements regarding the positioning of the preform in the cavity, which can mean that an IML injection-molding tool and one for a painted variant must be installed. This does not apply to the TOM process since the same substrate can be covered with film in the TOM process or even processed in a painting operation.

This results in savings for a simple series differentiation.

When it comes to part costs, IML has a slight advantage because film prices are lower and the preform is trimmed via punching, in contrast to the manual trimming or laser trimming in the TOM process. In the TOM process, films can be more expensive and how the work space of the TOM machine is used also matters. This has an impact on film utilization and thus has a direct impact on the final price.

However, price advantages can emerge from skillful utilization and placement of the components in the existing work space; the higher the packing density, the greater the savings.

The direct advantage of TOM and TOM films is, of course, the quality and appearance that can be achieved. Structured films retain their surface configurations, the film delivers an unmatched feel and tactile feedback. Wood decors not only look like wood, they also feel like wood. The stress on the film in the TOM process is moderate in comparison with the pre-

forms in IML or in direct processing in an injection-molding tool, as the data in the table demonstrate.

3.4 Limitations through plant technology

For the implementation, machines from the manufacturer FUSE, as installed at the European suppliers were used, in particular the NGF 0512-S or RS types. The work space of this machine type permits the use of films up to 600mm wide and 1300mm long and a maximum component height of 180mm as standard. The installation space can be adapted to the particular film dimension by adjusting the sealing flanges of the chambers.

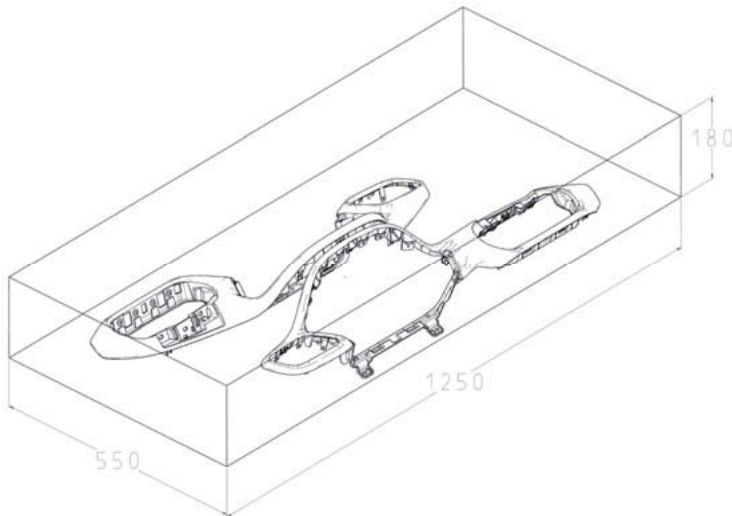


Fig. 3.4.1 The standard work space of the NGF-0512-S/RS

The structure of the films available for the TOM process mainly differs from known films for the IML process in having an additional adhesive layer. As with these films, the production of the individual manufacturers here too uses the width specified by the respective production plant. This can be derived by dividing into whole-number multiples of preferred widths for processing. An essential aspect in making the process commercially feasible is the use of these preferred widths and their optimal utilization arising from the arrangement of the components in the resulting work space. In the interplay of preferred width and component geometry, the driver-side bezel in particular proves to be particularly challenging. In order to

implement a two-cavity mold for this, adaptations have to be made to elements of the work table of the NGF-0512 machine. By combining elements of the machine table and the component holder, it is possible to increase the maximum component height to 200mm and thus realize a two-cavity mold on the preferred width of the selected film designs.

3.5 Technical requirements applicable to film-laminated components

Various requirements are made of both the finished components and the films themselves. These are subdivided in terms of appearance, material specifications and resistance to a wide variety of media, chemicals and physical stress, tests for scratch sensitivity and also adhesion of the film to the component and thus the adhesion of the adhesive. The Ford Motor Company divides these into material-specific and performance-specific requirements.

An initial market analysis showed that there are not only a number of film suppliers that offer both TOM and classic IML films but also suppliers that have only TOM films in their portfolios. This wide range of films has been validated according to Ford specifications.

For this purpose, the components were covered with the film in a test mold in order to check processing properties and behavior against the material specifications. The first evaluations then ran on these components. All suppliers met the Ford scratch resistance requirements. There were also no complaints regarding adhesion. This was examined, among other things, by cross-cutting after 24 hours of immersion in water.

However, there were differences in weather and UV resistance as well as in chemical resistance. The structure of the decorative layer, which varies significantly between the individual suppliers, plays a crucial role here. In the case of samples that showed a failure pattern in the first test run, the manufacturers were able to modify the behavior of the film in the decorative layer by adjusting its chemical composition so that the Ford specifications were then satisfied.

With regard to processing properties, there were changes not only in the degree of gloss and in surface structure due to the process but also the tendency to form creases during variation of the parameters of film temperature, workpiece temperature, overpressure and the travel speed of the work table. The behavior with regard to increasing the degree of gloss by stretching was even the same in both processes, which should be kept in mind since in the processed state the film may vary from the exemplar. This is also the case with the structures on the film. By stretching, which can be as much as 200%, surface structures become

'flatter' and therefore possibly undetectable by sight or touch. This 'damage' to the structures can even result in washouts becoming visible on the finished component.

3.6 Analytical design

In order to secure a two-cavity mold for the driver-side decorative bezel, two variant ways of positioning the components in the work space of the system were examined.

The critical areas in the design are primarily those areas with large gradients in the component height. For the two variants, two sections through areas with maximum gradients were in each case analyzed and examined with regard to both global and local stretching.

Although Variant 2 (Fig. 3.6.2) offers advantages in the middle section in the molding process, there are clear disadvantages due to the marked height gradient to the clamping plane of the film in the area to the right and left of the cluster hood. Variant 1 (Fig. 3.6.1) offers a more balanced extension ratio across the entire component with only a few areas having a maximum extension of 60%. With this arrangement, these can also be placed in areas that are difficult or impossible for the customer to see.

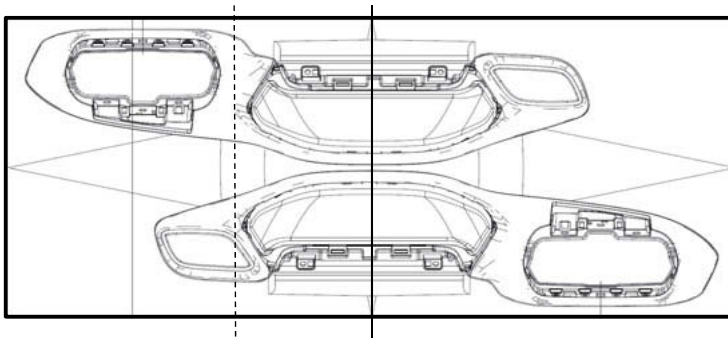


Fig. 3.6.1 Mold layout for Variant 1

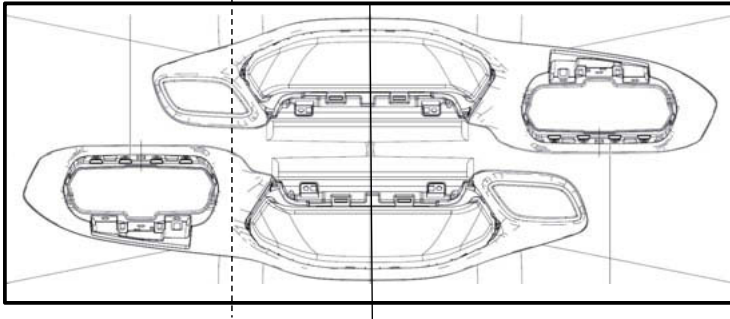


Fig. 3.6.2 Mold layout for Variant 2

If there are degrees of freedom in the component geometry, the component geometry in the invisible area can be optimized accordingly. In Variant 2 homogeneous extensions can be achieved in both sections.

The further steps in verification coincide with the usual procedure in thermoforming components, verification by thermoforming simulation, or alternatively or additionally using experimental molds. Due to the low mechanical requirements for the component holder, in the last case minor optimizations can be implemented quickly and with manageable effort.

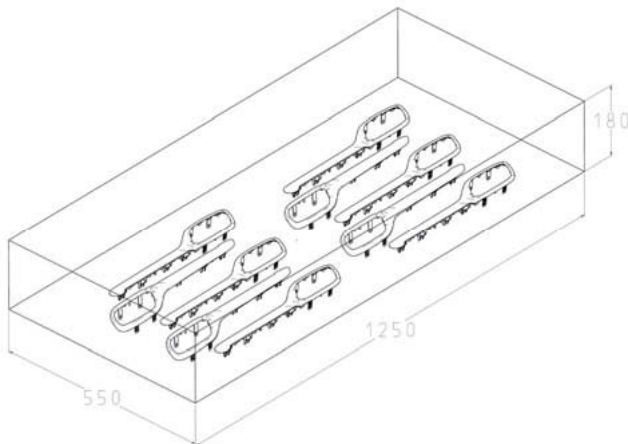


Fig. 3.6.3 Mold layout for front passenger-side bezel in the NGF0512-S/RS work space

3.7 Material selection

The depth of the surface structure to be achieved was a decisive criterion in the choice of film for the decorative bezels in the new Ford Puma. Here, the various manufacturers deploy different strategies. In the more widespread case, the haptically perceptible structure is achieved by applying several layers of paint via decoration rollers. Deeper structures are possible if the film carrier is additionally embossed before the decorative layers are applied.

Ford opted for embossed decors because these initially already have a deeper structure and react less sensitively to stretching, the degree of gloss and the haptic sensory surface thus corresponding to the desired appearance of the component.

4. Color and material design

With the implementation of two different decors for the ST-Line or ST-Line X and the Titanium X series, the Color & Material team at the Ford Design Studios has set itself the goal of making a contribution to the series differentiation of the entire vehicle and at the same time reflecting the lifestyles of different target customers.

For the ST-Line and ST-Line X series, the target customer's focus is on a 'sporting ambitious' lifestyle. This should be reflected by the 'Rubber Weave' decor, which is modeled on a carbon-braided structure. The essential underlying keywords are

- Active lifestyle
- Performance feel
- Confidence.

For the Titanium X series, the target customer's focus is on a 'living home' lifestyle, which should also be reflected in his vehicle. This should be reflected by the 'Downtown' decor, which is modeled on an open-pore real wood structure. Some of the underlying keywords are

- Agile living
- Comfortable
- Inviting.

Both decors are characterized by achieving an extremely successful and high-quality melding of visual and tactile perceptions and thus achieving a multi-sensorial harmony. Here a major role was played by meeting the customer's expectations when he touches a natural material in order to thus arouse an authentic feeling in the customer.

5. Innovation and quantifiable benefits

Automobile interior decorative bezels from three-dimensional overlay manufacturing for film lamination offer the following innovations and quantifiable advantages:

- Use of the existing injection-molding tools of an existing paint variant
- Low investments for work table and holders in the TOM process and the subsequent trimming operations
- Lamination going beyond the mold parting line
- Creation of a structured, haptically appealing surface
- Consistency of visual and sensory / tactile perception
- Significantly improved value and perceived quality
- Faster decor change for model care and personalization
- High degree of automation due to laser cutting
- Cost optimization with regard to film waste and cycle output through multiple-cavity mold layout

6. Next steps / outlook

The introduction of the three-dimensional overlay method manufacturing process for the decorative bezels of the new Ford Puma was completed with the successful start of series production.

The mold layout was designed, largely by analytical means, to optimize output and minimize film waste, and supported by the later use of a prototype cavity for receiving the components in the work space of the TOM machine. A correlation of our analytical design method with simulation tools is planned for further projects in order to be able to use these CAE tools in the future. This offers advantages in relation to a superposition of thermally dependent material behavior and mechanical stretching.

During the start of production of the new Ford Puma, valuable experience was gained that will focus on future developments and on next steps in order to further increase the degree of automation. Avoiding manual handling operations leads to a reduction in both cycle times and personnel requirements in order to thus optimize the manufacturing costs of the TOM process.

Haptische Strukturen auf Innenraum Zierblenden des neuen Ford Puma im Three-Dimensional-Overlay-Method-(TOM)-Herstellungsverfahren

Dipl.-Ing. **Stefan Bürger**, Diplom-Ingenieur (FH), **Torsten Voigt**, **Aydemir Kaplangiray**, Ford Werke GmbH, Köln

Kurzfassung

Für den neuen Ford Puma sollte eine Strategie für die Dekorbauteile entwickelt werden, die darauf abzielte, neben den neuen 2K-Dekorblenden mit 3D-Tiefenwirkung eine weitere Serierendifferenzierung anzubieten, bei der optisch and haptisch im Einklang stehende, natürliche anmutende Materialien und Oberflächen im Vordergrund standen. Dabei soll der Kunde durch eine Kombination visueller und taktiler Effekte überrascht werden und so eine verbesserte Ästhetik und einen äußerst wertiger Qualitätseindruck vermittelt werden.

Das visuelle Aha-Erlebnis für den Kunden, im Design Briefing „Surprise & Delight“ genannt, ergibt sich aus einem faszinierenden Spiel zwischen optischem Erscheinungsbild und taktiler Wahrnehmung, um so einen multisensorischen Einklang zu erreichen. Hierbei spielte es eine übergeordnete Rolle, die Kundenerwartungen an die Berührung eines natürlichen Werkstoffes zu treffen, um so eine authentische Empfindung beim Kunden zu wecken.

Einen nicht unerheblichen Aspekt des Anforderungsprofils an die Dekorblenden stellt die kommerzielle Seite des Projektes dar. Den zusätzlichen Materialkosten, die aufgrund des Einsatzes der Folie entstehen, stehen vergleichsweise geringe Investitionen gegenüber, da Spritzgießwerkzeuge vom Ford Fiesta übernommen werden können und die Vorrichtung für Bauteilaufnahme in der TOM-Kaschieranlage mit vergleichsweise geringen Investitionen verbunden ist.

Diese umfangreichen Arbeiten mit vielfältigen Anforderungen wurden durch ein eng vernetztes, interdisziplinäres Team bestehend aus Mitarbeitern des OEM's, der Kunststoff Verarbeiter, des Folienherstellers und des Anlagenbauers unter Leitung des Fahrzeugherstellers als In-House-Entwicklungsprojekt umgesetzt.

1. Stand der Technik für Dekor-Blenden im Fahrzeuginnenraum

Dem heutigen Stand der Technik entsprechend, werden Dekor-Blenden in automobilen Anwendungen zumeist mit Lack-System-Oberflächen, als folienhinterspritzte Bauteile (IML, FIM) oder als im Werkzeug dekorierte Bauteile (IMD) ausgeführt.



Bild 1.1 IML Dekor-Oberfläche



Bild 1.2 Hochglanz-Lack Dekor-Oberfläche

Lack-System-Oberflächen haben den Nachteil, dass in der Fertigung hohe Ausschussraten auftreten, die den Teilepreis negativ beeinflussen. Folienhinterspritzte Bauteile (IML, FIM) oder In-Mold-Decoration-Bauteile (IMD) hingegen weisen durch die Anwendung der Folie hohe Materialkosten auf.

Neuartig in Bezug auf hochglänzende, transparente Oberflächen sind auch Dekor-Blenden im 2K-Spritzguss, wie sie beispielsweise im Ford Fiesta zur Anwendung kommen. Durch die Kombination einer transparenten, teils abgetönten Deckschicht und der 3D-Narbstruktur mit Effektpigmenten wird eine unerreichte Brillanz und Tiefenwirkung erzielt.



Bild 1.3 2K-Dekorblende
Ford Fiesta Vignale
Soft Diamond Black Ruby



Bild 1.4 2K-Dekorblende
Ford Fiesta Vignale
Carbon Black

Im Gegensatz hierzu steht der Trend zu natürlichen Materialien oder deren Imitation, die meist mit einem niedrigen Glanzgrad und einer strukturierten Oberfläche einhergehen. Diesbezüglich stellt die Three-Dimensional Overlay-Methode (TOM) eine kostengünstige Möglichkeit dar, folienkaschieren Innenraum Dekor-Blenden mit einer natürlich und hochwertig anmutenden Oberfläche zu realisieren.



Bild 1.5 TOM-Dekorblende
Ford Puma ST-Line X
Rubber Weave



Bild 1.6 TOM-Dekorblende
Ford Puma Titanium X
Downtown

Die strukturierte Oberfläche bleibt während des Verarbeitungsprozesses erhalten und generiert ein haptisches Feedback, das den Einklang visueller und sensorischer

Wahrnehmung erzeugt und somit für den Kunden eine äußerst hochwertige qualitative Anmutung erzeugt.

2. Motivation

Für den neuen Ford Puma sollte eine Strategie für die Dekorbauteile entwickelt werden, die darauf abzielte, neben den neuen 2K-Dekorblenden mit 3D-Tiefenwirkung eine weitere Serierendifferenzierung anzubieten, bei der optisch and haptisch im Einklang stehende, natürliche anmutende Materialien und Oberflächen im Vordergrund standen.

Das visuelle Aha-Erlebnis für den Kunden, im Design Briefing „Surprise & Delight“ genannt, ergibt sich aus einem faszinierenden Spiel zwischen optischem Erscheinungsbild und taktiler Wahrnehmung, um so einen multisensorischen Einklang zu erreichen. Hierbei spielte es eine übergeordnete Rolle, die Kundenerwartungen an die Berührung eines natürlichen Werkstoffes zu treffen, um so eine authentische Empfindung beim Kunden zu wecken.

Einen nicht unerheblichen Aspekt des Anforderungsprofils an die Dekorblenden stellt die kommerzielle Seite des Projektes dar. Den zusätzlichen Materialkosten, die aufgrund des Einsatzes der Folie entstehen, stehen vergleichsweise geringe Investitionen gegenüber, da Spritzgießwerkzeuge vom Ford Fiesta übernommen werden können und die Vorrichtung für Bauteilaufnahme in der TOM-Kaschieranlage mit vergleichsweise geringen Investitionen verbunden ist. Weiterhin war es Ziel des Projektes durch Mehrfachkavitierung sowohl den Folienverschnitt als auch die Ausbringung pro Zyklus zu optimieren und hierdurch die Kosten zu minimieren.

Die weitere Zielsetzung umfasste sowohl eine maximale Nutzung bestehender Investitionen sowie maximale Flexibilität auf Kundenwünsche reagieren zu können. Letzteres Ebenfalls unter der Maßgabe variantenspezifische Investitionen zu minimieren.

3. Technische Umsetzung

3.1 Vorstellung der Bauteile

Die TOM-Dekorblenden des neuen Ford Puma verwenden die aus dem Fiesta bekannten Spritzguss Bauteile der fahrer- und beifahrerseitigen Dekorblenden weiter. Anstelle der hochglanzschwarzen Lackoberfläche kommt beim neuen Ford Puma eine Folienkaschierung im Three-Dimensional-Overlay-Methode-Herstellungsverfahren zum Einsatz. Der besondere Fokus in der Betrachtung wird im Folgenden auf die Fahrerseitige Blende gelegt, da diese

durch die Geometrie sowohl technisch als auch kommerziell die größte Herausforderung darstellt. Initial erschien nur eine kommerziell wenig attraktive einfache Kavittierung umsetzbar.

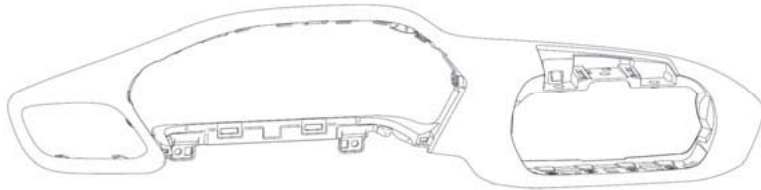


Bild 3.1.1 Fahrerseitige Dekorblende Ford Fiesta/Puma



Bild 3.1.2 Beifahrerseitige Dekorblende Ford Fiesta/Puma

Das Projekt wurden in einem Cross-Funktionalem Team in enger Zusammenarbeit der beteiligten Partner aus OEM, Lieferanten, Folien- und Maschinenherstellern durchgeführt.

3.2 Generische Prozessschritte und Anlagenlayout des Three-Dimensional Overlay Method-(TOM)-Herstellungsverfahren

Zur Einleitung soll kurz der TOM Prozess dargestellt werden und nachfolgend wird noch auf die Differenzierung zu In-Mold-Lamination (IML) eingegangen.

Das Grundelement der Fertigungsanlage im TOM Prozesses bilden die zwei Vakuum-Halbkammern, in deren Trennebene die Folie platziert und mittels eines Klemmrahmens eingespannt wird. Das Bauteil ist in der unteren Halbkammer auf einem in der Höhe verfahrbaren Arbeitstisch angeordnet. In der oberen Halbkammer befindet sich ein Heizelement zum vollflächigen Aufheizen der Folie.

Zum Beginn des Zyklus wird im ersten Prozess-Schritt das Bauteil in der unteren Kammer auf in einer auf dem Arbeitstisch angebrachten Aufnahme positioniert und die Folie mittels Klemmrahmen in der Trennebene platziert.

Im folgenden zweiten Prozessschritt wird die obere Kammer abgelassen, zur unteren Kammer und der Trennebene abgedichtet und beide Kammern werden evakuiert. Parallel dazu wird die Folie auf Umformtemperatur aufgeheizt.

Im nächsten Schritt wird der Arbeitstisch nach oben verfahren, so dass er in der Trennebene platziert ist, und das Bauteil die Folie lokal an den herausragenden Punkten berührt und durch das Verfahren des Arbeitstisches eine erste Verstreckung erfolgt.

Die beiden nachfolgenden Arbeitsschritte beinhalten zuerst den Druckausgleich der oberen Kammer gegen den Umgebungsdruck und anschließend das Aufbringen eines Überdruckes. Während beider Schritte wird das Vakuum der unteren Kammer aufrechterhalten. Hierbei erfolgt eine weitere Verstreckung der Folie bis zum vollflächigen Anliegen der Folie auf dem Bauteil inklusive etwaiger Hinterschnitte.

Im letzten Schritt erfolgt nach einem Druckausgleich beider Halbkammern ein Öffnen des Arbeitsraumes zur Entnahme des kaschierten Bauteils. Anschließend verfährt der Arbeitstisch zur Vorbereitung des nächsten Zyklus in seine untere Position.

Die Positionierung der Bauteile im Arbeitsraum, die initiale Verstreckung durch das Verfahren des Arbeitstisches und vollflächige kaschieren der Bauteilgeometrie durch das Vakuum in der Unterkammer und den Überdruck in der Oberkammer stellen elementare Kernpunkte des Prozesses dar. Ihre genaue Abstimmung auf die Bauteilaufnahme tragen maßgeblich zur Qualität des kaschierten Bauteils bei.

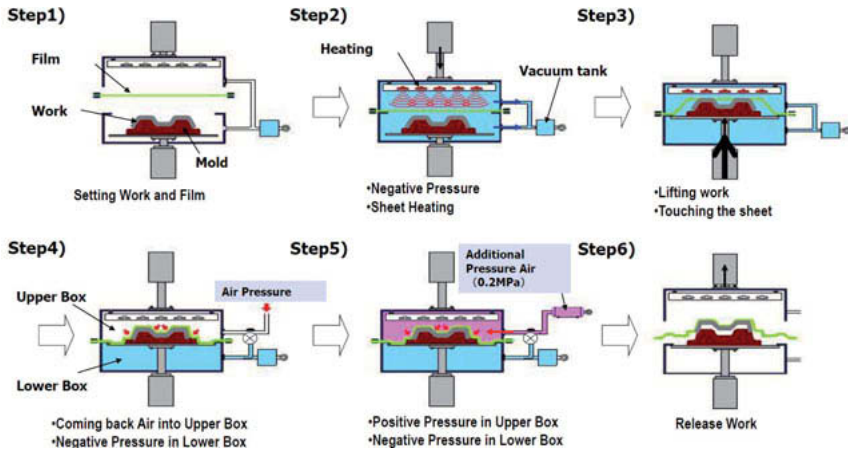


Bild 3.2.2 TOM Process

[1] Quelle: IK Inabata Europe GmbH

3.3 Vergleich IML vs. TOM

Beide Verfahren nutzen Folien, die im Aufbau ähnlich sind. Auf ein Trägersubstrat (ABS, PC, PVC) erfolgt das Auftragen der Designs. Dies kann uni- oder mehrfarbig erfolgen, partiell oder voll pigmentiert oder auch metallisiert. Folien für das TOM Verfahren weisen im Unterschied zu IML Folien eine zusätzliche Klebschicht auf, die das Haften auf dem Bauteil gewährleistet.

Weiterhin sind Unterschiede vorhanden beim Prozess, bei den Kosten und dann hauptsächlich beim Aussehen des fertigen Bauteils bedingt durch die Folienanmutung und Haptik.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Unterschiede kurz zusammengefasst.

Tabelle 3.3.1 Vergleich IML vs. TOM]

	IML	TOM
invest	o	+
piece price	o	- (o)
foil price	+	++
part geometry complexity	o	+
multipurpose usage	o	++
surface finish	+	++
series differentiation	+	++
foil process temperature	over glass transition	below glass transition
process pressure on foil	90 bar	3 bar
melt temperature	140°C-290°C	N/A
melt pressure	600 bar	N/A

Am Anfang stehen für IML und TOM Bauteile die Ausgaben für ein Spritzgusswerkzeug. Da beim TOM Prozess durch das Vakuum die Folie sich auch über die Trennebene beim Plastikbauteil legt, kann jedwedes Substrat zum Tragen kommen, es gibt keine dedizierten Anforderungen an die Bauteilgrenzen. Beim IML gibt es Anforderungen an die Positionierung des Vorformlings in der Kavität, dies kann dazu führen, dass ein IML Spritzgusswerkzeug und eines für eine lackierte Variante aufgelegt werden muss. Das fällt beim TOM Prozess weg, dasselbe Substrat kann im TOM Prozess mit Folie bezogen oder auch in einem Lackierprozess verarbeitet werden.

Dadurch ergeben sich Einsparungen für eine einfache Serierendifferenzierung.

Bei den Teilkosten hat IML einen leichten Vorteil, da die Folienpreise günstiger sind und der Vorformling über das Stanzen getrimmt wird, im Gegensatz zum manuellen Trimmen oder Lasertrimmen beim TOM Prozess. Beim TOM können die Folien teurer sein, außerdem spielt eine Rolle, wie der Arbeitsbereich der TOM Maschine ausgenutzt wird. Dies hat einen Einfluss auf Folienausnutzung und damit direkt einen Einfluss auf den Endpreis.

Preisvorteile können sich aber durch geschickte Ausnutzung und Platzierung der Bauteile im vorhandenen Arbeitsraum ergeben, je höher die Packdichte, desto höher die Ersparnis.

Der direkte Vorteil von TOM und TOM Folien ist natürlich die erzielbare Qualität und Anmutung. Strukturierte Folien behalten ihre Oberflächen bei, die Folie liefert eine unerreichte Haptik und taktiles Feedback. Holz-Dekore sehen nicht nur wie Holz aus, sie fühlen sich auch wie Holz an. Die Beanspruchung der Folie im TOM Prozess ist moderat im Vergleich zum

Vorformen beim IML oder der direkten Verarbeitung im Spritzgusswerkzeug, dies zeigen die Daten in der Tabelle.

3.4 Limitierungen durch Anlagentechnik

Für die Umsetzung wurde auf die bei den europäischen Zulieferern installierten Maschinentypen des Herstellers FUSE zurückgegriffen, insbesondere auf den Typ NGF 0512-S bzw. RS. Der Arbeitsraum dieses Maschinentyps erlaubt die Nutzung von Folien bis zu 600mm Breite und 1300mm Länge und eine maximale Bauteilhöhe von standardmäßig 180mm. Der Bauraum kann durch Adaption der Dichtflansche der Kammern and die jeweilige Foliendimension angepasst werden.

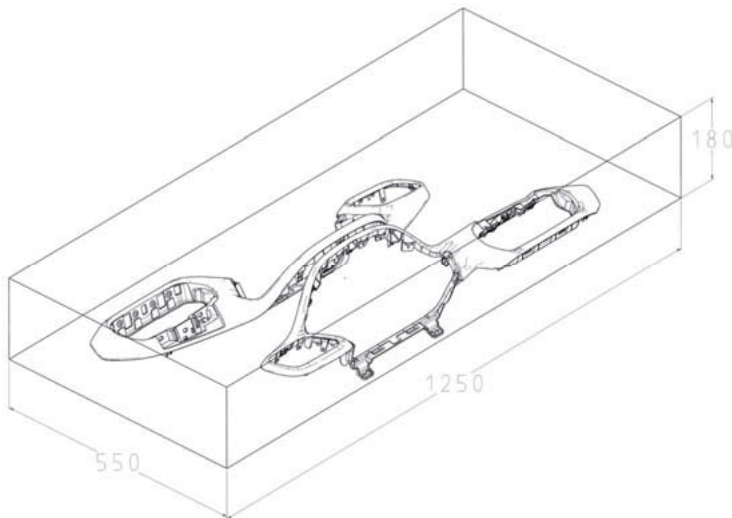


Bild 3.4.1 Skizze Standard Arbeitsraum NGF-0512-S/RS

Die für das TOM Verfahren verfügbaren Folien unterscheiden sich in ihrem Aufbau hauptsächlich durch die zusätzliche Kleberschicht von bekannten Folien für das IML Verfahren. Wie bei diesen Folien erfolgt auch hier die Produktion der einzelnen Hersteller in von der jeweiligen Produktionsanlage vorgegebenen Breite. Hieraus lassen sich durch Aufteilen in ganzzahlige Vielfache Vorzugsbreiten für die Verarbeitung ableiten. Ein wesentlicher Aspekt das Verfahren kommerziell umsetzbar zu gestalten, ist die Nutzung eben dieser Vorzugsbreiten und die optimale Ausnutzung durch die Anordnung der Bauteile im

resultierenden Arbeitsraum. Im Zusammenspiel von Vorzugsbreite und Bauteilgeometrie erweist sich insbesondere die fahrerseitige Blende als besonders herausfordernd. Um hierfür eine 2-fach Kavitation umzusetzen, müssen Adaptionen an Bauelementen des Arbeitstisches der NGF-0512 Maschine vorgenommen werden. Durch die Kombination von Elementen des Maschinentisches und der Bauteilaufnahme ist es möglich die maximal Bauteilhöhe auf 200 mm zu erhöhen und somit eine 2-fach Kavitation auf der Vorzugsbreite der gewählten Foliendesigns zu realisieren.

3.5 Technische Anforderungen an folienkaschierte Bauteile

Sowohl an die fertigen Bauteile als auch an die Folien selbst werden verschiedene Anforderungen gestellt. Diese unterteilen sich bezüglich Aussehens und Erscheinungsbild, Materialspezifikationen und Beständigkeit gegen verschiedenste Medien, Chemikalien und physischer Beanspruchung, Tests auf Kratzempfindlichkeit sowie Haftung der Folie auf dem Bauteil und somit die Adhäsion des Klebers. Die Ford Motor Company teilt dies auf in materialspezifische und leistungsspezifische Anforderungen.

Bei einer ersten Marktanalyse zeigte sich, dass es eine Reihe von Folienanbietern gibt, die sowohl TOM-als auch klassische IML-Folien anbieten, aber auch Anbieter, welche nur TOM-Folien im Portfolio haben. Dieses breite Spektrum an Folien wurde entsprechend der Ford Spezifikationen validiert.

Dafür wurden in einem Versuchswerkzeug die Bauteile mit der Folie bezogen, um die Verarbeitungseigenschaften und Verhalten gegen die Materialspezifikationen zu untersuchen. Auf diesen Bauteilen liefen dann die ersten Evaluationen. Alle Anbieter erfüllten die Ford Kratzbeständigkeitsanforderungen. Es gab weiterhin auch keinerlei Beanstandungen bezüglich der Haftung. Diese wurde unter anderem durch Kreuzgitterschnitt nach 24h Wasserlagerung untersucht.

Unterschiede gab es aber bei Witterung- und UV-Beständigkeit sowie Chemikalienbeständigkeit. Hierbei spielt der Aufbau der Dekorschicht eine entscheidende Rolle, der zwischen den einzelnen Anbietern deutlich variiert. Bei Mustern, die im ersten Testdurchlauf ein Versagensbild zeigten, waren die Hersteller in der Lage, durch Anpassung der chemischen Zusammensetzung in der Dekorschicht das Verhalten der Folie so zu modifizieren, dass die Ford Spezifikationen anschließend erfüllt wurden.

Bezüglich der Verarbeitungseigenschaften standen sowohl Veränderungen von Glanzgrad und Oberflächenstruktur durch den Prozess, als auch die Neigung zur Faltenbildung unter Variation der Parameter Folientemperatur, Werkstücktemperatur, Überdruck und Verfahrgeschwindigkeit des Arbeitstisches. Gleich war auch das Verhalten bezüglich Glanzgraderhöhung durch Verstreckung bei beiden Verfahren, dies sollte im Auge behalten werden, da im verarbeiteten Zustand die Folie von der Vorlage abweichen kann. Dies ist auch bei den Strukturen auf der Folie der Fall, durch Verstreckung, die bis zu 200% sein können, werden Oberflächenstrukturen "flacher" und damit eventuell weder visuell noch taktil erfassbar. Diese "Beschädigung" der Strukturen können sogar soweit führen, dass Auswaschungen auf dem fertigen Bauteil sichtbar werden.

3.6 Analytische Auslegung

Um für die fahrerseitige Dekorblende eine Zweifachkavitierung zu erzielen, wurden zwei Varianten untersucht, die Bauteile im Arbeitsraum der Anlage zu platzieren.

Die kritischen Bereiche bei der Auslegung sind vorrangig Bereich mit großen Gradienten in der Bauteilhöhe. Für beide Varianten wurden jeweils 2 Schnitte durch Bereiche mit maximalem Gradienten analysiert und im Hinblick auf sowohl globale als auch lokale Verstreckung untersucht.

Obwohl Variante 2 (Bild 3.6.2) im Mittelschnitt im Formprozess Vorteile bietet, ergeben sich deutliche Nachteile aufgrund des starken Höhengradienten zur Einspannebene der Folie im Bereich rechts bzw. links der Clusterhaube. Variante1 (Bild 3.5.1) bietet hier ein ausgewogeneres Auszugsverhältnis über das gesamte Bauteil mit nur wenigen Bereichen mit einem maximalen Auszug von 60%. Diese können zudem mit dieser Anordnung in nicht, bzw. schwer für den Kunden einsehbare Bereiche gelegt werden.

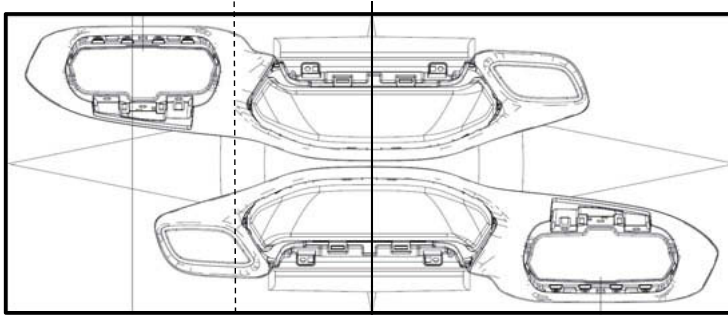


Bild 3.6.1 Skizze Kavitation Variante 1

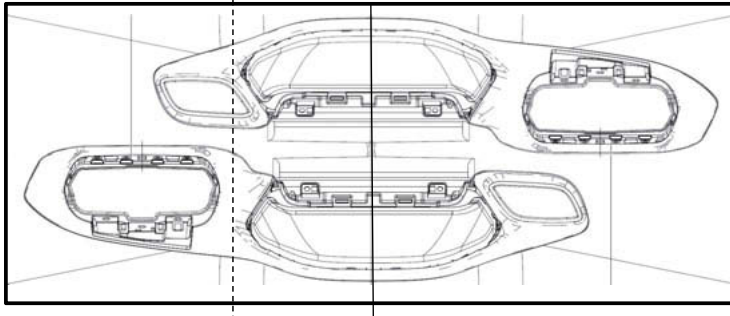


Bild 3.6.2 Skizze Kavitation Variante 2

Bestehen Freiheitsgrade bei der Bauteilgeometrie so kann die Bauteilgeometrie im nichtsichtbaren Bereich dahingehend optimiert werden entsprechen In Variante 2 in beiden Schnitten homogene Auszüge zu realisieren.

Die weiteren Schritte zur Verifikation decken sich mit dem üblichen Vorgehen für Thermoforming Bauteile, Verifikation durch Thermoform Simulation, bzw. alternativ oder ergänzend durch Versuchswerkezeuge. Aufgrund der geringen mechanischen Anforderungen and die Bauteilaufnahme, lassen sich bei letztgenannten mit überschaubarem Aufwand kleinere Optimierungen schnell umsetzen.

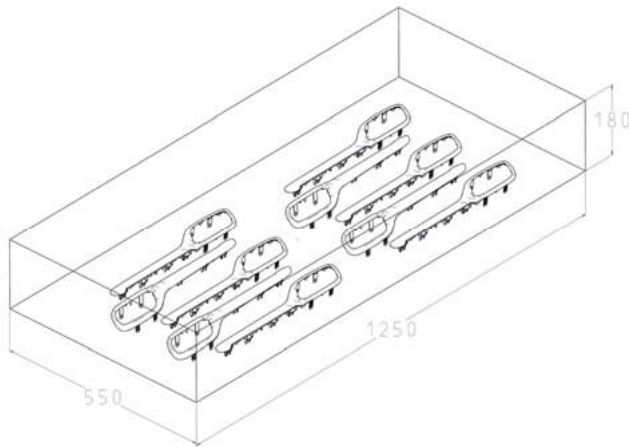


Bild 3.6.3 Skizze Kavitation Blende Beifahrer im Arbeitsraum NGF0512-S/RS

3.7 Materialauswahl

Für die Folienauswahl der Dekor-Blenden im neuen Ford Puma war die zu erreichende Tiefe der Oberflächenstruktur ein entscheidendes Kriterium. Hierbei wenden die verschiedenen Hersteller unterschiedliche Strategien an. Im weiter verbreiteten Fall wird die haptisch fühlbare Struktur durch einen Auftrag mehrerer Farbschichten über Dekorwalzen erreicht. Tiefere Strukturen sind möglich, wenn eine zusätzliche Prägung des Folienträgers vor dem Aufbringen der Dekorschichten erfolgt.

Ford hat sich für Dekore mit Prägung entschieden, da diese bereits initial eine tiefere Struktur aufweisen und weniger sensibel auf die Ver Streckung reagieren und so Glanzgrad und haptisch sensorische Oberfläche dem gewünschten Erscheinungsbild des Bauteils entspricht.

4. Colour & Material Farbgestaltung

Das Colour & Material Team des Ford Design Studios hat sich mit der Umsetzung zweier unterschiedlicher Dekore für die Serien ST-Line bzw. ST-Line X sowie Titanium X das Ziel gesetzt, zur Seriedifferenzierung des gesamten Fahrzeugs beizutragen und gleichzeitig den Life-Style unterschiedlicher Zielkunden widerzuspiegeln.

Für die Serien ST Line und ST-Line X liegt der Focus des Zielkunden auf einem ‚Sporting Ambitious‘-Lifestyle. Dieser soll durch das Dekor ‚Rubber Weave‘ reflektiert werden, die einer

Karbon-Flecht-Struktur nachempfunden ist. Die wesentlichen zugrunde liegende Schlagworte sind

- Active lifestyle
- Performance feel
- Confident

Für die Serie Titanium X liegt der Focus des Zielkunden auf einem 'Living Home' geprägtem Lifestyle, der sich auch in seinem Fahrzeug widerspiegeln soll. Dieser soll durch das Dekor ‚Downtown‘ wiedergespiegelt werden, das einer offenporigen Echtholz-Struktur nachempfunden ist. Einige der zugrunde liegenden Schlagworte sind

- Agile living
- Comfortable
- Inviting

Beide Dekore zeichnen sich dadurch aus, eine äußerst gelungene und qualitativ hochwertige Symbiose aus optischer und taktiler Wahrnehmung zu erzielen und so einen multisensorischen Einklang zu erreichen. Hierbei spielte es eine übergeordnete Rolle, die Kundenerwartungen an die Berührung eines natürlichen Werkstoffes zu treffen, um so eine authentische Empfindung beim Kunden zu wecken.

5. Innovation und Quantifizierbare Vorteile

Automobile Innenraum Zierblenden im Three-Dimensional-Overlay-Method Herstellungsverfahren zur Folienkaschierung bieten folgende Innovationen und quantifizierbare Vorteile

- Verwendung der existierenden Spritzgußwerkzeuge einer vorhandenen Lack Variante
- geringe Investitionen für Arbeitstisch und Aufnahmen in TOM Prozess und die nachfolgenden Trimm-Operationen
- kaschieren über die Werkzeugtrennung hinaus
- Erzeugung einer strukturierten, haptisch ansprechenden Oberfläche
- Einklang von optischer und sensorischer- / taktiler Wahrnehmung
- signifikant verbesserte Wertigkeit und wahrgenommene Qualitätsanmutung
- schneller Dekorwechsel für Modellpflege und Personalisierung
- hoher Automatisationsgrad durch Laserbeschnitt
- Kostenoptimierung in Bezug auf Folienverschnitt und Zyklus Ausbringung durch Mehrfachkavitierung

6. Nächste Schritte / Ausblick

Die Einführung des Three-Dimensional-Overlay-Method Herstellungsprozess für die Dekorbelen den des neuen Ford Puma wurde mit dem erfolgreichen Serienanlauf abgeschlossen.

Die Auslegung der Kavitation zur Optimierung der Ausbringung und Minimierung des Folienverschnittes erfolgte weitestgehend auf analytischem Wege unterstützt durch den späteren Einsatz eines Prototypen-Nestes zur Aufnahme der Bauteile Im Arbeitsraum der TOM Maschine. Für weitere Projekte ist eine Korrelation unserer analytischen Auslegungsmethode mit Simulationswerkzeugen geplant um diese CAE Tools zukünftig zum Einsatz zu bringen. Dies bietet Vorteile in Bezug auf eine Überlagerung von thermisch abhängigem Materialverhalten und mechanischer Verstreckung.

Im Produktionsanlauf des neuen Ford Puma konnten wertvolle Erfahrungen gesammelt werden, die den Focus zukünftiger Weiterentwicklungen und nächster Schritte auf eine weitere Erhöhung des Automationsgrades legen. Eine Vermeidung manueller Handling-Operationen führt sowohl zu einer Verkürzung der Zykluszeit als auch des Personalbedarfes, um so die Fertigungskosten des TOM Prozesses zu optimieren.

Group Renault Plastic Material Vision for New Mobility Trends

Expectation and Opportunities with New Mobility Trends

Dr. Z. D. Cigdem, Renault SAS, Paris, France

Abstract

It is aimed to explain briefly the plastic strategy of Group Renault depends strongly on the new definition of mobility; autonomous, connected, green and attractive vehicles. Plastics have been continuing to play a very important and inevitable role for this transformation of mobility. Groupe Renault aims to realize the sustainable development of innovation with its suppliers and apply on the vehicles on the right time to the market.

How will we use the polymer chains in order to obtain; autonomy to create sensors to replace our eyes, to fulfill the regulations by light weight, to save the world by circular economy and to touch the senses in an economical way? These strong questions of automobile industry need to be answered.

Background and Issues

5 principal axes of Group Renault Plastic material strategy long term roadmap;

1. CO₂ commitment
2. New Mobility (EV, Autonomous vehicle, Car-Sharing,)
3. Perceived quality
4. Durability
5. Competitiveness

These axes have been converged by Alliance Organization.

1. CO₂ commitment

New regulations make OEMs to think about the new technologies in all domains. Materials technologies must evolve with these strong requests. Group Renault consider the request by two approach in material aspects;

- a) Direct effect on emissions reduction: Contribute to the weight reduction roadmap by introducing new materials.

Foams

The main purpose is to reduce the weight of the piece by reducing the density. Renault carries out the studies under two separate headings which are visible parts and invisible parts in the interior. Visible parts require high smooth surface appearance with defined gloss values. Besides the scratch resistance is also very important because of non-painted application was targeted for economic reasons. Lateral or frontal chock resistance must be achieved by thermomechanical properties for the parts such as door panel or IP.

Studies are focused on chemical foaming of Polypropylene core-back process solution for visible parts. It is aimed to obtain 20% - 30% decrease in mass by this 3 steps injection process.

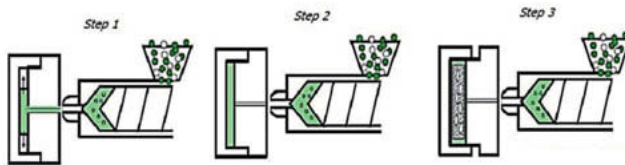


Fig. 1. Core-back steps [1]

Foamed core stayed between two skin layers. Cells size and homogeneity define the final mechanical strength of part.

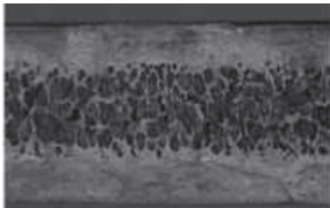


Fig. 2. Foamed core between the skins [2]

For invisible parts Expanded Polypropylene (EPP) solutions are developed. EPP solutions have been used for air guide parts recently by obtaining 20%-30% reduction in mass. The aim is to use this technology for the interior trim parts such as console. However, EPP does not promise good visual effects. Therefore, covering and/or bi-injection process must be achieved.

There are many foaming propositions such as mucell, nanographene, glass bubble, Mapp, aerogels etc. Chemist should revise their polypropylene brands in order to adopt them to these new light weight solution technologies.

Thermoplastics instead metals and Composites

Replacing of metals by plastics is always an interesting research area for OEMs. Composites bring good solutions for brackets and supporting parts under the hood. But the main idea is to create new solutions for mobile or exterior parts such as tailgate, doors, hood or fender. Polyolefin Composites play very important roles in these applications. The materials to be developed must be paintable, must have shock resistance. Besides for certain application non-painted well visual properties and scratch resistance are highly required.

One of the important launch is new Captur with 1st generation plastic tailgate. 2nd generation of plastic tailgate is under development which is called tailgate kaizen. It is aimed to obtain 20% plus weight reduction with tailgate kaizen according to 1st generation. The main role of this reduction is mass is to develop new Aesthetic non painted PPGF material.

b) Indirect effect on emission reduction; carbon foot print:

Renault committed to contribute to Circular Economy by introducing recycled materials.

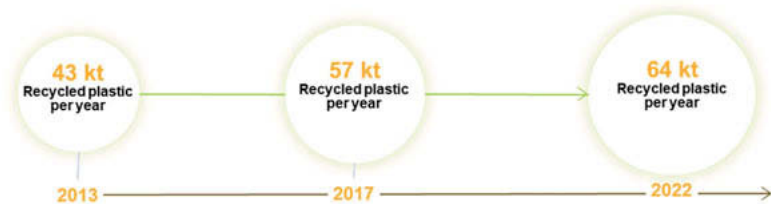


Fig. 3. Renault Recycled Material Application Commitment

Recycled materials promise to decrease the carbon foot print of plastics up to 30-40% [3]. Recycled polypropylenes have been used for invisible parts such as mudguard or motor protections for many years. However, 2 important criterias had to be exceeded in order to use them in the vehicle; COV/smell and scratch resistance if the part is visible. Thanks to the improvement of

waste separation and separation processes and the utilization of filters during granulation process, COV/smell problems are achieved. This development led to use of recycled materials in the vehicles such as HVAC. Combination with new additives to increase the starch resistance created new application areas for interior trim parts.

Despite all these developments, mechanical recycled materials are far away from the application that requires chock resistance. Renault is following very closely the innovations and investments of chemical recycling.

Biomaterials are considered in terms of usage of natural fibers in polyolefins (NFPP). It is reported that NFPP has lower carbon foot print compared to mineral filled PP [4]. NFPP can be adopted to invisible structural parts by replacing glass fiber of mineral filled polypropylene. However, visual properties are not enough to use NFPPs in visible parts.

2. New Mobility (EV, Car-Sharing ...)

Aim is to develop new raw materials and new designs for EV, Car-sharing and Autonomous Vehicles. Highlight topic for EV and autonomous vehicles is to develop high thermal resistant conductive plastic materials for battery case. In parallel, polyolefins offer solutions for a very important need which is weight reduction, focused technologies as described above.

Car-sharing is new mobility urbanism trend. This new trend asks the new question to chemists. Plastic materials will be exposed to the effects of multi-drivers use such as contamination. According to Renault internal research, the wheel can have the bacteria as much as toilet seat cover. Antibacterial polypropylenes do not meet the impact requirements of door panel or IP yet. Besides they are not competitive enough. Nevertheless, Renault keeps following the developments in this area.

New demands arise by the developing of autonomous vehicles in order to guarantee the safety. Signal and waves management needs perfect lidar and radars integration primarily on bumper. Electrical conductivity, magnetic and dielectric permittivity are the new exigences for these materials.

3. Perceived quality

Aim is to contribute to the perceived quality improvement roadmap by implementation of measures and better positioning of the parts. New low gloss PP materials have been used interior

of vehicles for recent launches in order to obtain more fine visual effects in the cockpit. All materials used in the cockpit had to be revised then new revision continue for new candidates. Flash and gaps between the parts have an impact also on perceived quality. Renault had revised their geometry exigence in order to minimize flash and gaps for both interior and exterior. Therefore, the material with low CLTE value are demanded by Engineering for the different applications such as spoiler, door baguettes, tailgates. New specifications are created for low CLTE materials and material panel is not enough expanded for all region.

4. Durability

Aim is to develop new and more robust materials scratch, versus UV, and clean-ability skins. Scratch resistance of polyolefins has improved for interior applications as shown in Fig. 4.

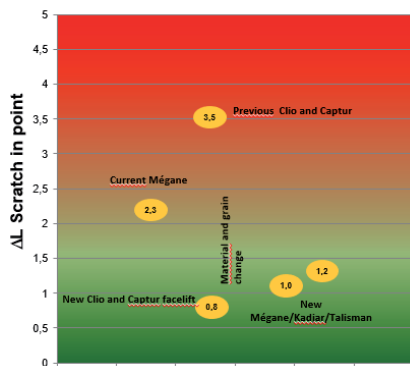


Fig. 4. Scratch resistance level of vehicles

For exterior part car brush washing test is applied to measure scratch resistance. In 2018, test method is revised by new and harder exigences. For exterior paint adhesion quality is the most important subject because of many painted Polyolefin application on bumper, spoiler, tailgate and door baguette. New Karcher method has developed for approval of these parts. All these new exigences accompanied by continuous improvement in UV resistance leads chemist to develop new solutions in durability.

Renault continues to follow the relatively new subjects such as clean-ability surface, self-repairing, anti-static materials in accordance with material specifications.

5. Competitiveness

Only competitive raw material solutions will be kept up by new applications. Renault created the synergies thanks to Alliance organization in all continents of world. Important types of polyolefins are grouped according to their thermomechanical and visual properties in common Alliance Standards (AS). ASs are valid for all Alliance vehicles that provide to use common material in all around the world. Localization is one of the important cost reduction axes. All localization activities are carried out also by AS strategy. All validated materials according to ASs are listed in Panel Material Renault (PMR) and/or Panel Material Alliance (PMA). Technical and economical validation needed to be included in PMR and PMA.

References

- [1] José A Reglero Ruiz, Michel Vincent, Noëlle Billon, Materials Science Published 2016 DOI:10.1007/s12289-015-1244-9
- [2] Renault internal document
- [3] Dormer, A., Finn, D. P., Ward, P., et al. (2013). Carbon footprint analysis in plastics manufacturing. Journal of Cleaner Production. In press. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.01.014
- [4] Niels de Beus, Michael Carus, Martha Barth, Carbon Footprint and Sustainability of Different Natural Fibres for Biocomposites and Insulation Material, Nova-Institute, Germany, 2019

GFRP-X springs – development, testing and manufacturing techniques

Dr.-Ing. **Sierk Fiebig**, Volkswagen AG, Braunschweig;

Dr.-Ing. **Thomas Kersten**, Dr.-Ing. **Björn Mennenga**,

Volkswagen AG, Wolfsburg;

Prof. Dr.-Ing. **Klaus Dröder**, IWF, TU Braunschweig, Braunschweig;

Dipl.-Ing. **Jens-Jürgen Härtel**,

Open Hybrid Lab Factory e.V., Wolfsburg

1. Abstract

Numerous requirements and ambitious goals today apply to the development of axles for modern motor vehicles. In addition to meeting technical requirements, such as driving dynamics, driving safety and comfort, coping with mechanical stresses from the most varied road conditions, special loads and misuse scenarios, axles must also be designed to be as lightweight and inexpensively as possible. Today there are various concepts for the rear axle, such as torsion-beam or multi-link axles, which have been continuously improved in recent decades, mostly in the form of steel designs [1, 2, 3].

At the same time, lightweight materials such as glass and carbon-fiber composite materials (GFRP and CFRP) and their manufacturing processes have developed significantly in recent years in terms of their technical properties and also their material and manufacturing costs [4, 5]. In the case of axles, GFRP is of particular interest as a material for springs [6, 7, 8]. On the one hand, GFRP has very good spring properties, and on the other hand it achieves good technical properties together with acceptable material and manufacturing costs [9]. CFRP materials are usually still too expensive for high-volume models in the automotive industry, although there are further advantages in lightweight construction here [10]. The implementation of a concept with GFRP springs for a new rear axle requires the adaptation of existing design methods and an understanding of the new material. In addition, it must be ensured by suitable manufacturing methods that the springs also have the desired properties [11]. Finally, the new concept must be tried and tested in accordance with current regulations. The X-shaped design of the GFRP springs allows wheel guidance, suspension and stabilization to be implemented in a single concept [12, 13, 40, 41]. At the same time, the concept of the multi-link axle is retained, so that very good driving characteristics can be

achieved. A significant weight reduction can be combined at the same time with very attractive component costs.

2. Motivation and initial situation

Lightweight construction is a major driving force for engineers. Lighter components can improve many technical properties and with them social objectives such as environmental protection may be achieved. Lightweight design here makes for better acceleration performance and at the same time lower fuel consumption and thus CO₂ savings. However, lightweight design can only be successful in the volume segment when at the same time component costs are kept low [16, 17]. Following therefore the vision of low-cost lightweight design, the aim is to avoid if possible generating additional costs for the reference components. The reference for the new GFRP-X spring axle is the multi-link axle of the Volkswagen Golf (Fig. 1).

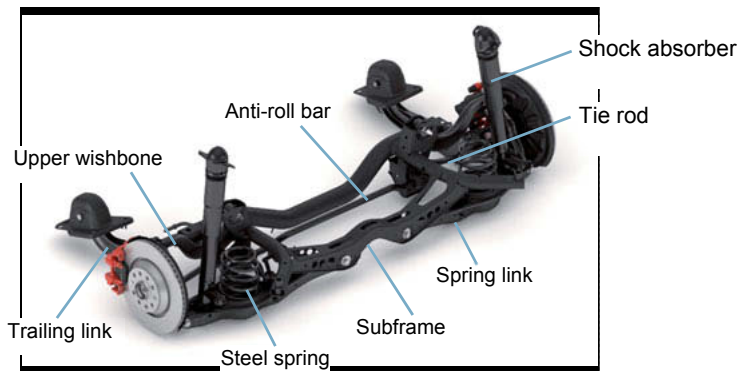


Fig. 1: MQB A1 multi-link axle (Golf) [1]

It takes the form of an inexpensive steel design and, above all, has very good driving properties [18, 19]. The central element of the axle is the subframe, which connects the chassis components such as the tie rod, spring link and upper wishbone to the body. In this way the wheel guidance is implemented together with the trailing link. The desired driving characteristics are set and implemented via shock absorber, steel springs and anti-roll bar. In addition to complying with the technical requirements, such as the necessary mechanical strengths, the new concept should also deliver the good driving dynamics properties of the multi-link axle. To be able to implement the new concept with ease in series production, the

greatest possible installation space compatibility should be achieved and only a few connection points modified.

The high and varied demands made of the chassis are shown in Fig. 2. The chassis provides the connection between the vehicle and the road. Well-developed roads are the rule in Central Europe, but they can also have cobblestones, potholes, raised sections and speed bumps. In addition, all over the world there are unmade roads and tracks with gravel, dirt and dust. In cold regions, the corrosive mixture of the combination of snow and scattered salt also makes high demands of chassis components. In addition, the components must be designed such that, for example, the selected steel grades are available worldwide and the components can be localized accordingly in the countries. In the final block of requirements, special driving maneuvers and abuse cases, such as kerbstone scraping, have to be taken into account. In addition, driving dynamics play a crucial role in driving safety, comfort and driving pleasure [1].



Fig. 2: Requirements made of the automobile chassis and its development and testing [1]

3. Basic concept and development

In the first phase of basic design and development, the top priority is to save costs and weight by replacing existing components with the new GFRP components. This requires analyses as to which functions of the previous MQB multi-link axle, such as suspension, stabilization and wheel guidance, can be taken over by various arrangements of GFRP springs. Various spring arrangements are available for the spring function, for example, as transverse or longitudinal springs or also as helical springs. This means that the previous steel springs can be replaced first. In addition to its spring properties, the material properties of GFRP are also sufficiently

high in terms of mechanical values to take over wheel guidance in the transverse direction. This also makes it possible to replace the spring link. A very significant weight reduction can thus be achieved, but with these measures alone additional costs would be likely to arise. This should be prevented by replacing the anti-roll bar as well. In order to take over the anti-roll bar function, the two wheel centers must be coupled together via the springs. This enables forces to be transmitted during cornering and roll moments counteracted. Wheel guidance can basically also be achieved by links in the transverse or longitudinal directions. An important premise as regards compliance with costs is to retain as far as possible the installation space and the connection points of the previous steel multi-link axle and to take over all functions one-to-one using as few new components as possible.

Fig. 3 shows the X-shaped arrangement of the springs. Due to the structure of the axle and the acting loads, the GFRP can be designed with a unidirectional fiber orientation in the longitudinal direction of the spring (across the vehicle). The advantage of fiber composite material can thus be optimally exploited with regard to weight and cost. The lower springs each connect the wheel carrier to the subframe via the middle coupling element and the rubber bearings. Parallel to the lower springs, the upper springs connect the coupling element to the side members of the body. In the case of stabilization, the coupling element and the pivot bearing in the center create a force transfer from one wheel to the other wheel and the stabilization function can be implemented.

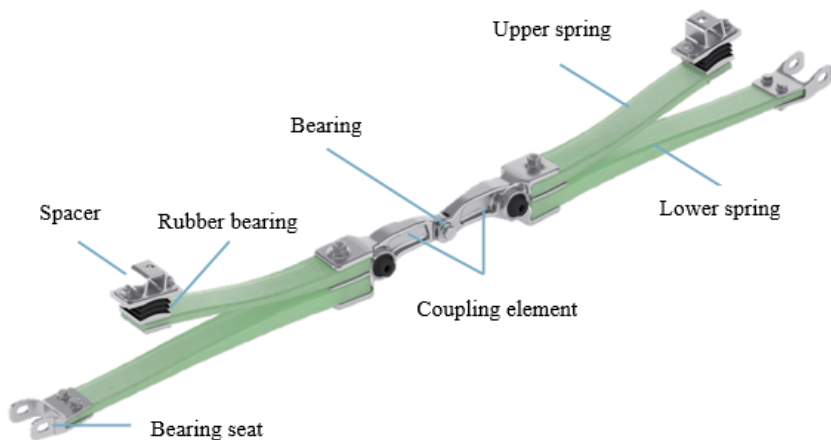


Fig. 3: New individual parts of the GFRP-X axis [1]

Different overall spring and anti-roll rates can be achieved by varying the individual spring rates of the upper and lower springs. Statistical experiment planning was used to investigate which

parameters have the greatest influence on spring rates [11, 42]. In addition to the geometry (height and width of the spring), the fiber volume content of the GFRP material has a major influence. When varying the fiber volume content, it is advantageous if a single mold for a wide range of spring rates suffices to form the variants. Fig. 4 shows the behavior of the lower and upper GFRP springs together with the coupling element for alternating and bilateral deflection. While alternating spring deflection is primarily performed by the lower GFRP spring and the coupling joint performs only slight movements, bilateral deflection is primarily determined by the upper GFRP spring. Marked translatory and rotary movements of the coupling joint also occur here.

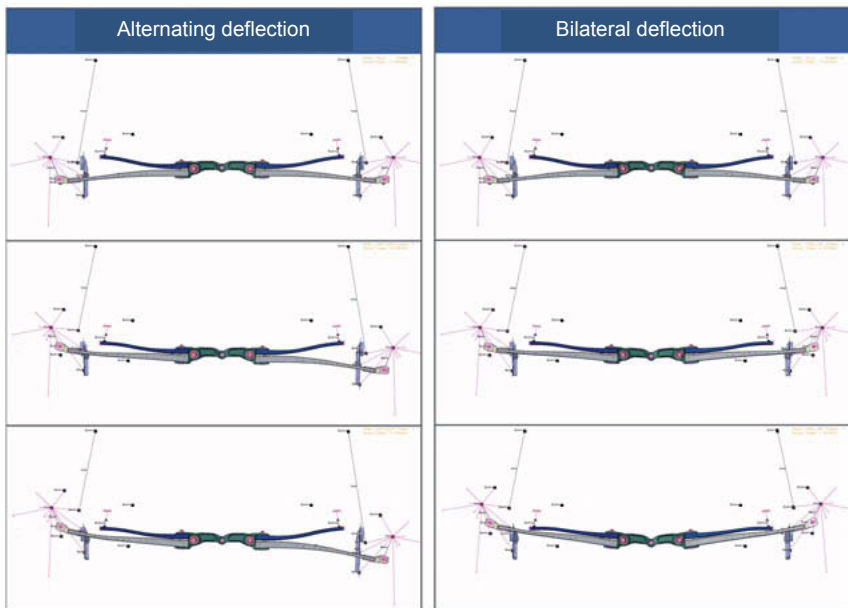


Fig. 4: Kinematics simulation of the deflection process [1]

The virtual design and verification of the GFRP-X axle is carried out on the one hand by multi-body simulations (MBS) for the kinematic values and on the other hand by FEM programs for assessing strengths. Fig. 5 shows the MBS model. The individual elements such as wheel carriers, wishbones and trailing arms are mapped as rigid bodies. Subframes and GFRP springs are mapped as so-called flexibodies or FE parts. The latter is necessary in order to map the geometric non-linearity due to the spring deformation. Bearings, joints and the shock absorbers with compression and tension buffers are shown in simplified form using

characteristic curves thereby enabling the system to be mapped kinematically. Particular attention must be paid to the preload of the leaf springs. While all other components of the axle are in the installation position, the spring must be defined in its production position. In the first simulation step, the spring is preloaded by means of a specified path and connected to the wheel carrier at the U4 bearing. The axle can then be evaluated mathematically with regard to axle kinematics and driving dynamics.

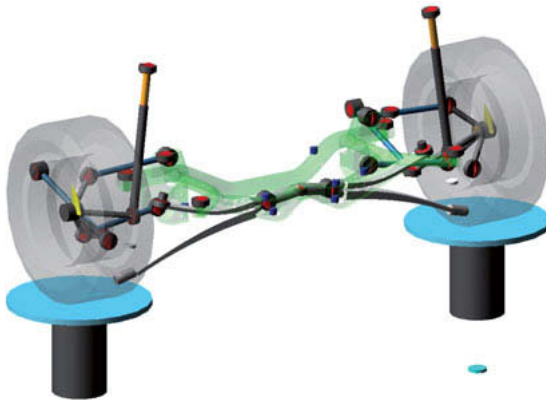


Fig. 5: MBS model of the GFRP-X axle

In addition to the MBS calculations, it is necessary to check the strength of the springs. On the basis of operational, special and abuse loads, the GFRP springs are analyzed using FEM programs and potentials for improvement are identified in the development loops. Since, in contrast to metals, such as aluminum or steel, or metallic alloys, glass-fiber-composite materials are not isotropic and constitute a composite material, more complex methods have to be used for their computational evaluation. As described in VDI 2014 Part 3 it makes sense to combine matrix material and fibers as unidirectional (UD) layers [20]. Since all the fibers in the springs are aligned in the longitudinal direction of the spring, an entire spring can be considered as a UD layer. It is therefore not necessary to regard every single fiber layer as a single layer.

The combined properties of matrix and fiber are input into the material model. The fiber volume content is used as a parameter for determining the anisotropic composite stiffness. Fig. 6 shows the left-hand pair of springs with the FEM mesh used. Hexahedra are used for discretization over the thickness. Due to the fiber orientation, it is recommended that element

edge profiles be generated that are as parallel as possible in the longitudinal direction of the fibers. This is achieved by occasional rows of pentahedron elements.

The fiber composite is evaluated according to the Puck criteria and VDI 2014 [20, 21]. A distinction is drawn here between loads parallel to and perpendicular to the fiber. Stresses parallel to the fiber are almost exclusively borne by the fibers themselves, which is why the fiber-parallel stresses σ_{\parallel} are set in relation to the fiber-parallel strength R_{\parallel} . Values close to 1 can accordingly be used as a failure limit for fiber breakage:

$$\frac{\sigma_{\parallel}}{R_{\parallel}} = 1 \quad [21]$$

For an even more precise mapping, the fiber-parallel load can be expanded by components from the fiber-perpendicular stresses. The resulting fiber-parallel stress σ_{\parallel}^{res} can be calculated from the fiber-parallel stress σ_1 , the fiber-perpendicular stresses σ_2 and σ_3 , the large Poisson ratio of the UD layer $\nu_{\perp\parallel}$, the large Poisson ratio of the fiber $\nu_{\perp\parallel,f}$, the fiber-parallel module of the UD layer E_{\parallel} , the fiber-parallel module of the fiber $E_{\parallel,f}$ and a magnification factor m_{σ} (according to Puck this is 1.3 for GFRP material):

$$\sigma_{\parallel}^{res} = \sigma_1 - \left(\nu_{\perp\parallel} - \frac{E_{\parallel}}{E_{\parallel,f}} m_{\sigma} \nu_{\perp\parallel,f} \right) (\sigma_2 \sigma_3) \quad [21]$$

The diagram shows the values for the Puck interfiber fracture criterion. This is based on the assumption that tensions perpendicular to the fiber cause an interfiber fracture and subsequently a delamination. For the evaluation, the critical stress level of the normal and shear stresses is determined iteratively. These are set in relation to the vertical strength of the fibers, differentiated according to tensile or compressive stresses. These values have to be determined experimentally and may therefore be subject to production-related fluctuations. The literature usually assumes that below a value of one the component does not fail. It is

important here to find one's own suitable limit value during the course of a project – one which, for example, takes production influences sufficiently into account.



Fig. 6: FEM analysis of the GFRP-X axle

Fig. 7 shows the GFRP-X axle in its installed state together with the components of the multi-link axle. A significant change with respect to the currently installed multi-link axle, which houses the shock absorber in the spring link, is the connection point of the rear axle shock absorbers which has been moved to the wheel carrier. This connection is similar to the MQB's predecessor platform.

Another change is necessary for the subframe. Here the rear crossmember is modified to create enough space for the GFRP springs. Alongside these two changes, many common parts from the current series can be used and costs can be kept low overall.











Fig. 7: Assembly of the GFRP-X axle [1]

In the weight comparison in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** between the series multi-link axle and the GFRP-X axle, the weight can be reduced by 53% compared to the substituted components while providing the same range of functions. While in the case of the conventional axle the steel springs and the spring link together make up the largest part

of the total weight at 70% of the weight, in the GFRP-X axle the GFRP springs dominate. Nevertheless, about 43% is accounted for by the aluminum components and bearings.

Table 1: Weight comparison of the multi-link axle between the series and the GFRP-X axle [1]

Golf Serie		Golf GFK-X-Achse	
Gesamtgewicht	100%	Gesamtgewicht	47%
Stabilisator 	14%	GFK-Federn 	27%
2x Federn 	32%	Kopplungs-element 	8%
2x Federlenker 	38%	Lager-aufnahme 	3%
Koppellenker + Kleinteile 	16%	Distanzstück + Gummilager 	9%

4. Production

According to the current state of the art, GFRP leaf springs are usually manufactured by the prepreg method or by resin transfer molding (RTM). The two processes differ, among other things, in the raw material and equipment they use. The process chain upstream of the manufacturing processes is fundamentally similar in terms of the structure of the fiber package and preform production [43, 44].

In accordance with the name, pre-impregnated fiber layers, so-called prepreps, are used as the starting material in the prepreg process. The prepreg layers are first cut to a rough shape and put together to form a layer package. The handling of prepreps is particularly complex here. The high tendency to adhere that is due to the pre-impregnation means that handling concepts are required which avoid unwanted adhesion of the prepreg to the end effector. This adhesion tendency also results in a high tendency to absorb dirt particles, which has a negative effect on component quality and consequently on mechanical properties.

The layer stack is then preformed for the final geometry. For this purpose, the layer package is heated and pre-draped in a preforming mold. As a result of the heating, the prepreg layers can slide over each other, which particularly in the case of curved components such as the

GFRP leaf spring is necessary if wrinkles are to be avoided. In this process step, it is important to ensure that the influence of heat does not cause any curing of the resin. The preform can then be trimmed close to the final contour and placed in the prepreg compression mold. The crosslinking reaction and the final compacting of the prepreg layers take place by means of the applied pressure and the supply of heat. The excess resin is fed into a resin cavity integrated in the mold and collected there. This excess resin must subsequently be mechanically separated from the component.

In the RTM process, the basic process chain for preform production is similar to that of the prepreg process. Only the raw material to be used differs. The entire process chain for GFRP leaf spring production by the RTM process is shown in Fig. 8. For the preform production of the GFRP leaf spring, dry, unidirectional fiber fabrics provided with a thermoplastic binder are first stacked according to the desired layer structure. The fiber layers used here are generally wider than a single GFRP leaf spring, so that several leaf spring preforms can be cut from the entire fiber package. This procedure makes it possible to achieve higher productivity and the associated cost-effectiveness, since along the entire RTM process chain preform production or the creation of the fiber package is particularly time-consuming.

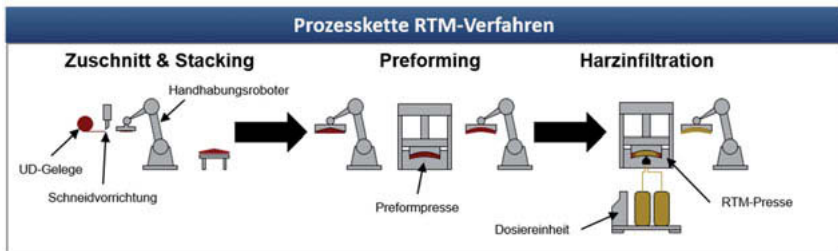


Fig. 8: Process chain of the RTM process

The fiber packages are placed in a temperature-controlled preforming mold, in which the pre-draping and compacting take place. The leaf-spring preforms are then cut from the preformed fiber packages and inserted into the constant-temperature RTM mold. Once the press has closed the mold, resin is injected into it. A uniform and complete infiltration of the resin into the fibers is achieved by means of the gating system and resin distribution channels. Here the process parameters during the injection process must be matched to the resin system and also to the component geometry. In particular, in the case of highly reactive resins that make fast curing and thus short cycle times possible, it must be ensured that curing only takes place after complete infiltration. In order to be competitive with the cycle times and

manufacturing costs of conventional metal-processing methods, RTM molds with up to 10 cavities are used in high-volume production. This means that a plurality of components can be manufactured in a single shot, thus saving costs for additional systems. After complete curing, the leaf springs can be removed from the mold and secondary finishing carried out mechanically. Basically, it is important to design the RTM tool for near-net-shape leaf spring production in order to keep mechanical finishing to a necessary minimum. Nevertheless, secondary finishing is unavoidable, since the runners have to be removed and holes have to be drilled.

5. Trial and testing

Currently the axle is tested in two stages. The previous focus was on the one hand on checking strength in a test rig and on the other hand on dynamic vehicle testing with regard to driving safety, driving behavior and comfort. In the test rig, the GFRP springs were able to deliver adequate results, thereby confirming the calculation results. Fig. 9 shows the structure of the test rig and the installation of the GFRP-X axle in the vehicle.

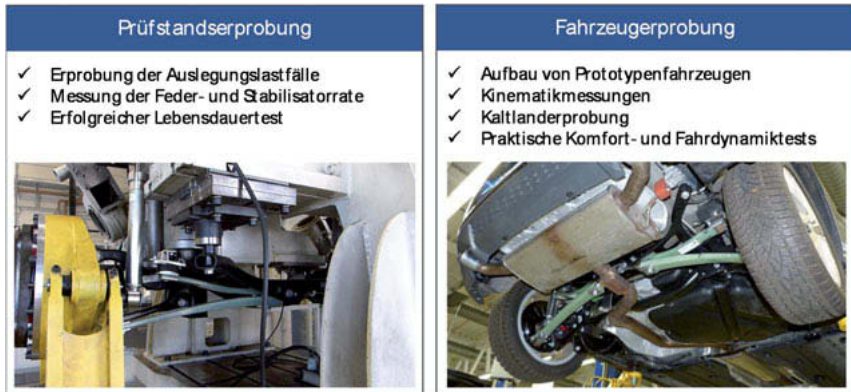


Fig. 9: Test scenarios for the GFRP-X axle

As regards driving behavior, the GFRP-X axle was installed in a Golf GTI based on the MQB multi-link axle and was tested against a conventional Golf GTI. Currently, there are two stages of design of the spring. The shock absorbers were also re-tuned for each spring combination in order to achieve optimum driving behavior. The focus here was on the spring and anti-roll bar rates in particular. In addition to measuring the axle on a KNC test bench to determine the individual rates, human assessment by the test driver is particularly necessary. This is the only way that response, roll and pitch behavior and other driver perceptions can be recorded and incorporated into the vehicle tuning process.

6. Summary and outlook

With the GFRP-X axle, it has been possible to save up to 7 kg (-53%) compared to the reference steel axle. At the same time, there was a strong focus on component costs, which should not exceed the costs of the substituted individual components. The cost calculations carried out so far show that this is possible and there is even potential to reduce costs in addition to saving weight.

At the same time, with this concept adequate driving characteristics are made possible for a production vehicle in terms of driving dynamics and comfort with high installation space compatibility. In order to implement all of these aspects a decisive factor was the very good and close cooperation within the group between Group Innovation, Technical Development

and Components. This made it possible to assembled, tune and test prototype vehicles in a short space of time.

In addition to the development issues, the project showed that manufacturing aspects must also be included very early on, on the one hand in order to manufacture the components as they are designed and on the other hand to enable minimal costs. Here a high-performance team from the Open Hybrid LabFactory (OLHF), the Technical University of Braunschweig and industrial partners with their own know-how enabled the manufacture of the GFRP springs. On the one hand, it is possible to quickly realize an efficient state-of-the-art manufacturing process while on the other hand, specific aspects can be examined in order to further reduce manufacturing costs and raise component quality.

In the project, the first springs are to be manufactured and tested at OHLF in 2020. The springs are then to be validated on the test bench, thereby enabling even better chassis tuning, as different spring and stabilization rates can be flexibly manufactured and tried out. After the appropriate calculations, e.g. for abuse cases, the various load scenarios in the vehicle are tested and further optimized.

Literature

- [1] Kersten T., Fiebig S.: Challenges and benefits for lightweight chassis components focusing on rear axle development, in: Pfeffer P. (eds) 10th International Munich Chassis Symposium 2019. Proceedings, Pages 231-247, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020
- [2] Ersoy M., Heißing B., Gies S.: Achsen und Radaufhängungen. In: Ersoy M., Gies S. (eds) Fahrwerkhandbuch. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017
- [3] Reimpell, J.: Fahrwerktechnik: Radaufhängungen. Vogel Buchverlag, Würzburg, 1986
- [4] Kellner, P.: Zur systematischen Bewertung integrativer Leichtbau-Strukturkonzepte für biegebelastete Crashträger, Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2013, 1. Aufl., Göttingen, 2013
- [5] Huber, O. (Hrsg.): Leichtbau und nachhaltige Mobilität. 5. Landshuter Leichtbau-Colloquium, [LLC 2011], Tagungsband zum Colloquium, 23. - 24. Februar 2011, Hochschule Landshut. Landshut, 2011
- [6] Götte, T., Jakobi, R., Puck, A. (Hrsg.): Grundlagen der Dimensionierung von Nutzfahrzeug-Blattfedern aus Faser-Kunststoff-Verbunden. München, 1985
- [7] Faaß, R.: Querschnittsoptimierung von Blattfedern in Faserverbund-, Metall-Hybridbauweise, Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 1993, Als Ms. gedr. Düsseldorf, 1993
- [8] Hilgers, M.: Federung. In: Chassis und Achsen. Nutzfahrzeugtechnik lernen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016
- [9] Kosuda, H., Blumberg, H.: Auslegung und Anwendung von CFK/GFK – Hybridlaminaten, Freudenstadt, 1984
- [10] Faaß, R.: Plattenstäbe und Blattfedern in Hybridbauweise, Querschnitt-Optimierung nach verschiedenen Zielkriterien, Berlin, 1989
- [11] Rothe, F., Otte, S., Beuscher, J., Kühn, M., Dröder, K., Schiwiora, N., Fiebig, S.: Potential hybrider FKV-Metall-Laminat zur Variation der Federrate von Blattfedern, Leichtbau in Forschung und industrieller Anwendung, Landshut, 2019
- [12] Goncourt, L. de, Sayers, K. H.: A composite automobile suspension 1987
- [13] Haldenwager, H., Schneeweiß, M., Maier, M.: Entwicklung und Erprobung einer Pkw - Querlenkerhinterachse mit Faserverbundwerkstoffen. In: Kunststoffe im Fahrzeugbau, S. 283–304, 1988
- [14] Henkel AG & Co. KGaA: Komposit-Blattfeder für Volvo. URL: <http://www.henkel-adhesives.de/klebstoffe-dichtstoffe-oberflaechentechnik/benteler-54824.htm>

- [15] Trebilcock, T., Epel, J.: Light Truck FRP Leaf Spring Development 810325, Detroit, 1981
- [16] Ersoy, M.: Konstruktionskataloge für Pkw Leichtbauachsen, Haus der Technik, Tagung Fahrwerktechnik, 6./7. Juni 2000, München, 2000
- [17] Gies, S.: Zukünftige Herausforderungen der Fahrwerkentwicklung, IKA 7. Tag des Fahrwerks, 4.10.2010, Aachen, 2010
- [18] Übler, J.: Technik – VW-Golf 7 Hinterachsen, Auto Motor Sport 01, 2013
- [19] Schebstad, K.: Fahrdynamik des neuen VW Golf, Vortrag in VDI Bezirksverein Hannover, Hannover, 2006
- [20] VDI-Richtlinie 2014: Development of Fibre-Reinforced Plastic components; analysis, Part 3, German/English, September 2006
- [21] Puck, A.: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten. Hanser, 1996
- [22] Rothe, F., Husemann, A., Müller, A., Kühn, M., Dröder, K.: Study on the Optimized Manufacturing of Hybrid Laminates for a Leaf Spring, In: Schmitt, R., Schuh, G. (Hrsg.): Advances in Production Research, Cham, 2019
- [23] Mallick, P. K. (Hrsg.): Composites engineering handbook, New York, 1997
- [24] Flemming, M., Roth, S., Ziegmann, G.: Faserverbundbauweisen, Fasern und Matrices, Repr. Berlin [u.a.], 2013

GFK-X-Feder – Entwicklung, Erprobung und Fertigungstechniken

Dr.-Ing. **Sierk Fiebig**, Volkswagen AG, Braunschweig;
Dr.-Ing. **Thomas Kersten**, Dr.-Ing. **Björn Mennenga**,
Volkswagen AG, Wolfsburg;
Prof. Dr.-Ing. **Klaus Dröder**, IWF, TU Braunschweig, Braunschweig;
Dipl.-Ing. **Jens-Jürgen Härtel**,
Open Hybrid Lab Factory e.V., Wolfsburg

1. Kurzfassung

An die Entwicklung von Achsen für moderne Kraffahrzeuge werden heute zahlreiche Anforderungen und hohe Ziele gestellt. Neben den technischen Anforderungen, wie Fahrdynamik, -sicherheit und Komfort, mechanische Belastungen aus unterschiedlichsten Straßenzuständen, Sonderlasten und Missbrauchsszenarien, müssen Achsen möglichst leicht und kostengünstig konstruiert werden. Für die Hinterachse existieren heute verschiedene Konzepte, wie z.B. Verbund- oder Mehrlenkerachsen, die in den letzten Jahrzehnten immer weiter, meist in Stahlbauweise ausgeführt, verbessert wurden [1, 2, 3].

Gleichzeitig haben sich Leichtbauwerkstoffe, wie Glas- und Kohlefaserverbundmaterialien (GFK und CFK) und deren Fertigungsverfahren in den letzten Jahren in ihren technischen Eigenschaften sowie in den Material- und Fertigungskosten deutlich weiterentwickelt [4, 5]. Für Achsen ist vor allem GFK als Material für Federn interessant [6, 7, 8]. Auf der einen Seite weist GFK sehr gute Federeigenschaften auf, auf der anderen Seite erreicht es gute technische Eigenschaften mit akzeptablen Material- und Fertigungskosten [9]. CFK-Werkstoffe sind in der Regel für Volumenmodelle im Automobilbau noch zu teuer, obwohl hier weitere Leichtbauvorteile bestehen [10]. Die Umsetzung eines Konzeptes mit GFK-Federn für eine neue Hinterachse erfordert dabei die Anpassung bestehender Auslegungsmethoden und das Verständnis für das neue Material. Darüber hinaus muss durch geeignete Fertigungsverfahren sichergestellt werden, dass die Federn auch den gewünschten Eigenschaften entsprechen [11]. Abschließend muss das neue Konzept nach gängigen Vorschriften erprobt und getestet werden. Durch die X-förmige Ausführung der GFK-Federn können Radführung, Federung und Stabilisierung in einem Konzept umgesetzt werden [12, 13, 40, 41]. Gleichzeitig bleibt das Konzept der Mehrlenkerachse erhalten, sodass sehr gute Fahreigenschaften erreicht werden können.

Eine deutliche Gewichtsreduzierung lässt sich gleichzeitig mit sehr attraktiven Bauteilkosten vereinen.

2. Motivation und Ausgangslage

Leichtbau ist für Ingenieure eine große Antriebsfeder. Durch leichtere Bauteile können viele technische Eigenschaften verbessert und gesellschaftliche Ziele wie Umweltschutz erreicht werden. Leichtbau sorgt dabei für bessere Beschleunigungen sowie gleichzeitig weniger Kraftstoffverbrauch und damit CO₂-Einsparungen. Leichtbau kann aber im Volumensegment nur erfolgreich sein, wenn gleichzeitig die Bauteilkosten gering gehalten werden [16, 17]. Daher wird unter der Vision des kostengünstigen Leichtbaus das Ziel verfolgt, möglichst keine Mehrkosten zu den Referenzbauteilen zu erzeugen. Die Referenz für die neue GFK-X-Feder-Achse ist die Mehrlenkerachse des Volkswagen Golf (Bild 1).

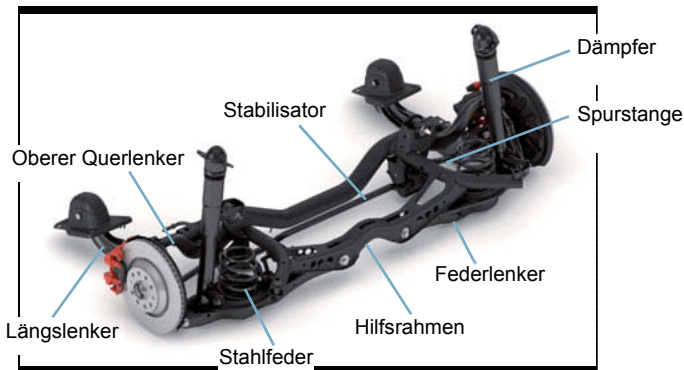


Bild 1 MQB A1 Mehrlenkerachse (Golf) [1]

Sie ist in kostengünstiger Stahlbauweise ausgeführt und weist vor allen Dingen sehr gute Fahreigenschaften auf [18, 19]. Zentrales Element der Achse ist der Hilfsrahmen, der die Fahrwerksbauteile wie Spurstange, Federlenker und oberer Querlenker mit der Karosserie verbindet. Zusammen mit dem Längslenker wird so die Radführung umgesetzt. Über Dämpfer, Stahlfeder und Stabilisator werden die gewünschten Fahreigenschaften eingestellt und umgesetzt. Das neue Konzept soll neben der Einhaltung der technischen Anforderungen, wie notwendige mechanische Festigkeiten, auch die guten Fahrdynamikeigenschaften der Mehrlenkerachse erreichen. Um das neue Konzept leicht in Serie umsetzen zu können, soll eine möglichst hohe Bauraumkompatibilität erreicht und nur wenige Anbindungspunkte modifiziert werden. Die hohen und vielseitigen Anforderungen an Fahrwerke werden in Bild 2 dargestellt. Fahrwerke stellen die Verbindung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn her.

In Mitteleuropa sind gut ausgebaute Straßen, die aber auch z.B. Kopfsteinpflaster, Schlaglöcher, Aufpflasterungen und Schwellen aufweisen können, die Regel. Daneben gibt es weltweit Naturpisten mit Schotter, Schmutz und Staub. In kalten Regionen stellt das korrosive Gemisch aus der Kombination von Schnee und gestreutem Salz ebenfalls hohe Ansprüche an die Fahrwerksbauteile. Zusätzlich sind die Bauteile so auszulegen, dass z.B. die gewählten Stahlsorten weltweit verfügbar und die Bauteile entsprechend in den Ländern lokalisierbar sind. Im letzten Anforderungsblock gilt es spezielle Fahrmanöver und Missbrauchslastfälle, wie das Bordsteinanrutschen, zu berücksichtigen. Darüber hinaus spielt die Fahrdynamik für Fahrsicherheit, Komfort und Fahrspaß eine entscheidende Rolle [1].



Bild 2: Anforderungen an PKW-Fahrwerke und deren Entwicklung und Erprobung [1]

3. Grundkonzept und Entwicklung

In der ersten Phase der Grundaulegung und Entwicklung steht an oberster Stelle das Ziel, mittels Substitution bisheriger Bauteile durch die neuen GFK-Bauteile Kosten und Gewicht zu sparen. Dazu sind Analysen notwendig, welche der Funktionen der bisherigen MQB-Mehrlenkerachse wie Federung, Stabilisierung und Radführung durch verschiedene Anordnungen von GFK-Federn übernommen werden können. Für die Federfunktion stehen verschiedene Anordnungen der Federn zur Auswahl, z.B. als Quer- oder Längsfeder sowie als Schraubenfeder aufrecht stehend. Damit können zunächst die bisherigen Stahlfedern ersetzt werden. Die Materialeigenschaften von GFK sind neben den Federeigenschaften auch hinsichtlich der mechanischen Werte ausreichend hoch, um die Radführung in Querrichtung zu übernehmen. Dadurch ist es zusätzlich möglich, den Federlenker zu substituieren. Damit kann zwar eine

sehr deutliche Gewichtsreduzierung erreicht werden, allerdings würden nur mit diesen Maßnahmen wahrscheinlich Mehrkosten entstehen.

Dies soll vermieden werden, indem zusätzlich der Stabilisator ersetzt wird. Um die Stabilisatorfunktion zu übernehmen, müssen die beiden Radmittelpunkte über die Federn miteinander gekoppelt werden. Damit können Kräfte bei Kurvenfahrten übertragen werden und den Wankmomenten entgegen gewirkt werden. Die Radführung kann grundsätzlich auch durch Lenker in Quer- oder Längsrichtung erreicht werden. Eine wichtige Prämisse zur Einhaltung der Kosten ist es, möglichst den Bauraum und die Anbindungspunkte der bisherigen Mehrlenkerachse aus Stahl beizubehalten und alle Funktionen 1:1 durch möglichst wenig neue Bauteile zu übernehmen.

Die Bild 3 zeigt die X-förmige Anordnung der Federn. Durch den Aufbau der Achse und die wirkenden Lasten kann das GFK mit unidirektionaler Faserausrichtung in Federlängsrichtung (Fahrzeug quer) ausgelegt werden. Somit kann der Vorteil von Faserverbundmaterial optimal bzgl. Gewicht und Kosten genutzt werden. Die unteren Federn verbinden jeweils den Radträger mit dem Hilfsrahmen über das mittlere Koppelement und die Gummilager. Dazu parallel verbinden die oberen Federn das Koppelement mit den Längsträgern der Karosserie. Durch das Koppelement und das Gelenklager in der Mitte entsteht im Stabilisierungsfall ein Kraftdurchgriff von dem einen Rad zum anderen Rad und die Stabilisierungsfunktion kann realisiert werden.

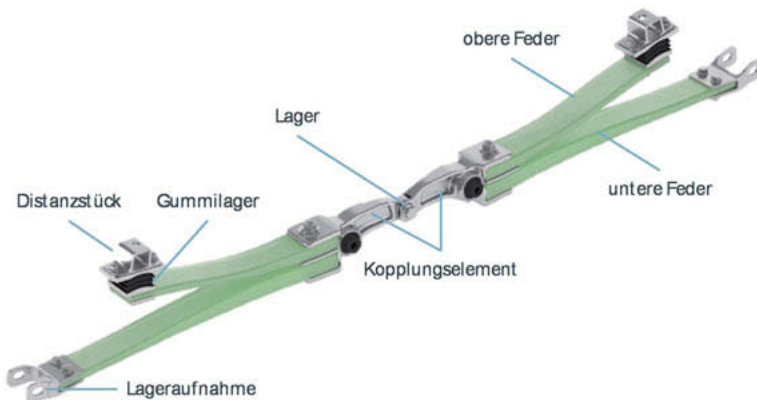


Bild 3: Neue Einzelteile der GFK-X-Achse [1]

Unterschiedliche Gesamtfeder- und Stabilisatorraten können über die Variation der einzelnen Federraten der oberen und unteren Federn erfolgen. Über eine statistische Versuchsplanung

ist untersucht worden, welche Parameter den höchsten Einfluss auf die Federraten aufweisen [11, 42]. Neben der Geometrie (Höhe und Breite der Feder) hat der Faservolumengehalt des GFK-Materials einen hohen Einfluss. Vorteilhaft bei der Variation des Faservolumengehaltes ist, dass zur Variantenbildung ein einziges Werkzeug für eine große Bandbreite an Federraten ausreicht. Bild 4 zeigt jeweils das Verhalten der unteren und oberen GFK-Federn zusammen mit dem Koppellement für wechselseitiges und beidseitiges Einfedern. Während bei dem wechselseitigen Einfedern vor allem die untere GFK-Feder die Arbeit übernimmt und das Koppelgelenk nur geringe Bewegungen ausführt, wird das beidseitige Einfedern vor allem von der oberen GFK-Feder bestimmt. Auch kommt es hier zu deutlichen translatorischen und rotatorischen Bewegungen des Koppelgelenkes.

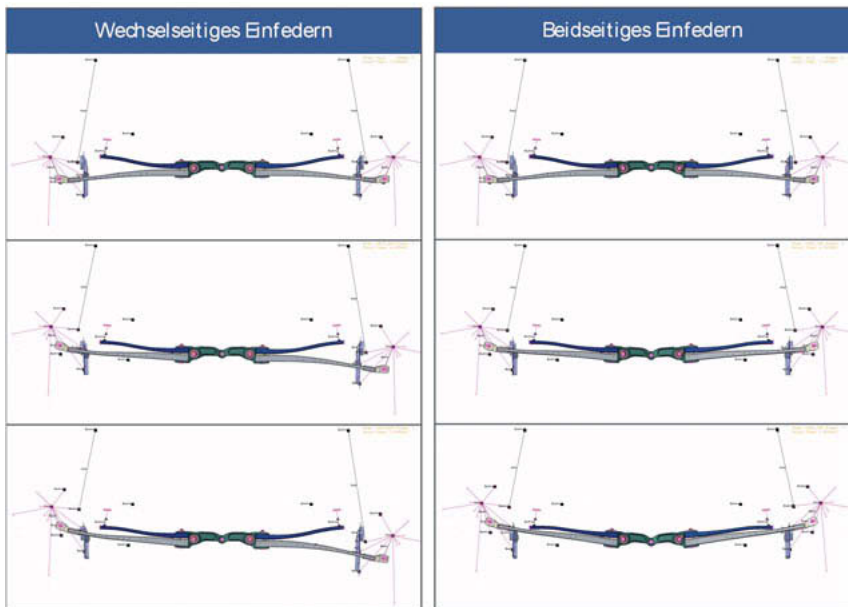


Bild 4: Kinematiksimulation des Einfedervorgangs [1]

Die virtuelle Auslegung und Überprüfung der GFK-X-Achse erfolgt zum einen durch Mehrkörper-simulationen (MKS) für die Kinematikwerte und zum anderen durch FEM-Programme für die Bewertung von Festigkeiten. In Bild 5 ist das MKS-Modell dargestellt. Die einzelnen Elemente wie Radträger, Querlenker und Längslenker werden als Starrkörper abgebildet. Hilfsrahmen und GFK-Federn sind als sog. Flexbodies bzw. FE-Parts abgebildet. Letzteres ist notwendig, um die geometrische Nichtlinearität durch die Federverformung abzubilden. Lager,

Gelenke sowie die Dämpfer mit Druck- und Zugpuffer werden mittels Kennlinien vereinfacht dargestellt und ermöglichen so die kinematische Bild des Systems. Besonderes Augenmerk muss auf die Vorspannung der Blattfedern gelegt werden. Während sich alle anderen Bauteile der Achse in Einbaulage befinden, muss die Feder in Fertigungslage definiert werden. Im ersten Schritt der Simulation wird die Feder per Wegvorgabe vorgespannt und am U4-Lager mit dem Radträger verbunden. Anschließend kann die Achse hinsichtlich Achskinematik und Fahrdynamik rechnerisch bewertet werden.

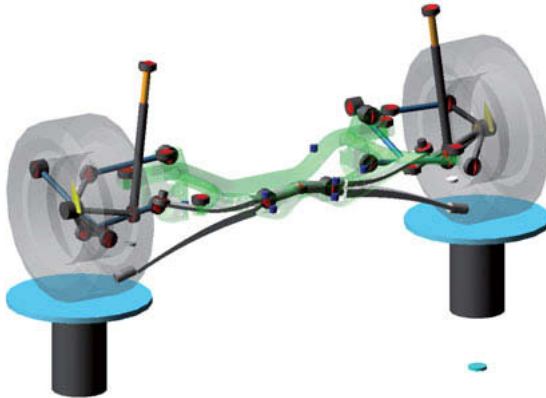


Bild 5: MKS-Modell der GFK-X-Achse

Neben den MKS-Berechnungen ist es notwendig, die Festigkeit der Federn zu überprüfen. Ausgehend von Betriebs-, Sonder- und Missbrauchslasten werden die GFK-Federn mittels FEM-Programmen analysiert und Verbesserungspotentiale innerhalb der Entwicklungsschleifen ermittelt. Da Glasfaserverbundmaterialien im Gegensatz zu Metallen bzw. metallischen Legierungen wie Aluminium oder Stahl nicht isotrop sind und einen Materialverbund darstellen, müssen zu deren rechnerischer Bewertung komplexere Methoden herangezogen werden. Wie in VDI 2014 Teil 3 beschrieben, ist es sinnvoll Matrixmaterial und Fasern als unidirektionale (UD-) Schichten zusammenzufassen [20]. Da in den Federn alle Fasern in Federlängsrichtung ausgerichtet sind, kann eine gesamte Feder als UD-Schicht betrachtet werden. Es ist somit nicht notwendig jede einzelne Faserlage als Einzelschicht zu betrachten.

Im Materialmodell werden die kombinierten Eigenschaften von Matrix und Faser eingegeben. Der Faservolumengehalt wird als Parameter für die Bestimmung der anisotropen Verbundsteifigkeit genutzt. Die Bild 6 zeigt das linke Federpaar mit dem verwendeten FEM-Netz. Zur Diskretisierung über die Dicke werden Hexaeder verwendet. Aufgrund der Faserausrichtung

ist es empfehlenswert in Faserlängsrichtung möglichst parallele Elementkantenverläufe zu generieren. Dies wird durch vereinzelte Reihen von Pentaederelementen erzielt.

Bewertet wird der Faserverbund nach den PUCK-Kriterien und der VDI-Richtlinie 2014 [20, 21]. Dabei wird zwischen Belastungen parallel und senkrecht zur Faser unterschieden. Faserparallele Spannungen werden nahezu ausschließlich von den Fasern selbst getragen, daher werden die faserparallelen Spannungen σ_{\parallel} in Bezug zu der faserparallelen Festigkeit R_{\parallel} gesetzt. Werte gegen 1 können entsprechend als Versagensgrenze für Faserbruch herangezogen werden

$$\frac{\sigma_{\parallel}}{R_{\parallel}} = 1 \quad [21]$$

Zur noch genaueren Bild kann die faserparallele Belastung um Anteile aus den fasersenkrechten Spannungen erweitert werden. Die resultierende faserparallele Spannung σ_{\parallel}^{res} kann dabei aus der faserparallelen Spannung σ_1 , den fasersenkrechten Spannungen σ_2 und σ_3 , der großen Querkontraktionszahl der UD-Schicht $\nu_{\perp\parallel}$, der großen Querkontraktionszahl der Faser $\nu_{\perp\parallel,f}$, dem faserparallelen Modul der UD-Schicht E_{\parallel} , dem faserparallelen Modul der Faser $E_{\parallel,f}$ und einem Vergrößerungsfaktor (nach Puck für GFK-Material 1,3) m_{σ} bestimmt werden:

$$\sigma_{\parallel}^{res} = \sigma_1 - \left(\nu_{\perp\parallel} - \frac{E_{\parallel}}{E_{\parallel,f}} m_{\sigma} \nu_{\perp\parallel,f} \right) (\sigma_2 \sigma_3) \quad [21]$$

In der Bild sind die Werte für das Zwischenfaserbruchkriterium nach Puck dargestellt. Als Grundlage dient die Annahme, dass Spannungen senkrecht zur Faser einen Zwischenfaserbruch und im weiteren Verlauf eine Delamination hervorrufen. Zur Bewertung wird iterativ die kritische Spannungsebene der Normal- und Schubspannungen ermittelt. Diese werden in Bezug zur fasersenkrechten Festigkeit gesetzt, unterschieden jeweils nach Zug- oder Druckspannungen. Diese Werte müssen experimentell ermittelt werden und unterliegen daher ggf. fertigungsabhängigen Schwankungen. In der Literatur wird in der Regel angenommen, dass das Bauteil unterhalb eines Wertes von eins nicht versagt. Hier gilt es, im Laufe eines Projektes

einen eigenen passenden Grenzwert zu finden, der z.B. die Einflüsse der Fertigung ausreichend berücksichtigt.



Bild 6: FEM-Analyse der GFK-X-Achse

Bild 7 zeigt die GFK-X-Achse im eingebauten Zustand zusammen mit den Bauteilen der Mehrlenkerachse. Wesentliche Änderung zur aktuell verbauten Mehrlenkerachse, die den Dämpfer im Federlenker aufnimmt, ist der zum Radträger verschobene Anbindungspunkt der Hinterachsdämpfer. Diese Anbindung ist ähnlich zur Vorgängerplattform des MQBs. Eine weitere Veränderung ist beim Hilfsrahmen nötig. Hier wird die hintere Quertraverse modifiziert, um ausreichend Bauraum für die GFK-Federn zu schaffen. Neben diesen beiden Änderungen können viele Gleichteile der aktuellen Serie verwendet werden und insgesamt die Kosten niedrig gehalten werden.











Bild 7: Zusammenbau der GFK-X-Achse [1]

Beim Gewichtsvergleich in Tabelle 1 zwischen der Mehrlenkerachse der Serie und der GFK-X-Achse kann das Gewicht bei gleichem Funktionsumfang um 53% gegenüber den substituierten Bauteilen reduziert werden. Während bei der konventionellen Achse die Stahlfedern und

der Federlenker zusammen mit 70% des Gewichts den größten Anteil am Gesamtgewicht ausmachen, dominieren bei der GFK-X-Achse die GFK-Federn. Trotzdem entfallen ca. 43% auf die Aluminiumbauteile und Lager.

Tabelle 1: Gewichtsvergleich der Mehrlenkerachse zwischen Serie und GFK-X-Achse [1]

Golf Serie		Golf GFK-X-Achse	
Gesamtgewicht	100%	Gesamtgewicht	47%
Stabilisator	 14%	GFK-Federn	 27%
2x Federn	 32%	Kopplungs-element	 8%
2x Federlenker	 38%	Lager-aufnahme	 3%
Koppellenker + Kleinteile	 16%	Distanzstück + Gummilager	 9%

4. Fertigung

Nach dem heutigen Stand der Technik werden GFK-Blattfedern in der Regel im Prepreg-Verfahren oder im Resin Transfer Molding (kurz: RTM) Verfahren gefertigt. Beide Verfahren unterscheiden sich unter anderem im zu verwendenden Rohmaterial und Anlagenequipment. Die den Fertigungsverfahren vorgelagerte Prozesskette ist hinsichtlich des Aufbaus des Faserpakets und der Preformfertigung grundlegend ähnlich [43, 44].

Entsprechend des Namens werden beim Prepreg-Verfahren bereits vorimprägnierte Faserlagen, die sogenannten Prepregs, als Ausgangsmaterial verwendet. Die Prepreg-Lagen werden zunächst auf eine grobe Kontur zugeschnitten und zu einem Lagenpaket zusammengelegt. Die Handhabung von Prepregs ist dabei besonders komplex. Durch die der Vorimprägnierung geschuldeten hohe Adhäsionsneigung sind Handhabungskonzepte erforderlich, die eine ungewollte Anhaftung des Prepregs an den Endeffektor vermeiden. Die Adhäsionsneigung bewirkt auch eine hohe Neigung zur Aufnahme von Schmutzpartikeln, was sich auf die Bauteilqualität und folglich auf die mechanischen Eigenschaften negativ auswirkt.

Der Lagenaufbau wird anschließend für die Endgeometrie vorgeformt. Hierzu wird das Lagenpaket erwärmt und in einem Vorformwerkzeug vordrapiert. Durch die Erwärmung können die Prepreg-Lagen aneinander abgleiten, was insbesondere bei gekrümmten Bauteilen wie der

GFK-Blattfeder zur Faltenvermeidung notwendig ist. Bei diesem Prozessschritt gilt es sicherzustellen, dass der Wärmeeinfluss keine Harzaushärtung herbeiführt. Der Vorformling kann anschließend endkonturnah besäumt und in das Prepregpress-Werkzeug eingelegt werden. Mittels Pressendruck und Wärmezufuhr erfolgt die Vernetzungsreaktion sowie endgültige Kompaktierung der Prepreg-Lagen. Das überschüssige Harz wird in eine im Werkzeug integrierte Harzkavität geleitet und dort aufgefangen. Dieser Harzüberschuss muss im Nachgang vom Bauteil mechanisch getrennt werden.

Im RTM-Verfahren ist die grundlegende Prozesskette zur Preformfertigung ähnlich zu der des Prepreg-Verfahrens. Lediglich das zu verwendende Rohmaterial unterscheidet sich. Die gesamte Prozesskette zur GFK-Blattfederfertigung im RTM-Verfahren ist in Bild 8 dargestellt. Für die Preformfertigung der GFK-Blattfeder werden zunächst trockene, mit einem thermoplastischen Binder versehene unidirektionale Faserlegele entsprechend dem gewünschten Lagenaufbau gestapelt. Die hierbei verwendeten Faserlagen sind in der Regel breiter als eine einzige GFK-Blattfeder, sodass aus dem gesamten Faserpaket mehrere Blattfederpreforms zugeschnitten werden können. Durch diese Vorgehensweise lässt sich eine höhere Produktivität und damit einhergehend Wirtschaftlichkeit erzielen, da die Preformfertigung, respektive die Erstellung des Faserpakets, entlang der gesamten Prozesskette des RTM-Verfahrens besonders zeitintensiv ist.

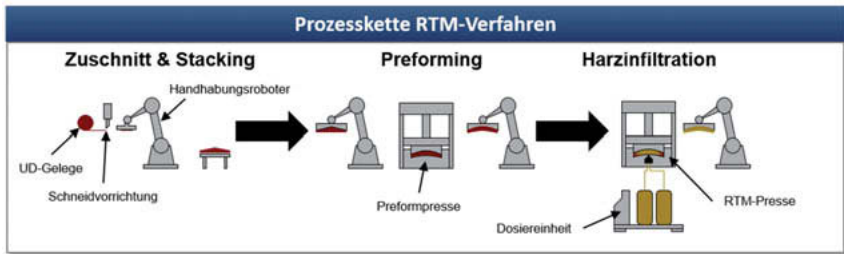


Bild 8 Prozesskette des RTM-Verfahrens

Die Faserpakete werden in ein temperiertes Preformwerkzeug gelegt, in welchem die Vordraperung sowie die Kompaktierung erfolgt. Aus den vorgeformten Faserpaketen werden anschließend die Blattfederpreforms geschnitten und in das konstant temperierte RTM-Werkzeug eingelegt. Nachdem die Presse das Werkzeug geschlossen hat, erfolgt die Harzinjektion in das Werkzeug. Mittels Anguss- und Harzverteilerkanälen wird eine gleichmäßige und vollständige Infiltration der Fasern durch das Harz erzielt.

Die Prozessparameter während des Injektionsvorgangs sind dabei auf das Harzsystem sowie die Bauteilgeometrie abzustimmen. Insbesondere bei hochreaktiven, eine schnelle Vernetzung und somit kurze Zykluszeit ermöglichenden Harzen ist sicherzustellen, dass eine Aushärtung erst nach vollständiger Infiltration erfolgt. Um mit den Zykluszeiten und den Fertigungskosten herkömmlicher metallverarbeitender Verfahren konkurrenzfähig zu sein, werden in der Großserie RTM-Werkzeuge mit bis zu 10 Kavitäten verwendet. Dadurch können in einem einzigen Schuss mehrere Bauteile gefertigt und somit Kosten für zusätzliche Anlagen eingespart werden. Nach vollständiger Aushärtung können die Blattfedern aus dem Werkzeug entnommen und mechanisch nachbearbeitet werden. Grundsätzlich gilt es, das RTM-Werkzeug auf eine endkonturnahe Blattfederfertigung auszulegen, um eine mechanische Nachbearbeitung so gering wie nötig zu halten. Nichtsdestotrotz ist eine Nachbearbeitung unumgänglich, da die Angusskanäle entfernt sowie Bohrungen eingebracht werden müssen.

5. Erprobung und Versuch

Die Erprobung der Achse erfolgt aktuell zweistufig. Der bisherige Fokus lag zum einen auf der Überprüfung der Festigkeit auf einem Prüfstand und zum anderen auf der dynamischen Fahrzeugerprobung bezüglich Fahrsicherheit, Fahrverhalten und Komfort. Auf dem Prüfstand

konnten die GFK-Federn ausreichende Ergebnisse liefern und damit die Berechnungsergebnisse bestätigt werden. Bild 9 zeigt den Aufbau des Prüfstands und den Einbau der GFK-X-Achse in das Fahrzeug.

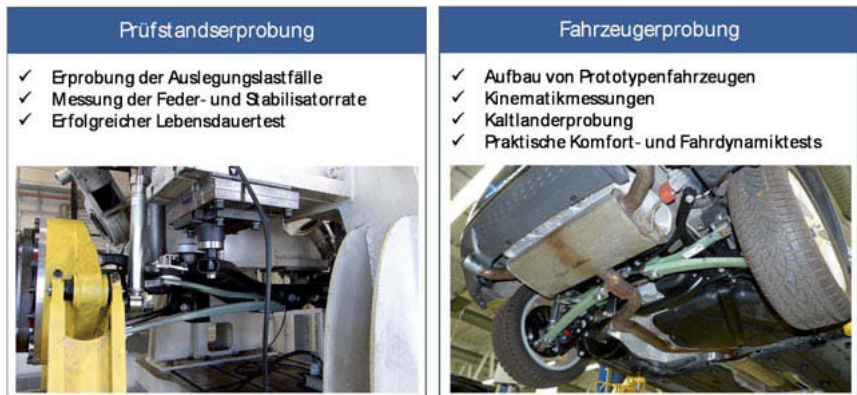


Bild 9 Prüfzenarien für die GFK-X-Achse

Bezüglich des Fahrverhaltens ist die GFK-X-Achse in einen Golf GTI basierend auf der MQB-Mehrlenkerachse verbaut und im Vergleich zu einem konventionellen Golf GTI erprobt worden. Aktuell gibt es zwei Baustufen der Feder. Zu jeder Federkombination sind jeweils auch die Dämpfer neu abgestimmt worden, um ein optimales Fahrverhalten zu erreichen. Dabei standen besonders die Feder- und Stabilisatorrate im Blick. Neben der Vermessung der Achse auf einem KNC-Prüfstand zur Ermittlung der einzelnen Raten, ist vor allem die menschliche Beurteilung durch entsprechende Testfahrer notwendig. Nur so können z.B. Ansprechverhalten, Wank- und Nickverhalten und andere Fahrerwahrnehmungen erfasst werden und entsprechend in die Fahrzeugabstimmung einfließen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der GFK-X-Achse ist es gelungen bis zu 7kg (-53%) gegenüber der Referenzachse aus Stahl einzusparen. Gleichzeitig lag ein starker Fokus auf den Bauteilkosten, die nicht über den Kosten der substituierten Einzelbauteile liegen sollten. Die bisher durchgeführten Kostenkalkulationen zeigen, dass dies möglich ist und sogar ein Potential besteht zusätzlich zur Gewichtseinsparung auch Kosten senken zu können.

Gleichzeitig ermöglicht das Konzept adäquate Fahreigenschaften zu einem Serienfahrzeug bzgl. Fahrdynamik und Komfort bei hoher Bauraumkompatibilität. Für die Umsetzung all dieser Punkte war die sehr gute und enge Zusammenarbeit innerhalb des Konzerns zwischen Group

Innovation, der Technischen Entwicklung und der Komponente ausschlaggebend. So konnten in kurzer Zeit Prototypenfahrzeuge aufgebaut, abgestimmt und getestet werden.

Neben den Entwicklungsfragen hat sich im Projekt gezeigt, dass sehr früh auch die Fertigungsaspekte mit einbezogen werden müssen, um zum einen auch die Bauteile zu fertigen wie sie ausgelegt sind und zum anderen dabei minimale Kosten zu ermöglichen. Hier ermöglicht ein leistungsstarkes Team aus Open Hybrid LabFactory (OLHF), TU Braunschweig und Industriepartnern das Fertigen der GFK-Federn mit eigenem Knowhow. Auf der einen Seite kann so schnell ein effizienter Fertigungsprozess auf dem aktuellen Stand der Technik realisiert werden, auf der anderen Seite können gezielt Aspekte untersucht werden, um Fertigungskosten weiter zu senken und die Bauteilqualität zu erhöhen.

Im Projekt werden in 2020 die ersten Federn in der OHLF gefertigt und erprobt. Anschließend werden die Federn auf dem Prüfstand validiert und ermöglichen eine noch bessere Fahrwerksabstimmung, da flexibel unterschiedliche Feder- und Stabiraten gefertigt und erprobt werden können. Nach entsprechenden Berechnungen, z.B. für die Misuse-Lastfälle, werden die verschiedenen Lastszenarien im Fahrzeug erprobt und weiter optimiert.

Literatur

- [1] Kersten T., Fiebig S.: Challenges and benefits for lightweight chassis components focusing on rear axle development, in: Pfeffer P. (eds) 10th International Munich Chassis Symposium 2019. Proceedings, Pages 231-247, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2020
- [2] Ersoy M., Heißing B., Gies S.: Achsen und Radaufhängungen. In: Ersoy M., Gies S. (eds) Fahrwerkhandbuch. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017
- [3] Reimpell, J.: Fahrwerktechnik: Radaufhängungen. Vogel Buchverlag, Würzburg, 1986
- [4] Kellner, P.: Zur systematischen Bewertung integrativer Leichtbau-Strukturkonzepte für biegebelastete Crashträger, Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2013, 1. Aufl., Göttingen, 2013
- [5] Huber, O. (Hrsg.): Leichtbau und nachhaltige Mobilität. 5. Landshuter Leichtbau-Colloquium, [LLC 2011], Tagungsband zum Colloquium, 23. - 24. Februar 2011, Hochschule Landshut. Landshut, 2011
- [6] Götte, T., Jakobi, R., Puck, A. (Hrsg.): Grundlagen der Dimensionierung von Nutzfahrzeug-Blattfedern aus Faser-Kunststoff-Verbunden. München, 1985
- [7] Faaß, R.: Querschnittsoptimierung von Blattfedern in Faserverbund-, Metall-Hybridbauweise, Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 1993, Als Ms. gedr. Düsseldorf, 1993
- [8] Hilgers, M.: Federung. In: Chassis und Achsen. Nutzfahrzeugtechnik lernen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016
- [9] Kosuda, H., Blumberg, H.: Auslegung und Anwendung von CFK/GFK – Hybridlamina-ten, Freudenstadt, 1984
- [10] Faaß, R.: Plattenstäbe und Blattfedern in Hybridbauweise, Querschnitt-Optimierung nach verschiedenen Zielkriterien, Berlin, 1989
- [11] Rothe, F., Otte, S., Beuscher, J., Kühn, M., Dröder, K., Schiwiora, N., Fiebig, S.: Potential hybrider FKV-Metall-Lamine zur Variation der Federrate von Blattfedern, Leichtbau in Forschung und industrieller Anwendung, Landshut, 2019
- [12] Goncourt, L. de, Sayers, K. H.: A composite automobile suspension 1987
- [13] Haldenwager, H., Schneeweiß, M., Maier, M.: Entwicklung und Erprobung einer Pkw - Querlenkerhinterachse mit Faserverbundwerkstoffen. In: Kunststoffe im Fahrzeugbau, S. 283–304, 1988
- [14] Henkel AG & Co. KGaA: Komposit-Blattfeder für Volvo. URL: <http://www.henkel-adhesives.de/klebstoffe-dichtstoffe-oberflaechentechnik/benteler-54824.htm>
- [15] Trebilcock, T., Epel, J.: Light Truck FRP Leaf Spring Development 810325, Detroit, 1981

- [16] Ersoy, M.: Konstruktionskataloge für Pkw Leichtbauachsen, Haus der Technik, Tagung Fahrwerktechnik, 6./7. Juni 2000, München, 2000
- [17] Gies, S.: Zukünftige Herausforderungen der Fahrwerkentwicklung, IKA 7. Tag des Fahrwerks, 4.10.2010, Aachen, 2010
- [18] Übler, J.: Technik – VW-Golf 7 Hinterachsen, Auto Motor Sport 01, 2013
- [19] Schebstad, K.: Fahrdynamik des neuen VW Golf, Vortrag in VDI Bezirksverein Hannover, Hannover, 2006
- [20] VDI-Richtlinie 2014: Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund – Berechnungen, Blatt 3, Ausgabe Deutsch/Englisch, September 2006
- [21] Puck, A.: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten. Hanser, 1996
- [22] Rothe, F., Husemann, A., Müller, A., Kühn, M., Dröder, K.: Study on the Optimized Manufacturing of Hybrid Laminates for a Leaf Spring, In: Schmitt, R., Schuh, G. (Hrsg.): Advances in Production Research, Cham, 2019
- [23] Mallick, P. K. (Hrsg.): Composites engineering handbook, New York, 1997
- [24] Flemming, M., Roth, S., Ziegmann, G.: Faserverbundbauweisen, Fasern und Matrices, Repr. Berlin [u.a.], 2013

Thermoplastics in electric-vehicle battery applications

A lightweight and efficient EV battery concept

Anil Tiwari, Dr. **Dave Brands**, SABIC, Geleen, The Netherlands;
David Pelletier, SABIC, Bergen op Zoom, The Netherlands;
Carlos Pereira, SABIC, Selkirk, New York, USA

Abstract

Electric vehicle batteries require flame-retardant materials that enable an increase in the energy density of the battery pack while ensuring functional integration. The battery also needs countermeasures for crash protection. Low-density thermoplastic materials with the right composition have the potential to satisfy critical battery pack requirements, especially the need to satisfy the UL94 V0 flammability rating at a minimum thickness as well as deliver high specific strength and stiffness. This paper highlights how thermoplastic solutions for EV battery applications can reduce the area weight of components, enable easier stacking of cells in their modules, improve thermal control pathways and include integrated safety features for crash energy management.

Introduction

United Nations (UN) Climate Action Summit 2019 recommends that greenhouse gas (GHG) emissions be reduced by 45% (from a reference GHG level of 2010) and down to **zero** GHG emissions by 2050 [1]. The transportation sector is responsible for 14% of global GHG emissions in the environment, of which 50% is accounted for by roadside emissions [2]. Although the transportation sector's contribution is less than one sixth of global GHG emissions, each sector has to make a significant effort to meet this aggressive carbon emission requirement. One of the ways to reduce roadside emissions significantly is to adapt advanced vehicle-propulsion technology (in other words, an electric powertrain).

Although the concept of vehicle electrification is not new, mass adoption has required enabling technologies to achieve the desired level of maturity. More specifically, over the past decade there have been significant developments in battery pack technology.

The battery pack is an integral part of an electric vehicle (EV). It contains battery cells which are arranged in series or parallel configuration so as to provide power to the vehicle. Apart

from electrical requirements such as charging time, total energy storage for the driving range, energy volumetric density and specific energy, the total mass and package space of the pack adds further constraints to the vehicle build, vehicle dynamics and safety requirements. Furthermore the pack has to ensure proper thermal management of the heat generated by charging and discharging during vehicle operation. Finally, the material used for battery packs needs to support EV safety requirements, including the possibility of a runaway thermal event.

Current battery packs are primarily made of metallic materials which benefit from high specific mechanical performance, good heat conduction and good electromagnetic shielding performance. Drawbacks of the current material selection include high weight and limited functional integration at the component level, resulting in a large number of components together with the associated assembly challenges and costs.

Low-density thermoplastic materials with the right composition and application design have the potential to meet critical battery pack requirements and additionally offer potential for weight cuts, reduced part volume and higher functional integration.

This paper highlights how EV battery applications could benefit from the use of thermoplastic materials. First of all, the current EV battery pack technology will be introduced. Next, a plastic-intensive conceptual design will be presented and its advantages over current solutions will be discussed. In addition, the mechanical performance of the concept will be assessed via finite-element simulations.

The EV battery pack – functions and current solutions

The components of an EV battery pack are shown in Fig. 1 – each will be discussed separately.

The pack enclosure

The battery pack enclosure consists of a top cover and a floor pan. The top cover provides the stiffness for adequate pressure sealing against water ingress. The floor pan of the battery is typically the floor of the vehicle as well. It safeguards the vehicle against external mechanical loading (puncture) and any external thermal event. Furthermore, for the efficient functioning of the vehicle, the two covers should ensure adequate housing of the vehicle electronics and of the electronics within the battery pack itself.

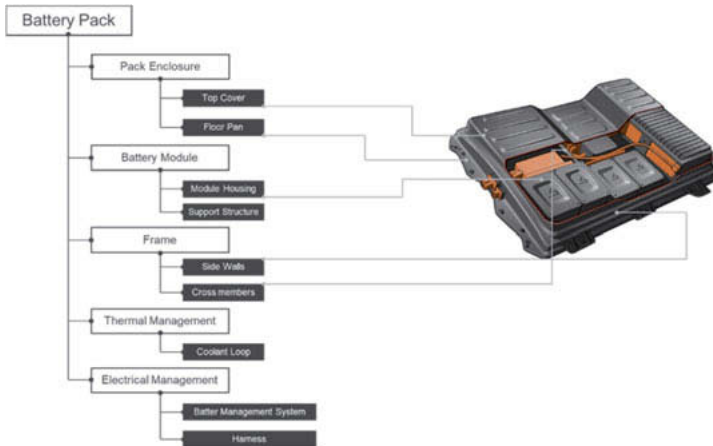


Fig. 1: Components of a battery pack

A benchmarking study of 50 electric vehicles shows that more than 60% have metallic top covers, followed by sheet-molded compounds (SMC) with 20%, whereas thermoplastic polyolefin (TPO) solutions account for only about 6% (see Fig. 6). TPO solutions are typically produced by compression molding or thermoforming. No injection-molded solutions have been found.

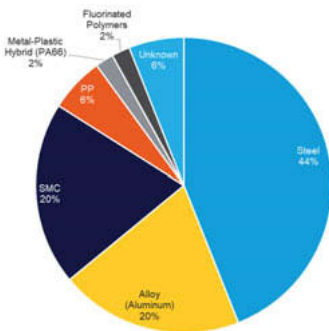


Fig. 2: Top-cover benchmarking based on data obtained from the A2Mac1* database [3]

The battery module

The battery module holds stacks of cells together. The design and construction of the module varies depending on the type of cell used. Lithium-ion (or Li-ion) cells are widely used for EV batteries due to their very high energy density, high voltage, relatively low self-discharge rate, and relatively long life [4]. However, they come in different shapes and sizes, such as cylindrical, prismatic and pouch which each have their relative strengths and weaknesses [5].

One of the challenges with battery cells is that they expand and contract during the charging and discharging cycles. The module design should ensure efficient performance by constraining the cells to maintain optimal contact pressure. The module design also needs to ensure the thermal management of the battery in order to keep the temperature of the cells within their operating limit. In the case of a thermal event, the design should have features to contain the thermal event and limit the number of cells affected. Finally, the battery module should have mounting features to enable efficient assembly in the battery pack.

The frame

The frame consists of two longitudinal (left side and right side) members and two lateral (front and rear) members, kept together by cross-members integrated in the battery pack (see Fig. 3). The frame contains the mounting points by which the battery pack can be fitted in the vehicle body-in-white, provides structural stiffness and strength to the battery pack and should protect the battery pack in the event of a crash.

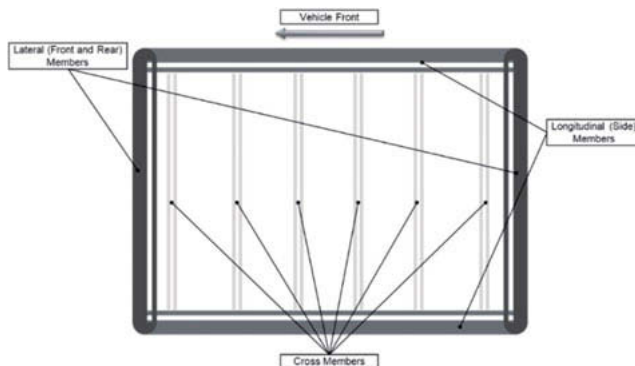


Fig. 3: Battery pack frame

The most important crash requirement for the EV battery frame is preventing lateral pole-impact intrusion into the battery packs. Side members need to have the bending stiffness to limit this intrusion and a high energy absorption in order to keep the maximum force in the frame within its design limit.

Thermal management auxiliaries

To manage the heat in between the modules, a battery pack contains additional thermal management auxiliaries. These consist of a combination of highly thermally conductive materials, liquid coolant, and/or phase change materials.

Electrical management auxiliaries

The battery pack also has additional components for electrical management including a battery management system (BMS). Various requirements may exist for electrical management auxiliaries, but this part of a battery pack is out of scope for this paper.

Plastic-intensive EV battery pack concept

A plastic-intensive conceptual design of an EV battery pack has been developed which takes into consideration the criteria and requirements mentioned in the previous section.

Material selection

To meet general requirements for structural integrity, process freedom and thermal management, cutting-edge thermoplastic materials and their compounds are employed for the battery pack.

The design concept

Fig. 4 provides a snapshot of different elements of the battery pack concept. A cut section of the top cover at the bottom right-hand corner shows the elements inside the pack. Each of these elements will be discussed in detail.

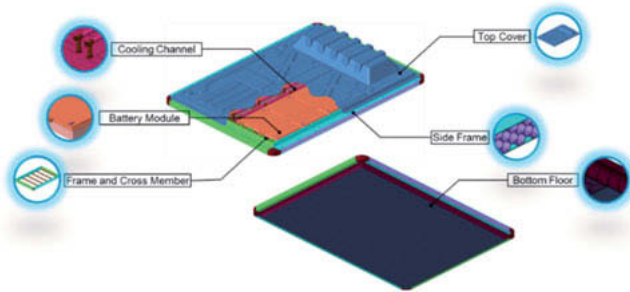


Fig. 4: Elements of the conceptual plastic-intensive battery pack design

The top cover

A thermoplastic top cover is injection-molded from a robust flame-retardant polyolefin (see Fig. 5). Compared to conventional stamped sheet metal or sheet-molded compound (SMC), injection molding offers a higher degree of shaping of the part. This design freedom enables the use of local thickness variations and ribbing structures that are used to achieve optimal performance at least weight. Furthermore, the shrinkage characteristics of the materials used enable a cover design that closely follows the inner contour of the pack, thus increasing its volumetric efficiency.

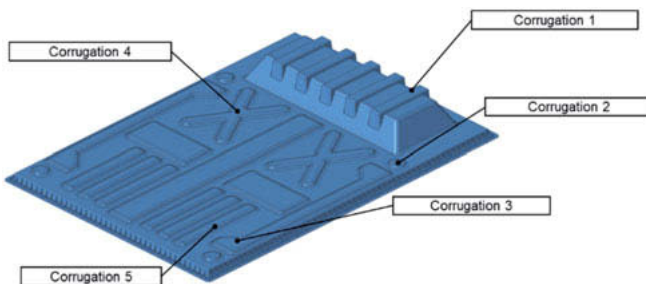


Fig. 5: Injection-molded top cover

A flame-retardant thermoplastic solution could be used in the top cover. Injection molding provides additional design freedom compared to conventional stamped sheet metal or a sheet-molded compound (SMC) solution. Local thickness variations and use of ribbing structures can be easily incorporated with an injection-molding process compared to competing technologies. It is also easier to design the part following the inner contour of the pack so as to increase its volumetric efficiency.

The floor pan

For the floor pan, a plastic-metal hybrid solution is selected consisting of a metallic plate adhesively bonded to an injection-molded plastic (see Fig. 6). Although the selection of the correct adhesive is important, commercial solutions do exist.

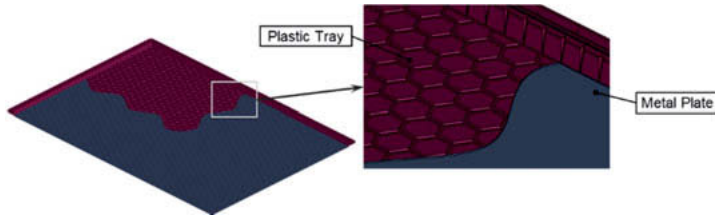


Fig. 6: Cut section showing connection between the metal and the plastic tray

The metal plate protects the battery pack from external stone impact and provides puncture resistance, whereas the combined plastic-metal tray with its unique cell shape protects the battery pack when the latter is subjected to high temperatures from outside and from underneath the battery for a short duration of time [GB/T 31467.3 Requirement] (see Fig. 7 for explanation).

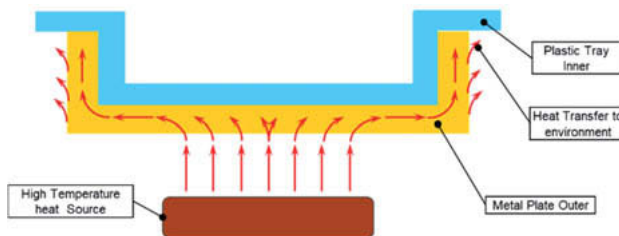


Fig. 7: Pictorial representation of heat flow in a plastic-metal hybrid bottom cover

Battery Module

Fig. 8 shows a battery module assembly with the electrodes protruding from the battery lid. These electrodes are used to make electrical connections with neighboring modules.

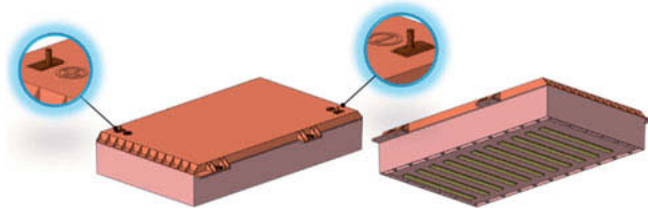


Fig. 8: Battery module assembly

Pouch cells are sandwiched between two aluminum plates to assist in removing heat from the pouch cells to a liquid-cooled heat sink at the bottom of the battery pack. The aluminum plates are positioned in the box by means of slots provided in the module box. Electrical connectivity of the pouch cells is achieved by using connectors at the end of the cells. Like the aluminum plate, these connectors are also secured in the slots integrated in the side walls of the module box.

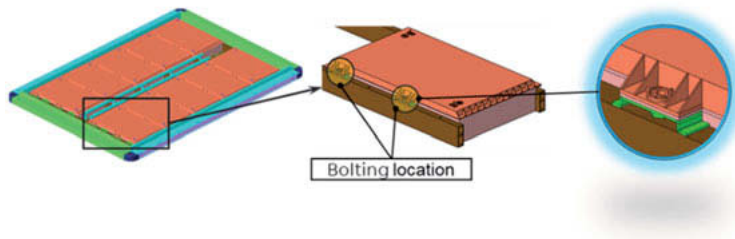


Fig. 9: Battery module assembly in the pack

The module is bolted onto the cross-members of the battery pack via a clamping cage at the bolting locations, as shown in Fig. 9.

The frames of the battery pack

The frame of the battery box consists of two side members connected by front and rear lateral members and several cross-members (see Fig. 10). The lateral and side members are bolted to each other via corner brackets.

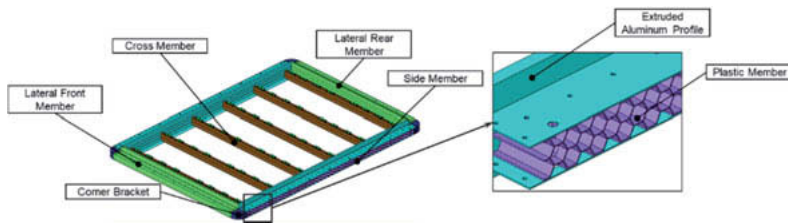


Fig. 10: Battery pack frame

The lateral front and rear members are extruded aluminum members in order to provide bending and torsional stiffness to the frame. The side members consist of a plastic-metal hybrid structure with plastic honeycomb adhesively bonded to an extruded aluminum member in order to mitigate energy absorption during pole side impacts. We had already successfully validated this concept in the rocker area of a car currently in production [6].

Thermal management of the battery pack

The cooling system of the battery has two aluminum cooling plates, and a liquid coolant circulates in the channels provided between the two plates. The bottom plate is mounted on the floor of the plastic tray. The top plate is attached to the individual module to take the heat away from the module.

Performance evaluation

For our plastic-intensive concept to be successful, several mechanical performance requirements must be satisfied. Furthermore, there need to be additional advantages over current metal solutions.

Concept benefits

In Table 1, the plastic-intensive concept is evaluated against current solutions. Criteria observed are:

- Pack energy density (volumetric): total energy content / total battery pack volume
- Pack specific energy (gravimetric): total energy content / total battery pack mass
- Functional integration or part count reduction
- Battery pack weight

The performance increase is indicative and dependent on the size and capacity of current solutions.

Table 1: Comparison of the plastic-intensive concept and the equivalent current solution (taken from [3])

Criterion	Comparison versus incumbent
Pack energy density	Increased by 20%
Pack specific energy	Increased by 10%
Functional integration	Reduced by 5 to 8 parts
Pack weight	Reduced by 10%

Mechanical performance

The performance evaluation was carried out in the LS-Dyna* explicit finite-element modeling package [7] commonly used in the automotive sector. As no validation data were available, the quality of spatial and temporal discretization was assessed by observing the kinetic energy and internal energy over time for each simulation.

Three severe mechanical impact requirements were selected based on discussions with various OEMs. The battery cells should be protected when subjected to:

1. Battery pack drop from 1m height onto flat surface
2. Battery pack drop from 0.245m height onto cylindrical beam
3. Side pole impact at 32km/hr (or 8.89m/s)

For model evaluation, the above requirements translate to no permanent deformation and/or cracks on the battery module and no failure at covers potentially causing separation for the first two load cases. For the third side pole impact case, the requirement translates to no intrusion of the side member into the battery module.

Battery pack drop from 1m height onto a flat surface

Fig. 11 shows the model set up for this load case and the normalized energy plot showing physical correctness of the impact simulation.

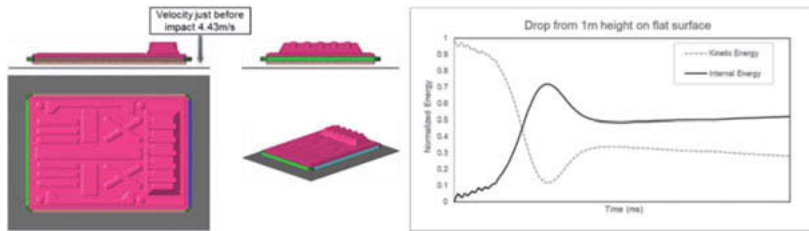


Fig. 11: Drop onto flat surface – model set-up and energy balance

To assess failure, the maximum stresses, normalized to the value at failure, were determined. The results indicate that the battery pack manages the drop without any damage to the frame, cross-members, battery module or top cover. Stress in the battery module was most critical and is shown in Fig. 12 for reference.

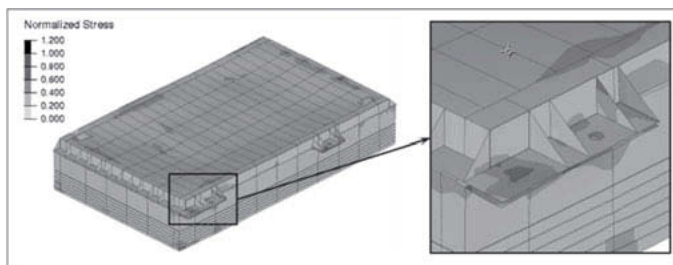


Fig. 12: Drop onto flat surface – stress normalized to value at failure shown. Plot in critical area indicating no material failure (values < 1).

However, a large deformation of the top cover is observed close to the center (Fig. 13). This is because the top cover is fixed to the frame around the periphery of the battery pack. Although not required, this deflection could easily be reduced by applying an additional fixing in the central region.

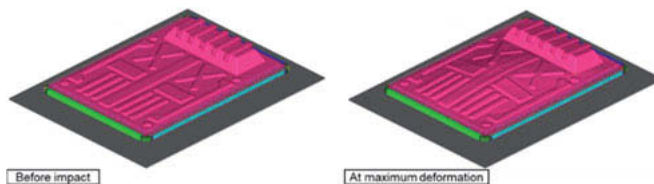


Fig. 13: Drop onto flat surface – illustration of deformation

Battery pack drop from 0.245m height onto a cylindrical beam

Fig. 14 shows model set-up for the 0.245 m drop onto a cylindrical beam and the normalized energy plot showing the physical correctness of the impact simulation.

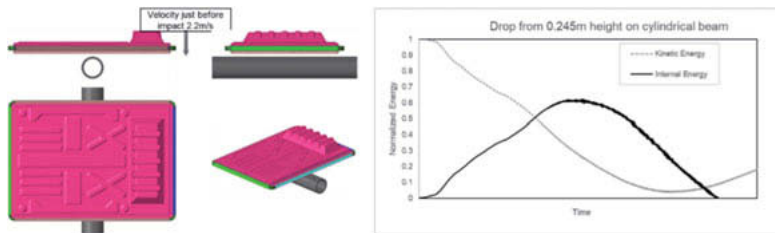


Fig. 14: Drop onto cylindrical beam – model set-up and energy balance

The results indicate that the battery pack manages the drop without any damage to the frame, cross-members, battery module or top cover. The most critical stress appears in the battery module, but values are below the damage threshold (see Fig. 15).

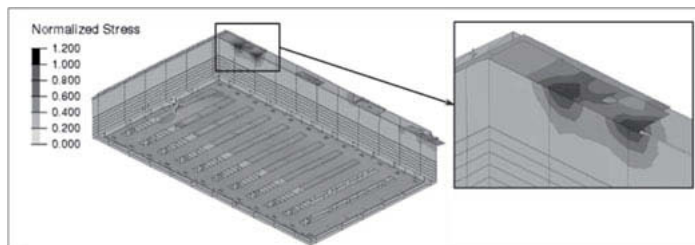


Fig. 15: Drop onto cylindrical beam – normalized stress plot showing no material failure (values < 1).

Impact with the cylindrical beam does not cause any excessive global bending of the side member, thus indicating good structural stiffness (Fig. 16).

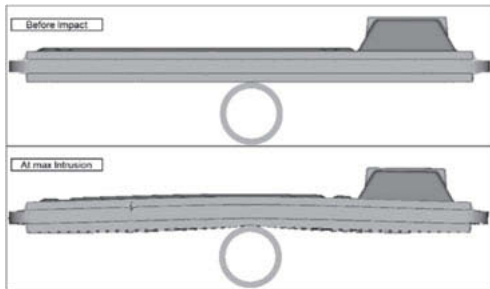


Fig. 16: Drop onto cylindrical beam – bending of side member

Side pole impact

Fig. 17 shows model set-up for the side pole-impact load case and the normalized energy plot showing the physical correctness of the impact simulation.

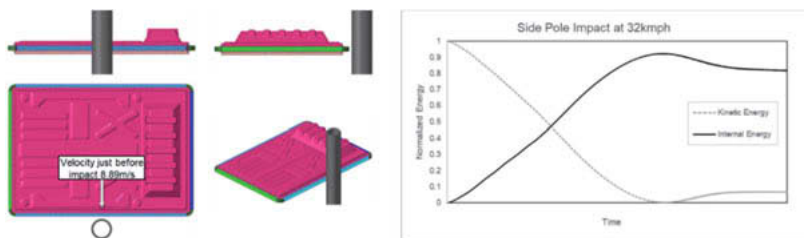


Fig. 17: Side pole impact – model set-up and energy balance.

It can be seen from Fig. 18 that the plastic-metal hybrid side member provides efficient energy absorption. The force trace in the left panel shows no spike at maximum intrusion, indicating there was no bottoming-out of the hexagonal thermoplastic structure which takes care of energy absorption. Furthermore it can be seen that there is no intrusion in the battery-module pole impact, thus indicating adequate bending stiffness of the side member.

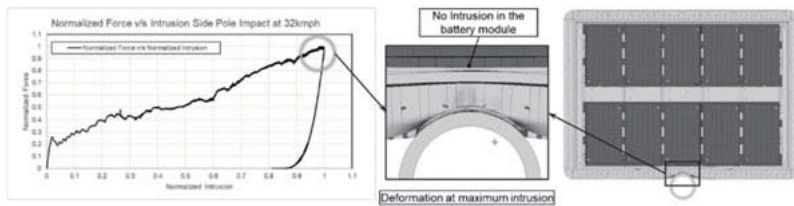


Fig. 18: Side pole impact – maximum intrusion during pole impact

Conclusion and future developments

A thermoplastic-intensive concept for a battery pack has been presented and its mechanical performance has been virtually evaluated against three severe mechanical requirements. Due to the low density and the added design flexibility of the injection-molded thermoplastic materials used, the plastic-intensive battery pack shows up to 20% higher energy density and up to about 10% higher specific energy. The design freedom was further utilized to integrate functionalities, leading to about a 5 to 8 part count reduction. For example, a side-impact energy absorber was integrated into the side member of the frame.

Although the concept presented relies on the injection-molding process, the feasibility of the process to manufacture the large top and bottom covers in particular should be investigated. Large parts make demands regarding material flow capability, which generally can be solved by using sufficient injection-molding gates and thickness requirements. However, one might run into machine clamp force limitations, which could present challenges. In such cases, alternative methods such as thermoforming could be employed as well.

For future developments, the battery pack will be evaluated for additional loading requirements in order to generate concepts and design philosophies for improving performance. Sophisticated simulation technologies are under investigation for virtual performance evaluation of the battery pack in multi-physics domains such as thermal management and EMI shielding. Some of the concepts developed will be tested on a real application in order to understand their effectiveness for EV battery applications.

Bibliography

- [1] UN, General Secretary, "Report of The Secretary-General on The 2019 Climate Action Summit and The Way Forward in 2020," UN Climate Action, New York, 2019.
- [2] R. Hannappel, "The Impact Of Global Warming On The Automotive Industry," in *AIP Conference Proceedings 1871, 060001 (2017)*, 2017.
- [3] "A2Mac1," [Online]. Available: <https://portal.a2mac1.com> . [Accessed January 2020].
- [4] Q. Xia, Z. Wang, Y. Ren, B. Sun, D. Yang and Q. Feng, "A reliability design method for a lithium-ion battery pack considering the thermal disequilibrium in electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 386, p. 10–20, 2018.
- [5] Y. Miao, P. Hyman, A. v. Jouanne and A. Yokochi, "Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements," *Energies*, vol. 12, no. 6, p. 1074, 2019.
- [6] "Society of Plastics Engineers Automotive," SPE Automotive, 2016. [Online]. Available: <https://www.4spe.org/i4a/pages/index.cfm?pageid=3585>. [Accessed January 2020].
- [7] "Livermore Software Technology," LSTC, [Online]. Available: <https://www.lstc.com/products/lis-dyna>.

Improving efficiency and quality in color matching in the car interior through digital color matching

Dipl.-Ing. (FH) **Walter Franz**, NCS Colour AB, Stockholm, Sweden

1. Abstract

A well-coordinated vehicle interior across all materials promotes sales and is an outstanding advertisement for the German automotive industry in particular. However, this calls for a great deal of effort and continues to be mostly managed in the traditional way using physical samples.

For some time now OEMs and suppliers have therefore been demanding the implementation of digital color communication. Unfortunately, this wish has so far only been partially realized. The reason for this is the inadequate absolute accuracy of the color measuring instruments with regard to the tolerances required.

Thanks to a new process for optimizing inter-instrument agreement, digital communication of master samples/specimens is now possible without restrictions – even with different instrument manufacturers. This process was successfully field-tested for over two years at selected companies in the automotive sector and has now been integrated into their manufacturing process.

2. The traditional procedure

After acceptance of the master samples for all relevant materials by the design department, the required number of these are prepared with considerable effort and distributed globally after testing. The recipients are the OEM's production facilities and all suppliers of the relevant materials. This process is costly, time-consuming and does not benefit the sample quality. Upon receipt of the color standards, they are measured with the local color measurement instruments and stored there.

Digital color communication has been used in other industries for many years. Without this methodology neither the graphics industry nor the textile industry would be competitive. However, due to the significantly tighter tolerances in the automotive industry, digital color matching is still only at the beginning. The reason for this can be seen in Fig. 1.

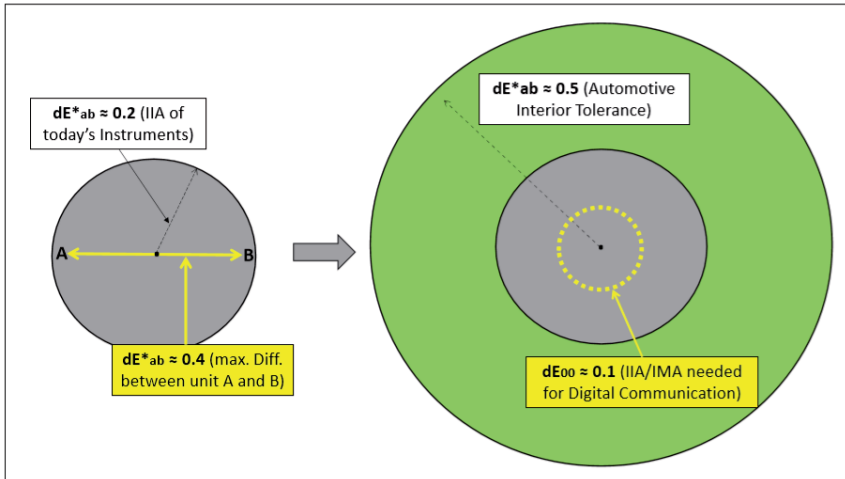


Fig. 1: Mismatch between the manufacturing tolerance of current color measurement technology and the tolerance specifications for the vehicle interior

3. Motivation and requirements for digital color matching

In order to reduce costs and increase the speed and precision of the coloring process, both OEMs and suppliers want to achieve the following:

- Fast global distribution of originals/master samples without loss of quality in order to achieve an improvement in color matching. The color target should therefore be a single digital color data set and not possibly different physical samples.
- Real-time information about the status and quality of processes by means of suitable web-based communication software. This enables seamless tracking of the processes per order/project → transparency
- Immediate creation of samples following receipt of the data set and on-line communication of the results via CAPQ software → time-saving
- 'Rescue' of color data created with spectrophotometers which now need to be replaced. Profiling of master sample data without significant deviations on new instruments.
- Significant reduction in handling costs for master samples.

In order to achieve these goals, the absolute accuracy of the measuring technology must be significantly improved. An inter-instrument agreement (IIA/IMA) of $dE_{00} < 0.10$ with respect to

the selected reference device is required for digital color matching. This requirement also applies to measuring instrument fleets from different manufacturers and is to be satisfied on real interior materials and not on test tiles from the instrument manufacturers. The latter usually consist of eight colored and four achromatic ceramic tiles (BCRA Series II) and of course do not cover the entire color space. The tiles are structureless, shiny, partially translucent and show a strong temperature dependency and should therefore only be used under laboratory conditions.

The Swedish company NCS Color AB in Stockholm has developed, initially for its own purposes, a new profiling and communication technology (CAPQ) based on a Microsoft cloud.

Here, the instruments fleet is profiled with respect to a reference instrument using 64 extremely high-quality color coatings (connection set), distributed over the entire color space. For the supplier, this reference instrument can be the master instrument of the OEM or the supplier's own color measuring instrument in the central color laboratory or both.

Profiling is carried out in two stages:

- (a) Optimization of the spectral agreement of the instruments to be profiled with respect to the master device in the case of unstructured samples (connection set).
- (b) The three-dimensionality of the automotive specimens (gloss and grain) is then adjusted. Since the different optical design of measuring devices from different manufacturers influences the measurement results of structured specimens, this component is essential.

Prior to use in the NCS reference laboratory the color data for the connection set are measured with $d_i/e:8^\circ$ und $45^\circ c:0^\circ$ instruments. These spectrophotometers are constantly monitored so that stable color data are available for profiling and subsequent checking. Upward compatibility with national institutes is guaranteed.

The samples are valid for three months and may not be used thereafter. For any re-profiling work or for annual checking of the measuring devices the user is provided with a new, reduced connection set with current data.

The actual profiling of the reflection data by the NCS algorithm takes place after the measurement results have been uploaded to the cloud. The optimized color data are then made available to all authorized users. The uncorrelated data continue to be available. This

process does not affect the measuring instruments; the instrument manufacturer's service department will find an unchanged device.

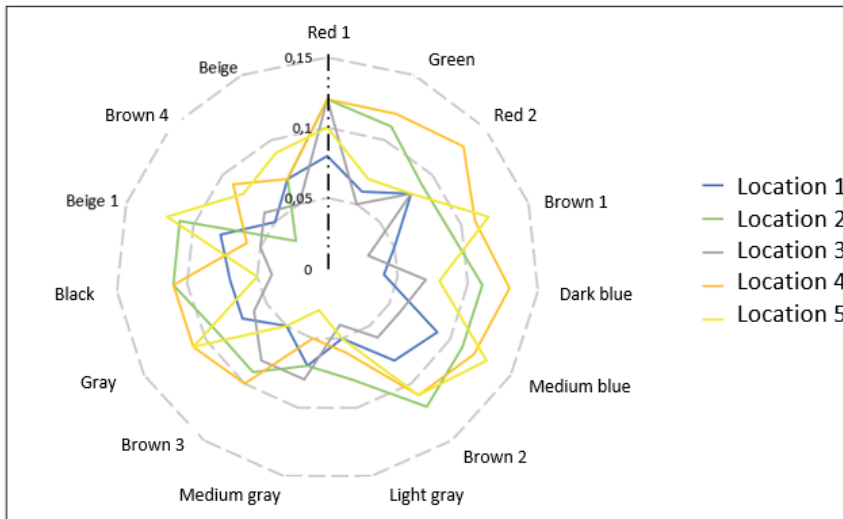


Fig. 2: dE^*_{ab} results for master samples after profiling a fleet of measuring instruments

Following profiling, the results represent a massive improvement in inter-instrument agreement. After conversion to dE_{00} , all results fall within the required tolerance and are therefore fully suitable for digital color matching (applies to sphere and $45^\circ:0^\circ$ spectrometers).

Suitability of the fleets for digital color matching should be checked once a year using the CAPQ monitoring set.

4. Communication process

After profiling via CAPQ, the supplier and the customer access the same data set of the standard (master sample). The customer (OEM) defines downloading authorizations. The supplier can communicate internally with other production facilities as well as with several customers. Parallel profiles are possible.

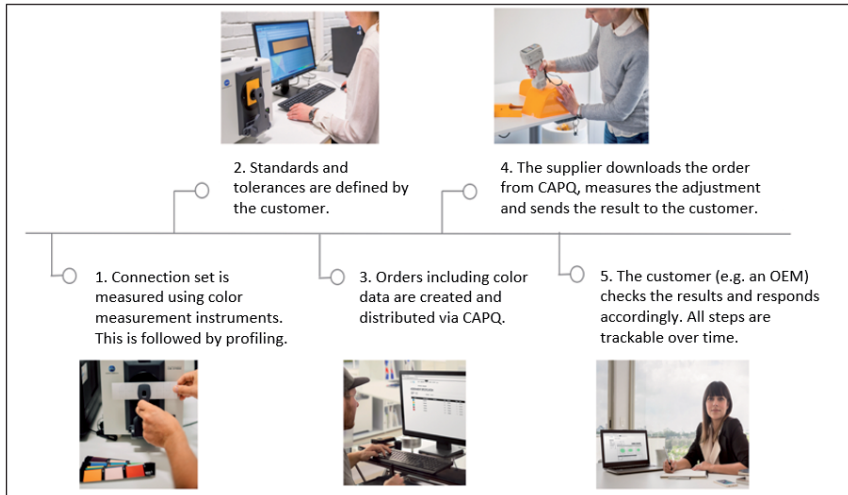


Fig. 3: Schematic of the communication between supplier and customer

5. Digital color matching in the workflow

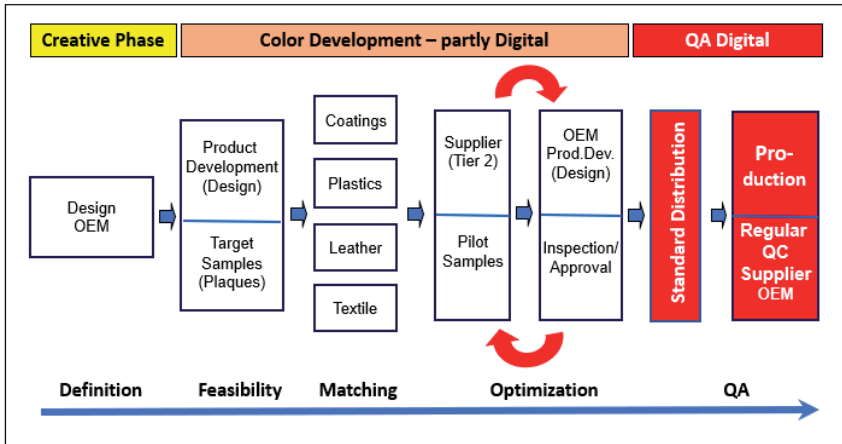


Fig. 4: Areas of application of digital color matching in the coloring process

Experience shows that digital color communication should be used not only in quality control but also in color development. During the development phase, the feasibility and metameric behavior of a color concept can be checked in advance without creating samples. The usual 'loops' are reduced here by up to 50%. The creative phase in the process must still take the traditional, ie visual, path followed by experienced designers.

6. Summary and results

The requirements described in Section 3 were successfully met by digital color matching, in particular the handling/management of master samples being much easier and cheaper. Shortened response times and transparent communication through the use of CAPQ significantly increases efficiency. During the pilot phase, the close involvement of participating companies made it possible, in particular, to adapt the CAPQ software to the needs of the automotive supply chain.

Precise figures for savings were not yet available at the time of writing but will be submitted to the conference later.

Effizienz- und Qualitätsverbesserung bei der Farbabstimmung im PKW Innenraum durch Digitales Color Matching

Dipl.-Ing. (FH) **Walter Franz**, NCS Colour AB, Stockholm

1. Kurzfassung

Eine gute Abstimmung des Innenraumes über alle Materialien ist verkaufsfördernd und ein Aushängeschild speziell der deutschen Automobilindustrie. Der Aufwand hierfür ist allerdings hoch und wird nach wie vor überwiegend traditionell mit physikalischen Mustern bewältigt.

OEMs und Lieferanten fordern daher seit geraumer Zeit die Realisierung der digitalen Farbkommunikation. Leider ist dieser Wunsch bis dato nur partiell realisierbar. Der Grund hierfür liegt an nicht ausreichender Absolutgenauigkeit der Farbmessgeräte für die geforderten Toleranzen.

Durch ein neues Verfahren zur Optimierung der Geräteübereinstimmung ist nun die digitale Kommunikation von Urmuster/Proben ohne Einschränkung möglich - auch über unterschiedliche Messgerätehersteller. Das Verfahren wurde erfolgreich über zwei Jahre bei ausgesuchten Unternehmen der Automobilindustrie im Feldversuch getestet und ist nun in deren Fertigungsprozess integriert.

2. Traditionelle Arbeitsweise

Nach der Abnahme der Urmuster für alle relevante Materialien durch das Design werden diese aufwändig in der nötigen Stückzahl erstellt und nach Prüfung global verteilt. Die Empfänger sind die Produktionsstätten des OEM sowie alle Lieferanten für die entsprechenden Materialien. Dieser Prozess ist kostenintensiv, zeitraubend und der Muster Qualität nicht zuträglich. Nach Erhalt der Farbstandards werden diese mit den lokalen Farbmessgeräten gemessen und dort gespeichert.

Digitale Farbkommunikation ist in anderen Industrien bereits seit vielen Jahren im Einsatz. Sowohl die Graphische Industrie als auch die Textilindustrie sind ohne diese Methodik nicht konkurrenzfähig. Durch die deutlich engeren Toleranzen in der Automobilindustrie steht das Digitale Color Matching hier noch am Anfang. Der Grund hierfür wird in Bild 1 ersichtlich.

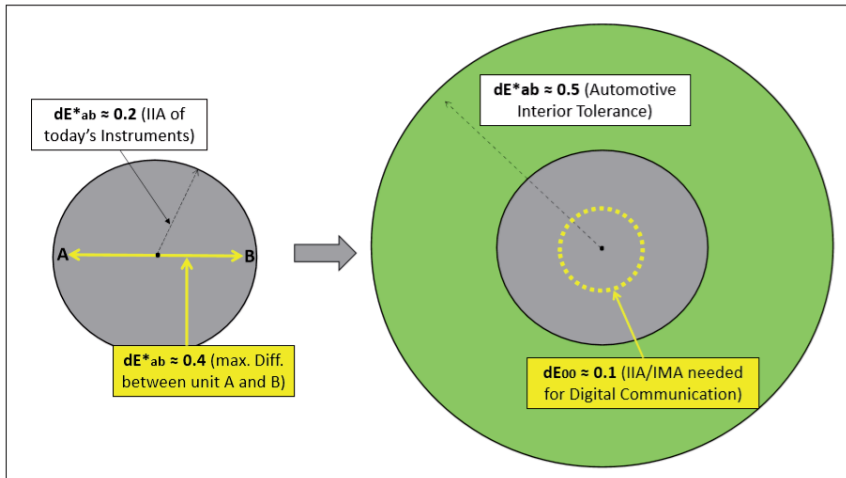


Bild 1: Missverhältnis zwischen der Fertigungstoleranz aktueller Farbmesstechnik und den Toleranzvorgaben für den Innenraum

3. Motivation und Voraussetzungen für das Digitale Color Matching

Um Kosten zu senken und die Geschwindigkeit und Präzision des Farbgebungsprozesses zu erhöhen, wollen sowohl OEMs als auch Lieferanten Nachstehendes erreichen:

- Schnelle globale Verteilung von Vorlagen/Urmuster ohne Qualitätseinbußen um eine Erhöhung der Abstimmungsqualität zu erreichen. Farbziel soll also ein einheitlicher digitaler Farbdatensatz sein und nicht u.U. unterschiedliche physikalische Muster.
- Real-time Information über Status und Qualität der Prozesse durch eine geeignete Web-basierte Kommunikationssoftware. Dadurch lückenlose Nachverfolgung der Abläufe pro Auftrag/Projekt → Transparenz
- Sofortige Erstellung von Mustern nach Erhalt des Datensatzes und Online-Kommunikation der Resultate via CAPQ Software → Zeitgewinn
- „Rettung“ von Farbdaten erstellt mit Spektralphotometern welche jetzt ersetzt werden müssen. Profilierung von Urmusterdaten ohne signifikante Abweichungen auf neue Instrumente.
- Deutliche Reduktion der Handlingkosten von Urmustern.

Um o.g. Ziele zu erreichen, ist in erster Linie die Absolutgenauigkeit der Messtechnik signifikant zu verbessern. Für das Digitale Color Matching ist eine Instrumentenübereinstimmung (IIA/IMA) von $dE_{00} < 0.10$ zum ausgewählten Referenzgerät erforderlich. Diese Forderung gilt auch für Messgeräteflotten unterschiedlicher Hersteller und ist an realen Innenraummaterialien zu erbringen und nicht an Prüfkacheln der Gerätehersteller. Diese bestehen in der Regel aus acht bunten und vier unbunten Keramikkacheln (BCRA Serie II) und decken natürlich nicht den gesamten Farbraum ab. Sie sind strukturlos, glänzend, teilweise transluzent und weisen eine starke Temperaturabhängigkeit auf und sollten daher nur unter Laborbedingungen benutzt werden.

Das schwedische Unternehmen NCS Colour AB in Stockholm hat, zunächst für eigene Zwecke, eine neue Profilierungs- und Kommunikationstechnologie (CAPQ) auf Basis einer Microsoft Cloud entwickelt.

Hierbei wird die Geräteflotte mit 64 extrem hochwertigen Farbbeschichtungen (Connection Set), verteilt über den gesamten Farbraum, zu einem Referenzgerät profiliert. Dies kann für den Lieferanten das Mastergerät des OEM oder sein eigenes Farbmessgerät im zentralen Farblabor oder beide sein.

Die Profilierung ist zweistufig:

- a) Optimierung der Spektrenübereinstimmung der zu profilierenden Instrumente an das Mastergerät bei unstrukturierten Mustern (Connection Set).
- b) Danach erfolgt die Anpassung an die Dreidimensionalität der automobilen Proben (Glanz und Narbung). Da das unterschiedliche optische Design von Messgeräten verschiedener Hersteller die Messergebnisse von strukturierten Proben beeinflusst, ist diese Komponente unerlässlich.

Die Farbdaten für das Connection Set werden vor Benutzung im Referenzlabor von NCS mit $d/2^\circ:8^\circ$ und $45^\circ:c:0^\circ$ Geräten gemessen. Diese Spektralphotometer werden ständig überwacht, so dass stabile Farbdaten zur Profilierung und zur späteren Kontrolle zur Verfügung stehen. Die Aufwärtskompatibilität zu nationalen Instituten ist gewährleistet.

Die Muster sind drei Monate gültig und dürfen danach nicht mehr verwendet werden. Für eine evtl. Nachprofilierung oder zur jährlichen Überprüfung der Messgeräte erhält der Anwender ein neues, reduziertes Connection Set mit aktuellen Daten.

Die eigentliche Profilierung der Reflexionsdaten durch den NCS-eigenen Algorithmus geschieht nach dem Hochladen der Messergebnisse in der Cloud. Die optimierten Farbdaten stehen anschliessend allen Berechtigten zur Verfügung. Die unkorrelierten Daten sind nach wie vor verfügbar. Dieser Ablauf berührt die Messgeräte nicht; der Service des Geräteherstellers findet ein unverändertes Gerät vor.

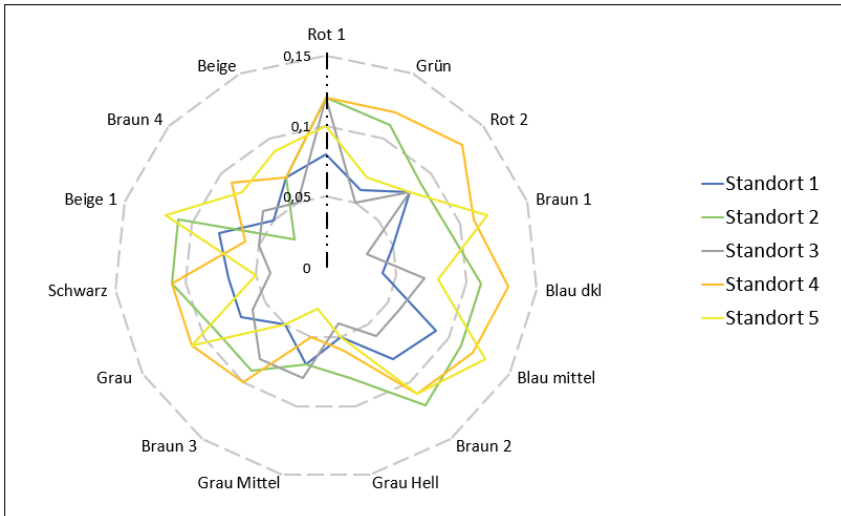


Bild 2: dE^*_{ab} Ergebnisse von Urmustern nach Profilierung einer Messgeräteflotte.

Die Ergebnisse stellen nach der Profilierung eine massive Verbesserung der Geräteübereinstimmung dar. Nach Umrechnung auf dE_{00} sind alle Ergebnisse innerhalb der geforderten Toleranz und somit uneingeschränkt für das Digitale Color Matching geeignet (gilt für Kugel und $45^\circ:0^\circ$ Spektrometer).

Die Eignung der Flotten für das Digitale Color Matching sollte einmal pro Jahr mit dem CAPQ Monitoring Set überwacht werden.

4. Kommunikationsablauf

Lieferant und Abnehmer greifen nach Profilierung via CAPQ auf den gleichen Datensatz des Standards (Urmuster) zu. Der Abnehmer (OEM) definiert die Berechtigungen für den Download. Der Lieferant kann sowohl intern mit anderen Produktionsstätten kommunizieren als auch mit mehreren Abnehmern. Parallele Profile sind möglich.



Bild 3: Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen Lieferant und Abnehmer

5. Digitales Color Matching im Workflow

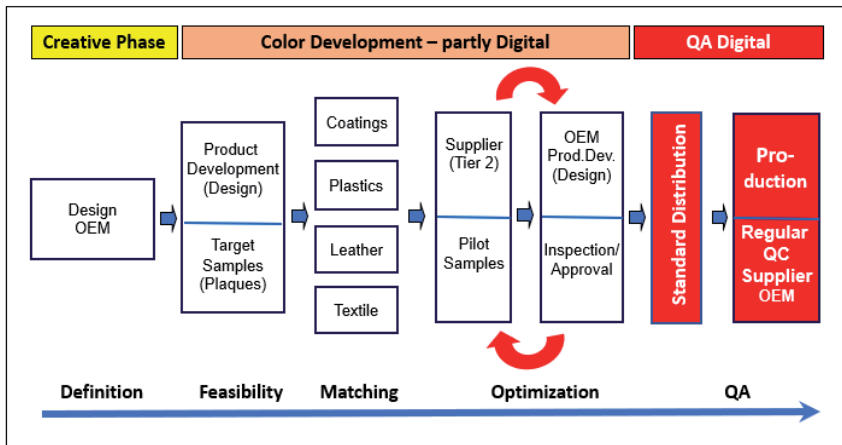


Bild 4: Einsatzbereiche des Digitalen Color Matching im Farbgebungsprozess

Die Erfahrung zeigt, dass die digitale Farbkommunikation in der Qualitätskontrolle aber auch bei der Farbentwicklung zum Einsatz kommen sollte. Während der Entwicklungsphase können insbesondere die Machbarkeit und das Metamerieverhalten einer Farbidee ohne Herstellung von Mustern vorab geprüft werden. Dabei werden die üblichen "Schleifen" bis zu 50% reduziert. Die kreative Phase im Prozess muss nach wie vor traditionell, d.h. visuell, durch erfahrene Designer erfolgen.

6. Zusammenfassung - Ergebnisse

Die unter 3) beschriebenen Forderungen konnten durch das Digitale Color Matching erfüllt werden, insbesondere das Handling/Management von Urmustern wird deutlich einfacher und kostengünstiger. Die verkürzten Reaktionszeiten und die transparente Kommunikation durch die Nutzung von CAPQ erhöhen die Effizienz beträchtlich. Während der Pilotphase konnte durch die enge Mitwirkung der beteiligten Unternehmen insbesondere die CAPQ Software an die Bedürfnisse der Automobilen Lieferkette angepasst werden.

Die genauen Einsparungen waren zur Drucklegung des vorliegenden Manuskriptes noch nicht verfügbar, werden aber zum Kongress nachgereicht.

New possibilities for graphites and minerals in the design of composites with high thermally conductive plastic

Jérôme Crépin-Leblond M.Sc.,

Imerys Graphite and Carbon, Toulouse, France

Abstract

For some applications, polymer composites with a high thermal conductivity are desirable. The aim of this study is to design a polypropylene-based formulation with a thermal conductivity (TC) better than 10 W/m.K perpendicular to the plane of injection molding. As this represents a challenging target for thermal conductivity, various graphites at high loading (from 60 to 85%) were evaluated to examine the influence of graphite choice on performance. In an attempt to boost orientation perpendicular to the plane and to optimize processability, some minerals and additives at limited loading were also tested in combination with graphite as the main additive.

The use of high graphite loading, i.e. 70% and above, allows for a high through-plane TC, superior to 10 W/m.K. High graphite loading induces high PP-based compound viscosity which could lead to a narrow process window. These issues could be tackled by using coarse graphite, either natural or synthetic. The addition of a low loading of mineral, such as high-aspect-ratio talc or fine-calcined-clay coarse graphite is also recommended in order to optimize the processability of the composites while maintaining a high thermal conductivity.

1 Introduction

A number of applications are being developed using thermally conductive plastics to replace metal parts. Application examples are found for instance in electronic, electrical, automotive, and industrial parts. The polymer compositions enable end users to benefit from light-weighting, design flexibility, function integration and durable solutions. To reach the required thermal conductivity (TC), polymer formulators often need to include additives such as carbon-based products, ceramics or oxides. Thanks to its excellent performance, graphite is now widely used by polymer compounders globally [1, 2, 3].



Fig. 1: Some applications of graphite-modified composites: 1 (left): LED heat sink; 2 (center): automotive lead heat sink; 3 (right): electronic circuit heat sink

Graphite is an allotropic form of carbon which is an excellent thermally conductive additive. It is widely used in polymer-based compositions. Both natural graphite and synthetic graphite can be used for that purpose. Due to the structure of graphite, formed by stacks of hexagonal carbon atoms arranged as graphene layers (Fig. 2), the phonons propagate quickly along the graphene planes and more slowly perpendicular to the planes. This leads to an anisotropic thermal conductivity of graphite: >2000 W/m.K in-plane and ≈ 10 W/m.K through-plane.

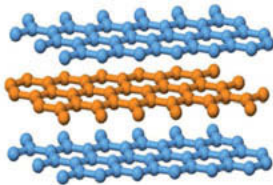


Fig. 2: Graphite basic structure

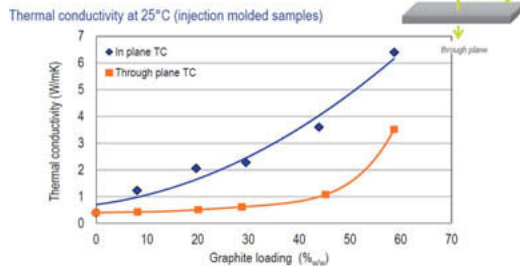


Fig. 3: Typical evolution of TC in-plane and through-plane in a graphite-modified polymer

Processing of plastics parts, for example, by compression, by extrusion or by injection molding, induces polymer and filler orientation. In the case of graphite-based composites, the morphology of the parts leads to highly anisotropic TC with higher in-plane performance (Fig. 3) [1; 4]. Therefore to reach a through-plane TC value superior to 10 W/m.K, a large amount of graphite, from 60 to 85% (in weight over the total formulation), will be tested.

Graphite aspect ratio and particle-size distribution can be optimized by processing. Imerys has developed a range of high-aspect-ratio graphites commercialized under the name TIMREX® C-THERM™. Their superior TC performance makes it possible to design polymer compounds with high TC while limiting the amount of carbon additives in the formulations. For instance, it is possible to replace 40% of standard graphite with 20% C-THERM™ while maintaining the same TC at a lower final density [4]. Producing such high-aspect-ratio graphites leads to a very fluffy powder, difficult to handle and to feed in polymer compounders. A new grade, C-THERM™ MAX HD, has been recently optimized using a patented process in order to offer superior bulk density and excellent TC in polymers.

The effect of natural and synthetic graphite morphology and particle-size distribution will be studied by selecting various grades of graphites. In particular, as high through-plane TC is sought, two graphites with lower anisotropy will be evaluated: SLP 50 and HRG 250.

The introduction of a high filler content often leads to high viscosity and more challenging processing. It also means lower mechanical performance [5; 6]. These two parameters will be studied.

In addition, it is known that blends of graphite with other minerals offer a way of adapting the processing of compounds and the overall properties of plastics components [6]. Blends with high loading of graphite with 15%-35 % minerals or additives will be examined.

2 Materials and method

All blends are based on PP, which is modified with graphite or fillers. The formulations are described via the amount of additives, expressed in weight % over the total weight of the formulation.

2.1 Graphites

All of the selected graphites are produced by Imerys Graphite & Carbon. Since high loading of additives is targeted, only graphites with mid- to coarse particle sizes are selected, in order to limit the viscosity of the melt. This is also a way of enhancing the TC which is generally higher for coarse graphites.

Two natural graphites are used: TIMREX® M100 and TIMREX® 20x50. Three synthetic graphites are selected: TIMREX® KS 75, TIMREX® KS 5-75 and TIMREX® KS 150-600.

Two shaped graphites, with lower anisotropy, are tested in attempt to obtain a high through-plane TC value: TIMREX® HRG 250 and TIMREX® SLP 50.

The high-aspect-ratio graphite with coarse particle-size distribution and a high density of 0.4 g/cm³ TIMREX® C-THERM™ MAX HD are trialled as well.

Table 1: Graphite grades evaluated

Type	Grade	Particle Size Distribution
Medium Synthetic Graphite	Timrex KS 75	d90 = 70 µm
Medium Synthetic Graphite - no fines	Timrex KS 5-75TT	d90 = 70 µm
Coarse Synthetic Graphite	Timrex KS150-600	150 to 600 µm
Shaped Graphite	Timrex SLP50	d90= 50 µm
Shaped Graphite	Timrex HRG 250	d90≈ 75 µm
Coarse Natural Graphite	Timrex M100	0 to 150 µm
Coarse Natural Graphite	Timrex 20x50	300 to 800 µm
High Aspect Ratio Graphite	Timrex C-THERM MAX HD	Coarse

2.2 Minerals

The following minerals and additives are being evaluated in blends with graphites:

- Two talc grades:
 - Luzenac 1445, a standard grade having a medium particle size d50=10 µm (measured by sedigraph)
 - Luzenac HAR T77, high-aspect-ratio talc which brings a thermal conductivity superior to other talc grades
- One standard zinc oxide and standard boron nitride
- One surface-coated calcined clay: Polarite 102 A
- One high-aspect-ratio wollastonite, Aspect 3000
- One very fine carbonate: Polcarb 90
- One standard polymer glass fiber
-

Table 2: Mineral and additives grades tested

Mineral Type	Grade	Particle size	BET
Talc 1	IMERYS - Luzenac 1445	d50=10 µm	2,5 m ² /g
Talc 2 - Highly Lamellar	IMERYS - HAR T77	d50=2 µm	19 m ² /g
Zinc Oxide	Market Grade	d50=1,5 µm	4,5 m ² /g
Boron Nitride	Market Grade	NA	5 m ² /g
Calcined Clay - Surface Coated	IMERYS - Polarite 102 A	d50 around 2 µm	8,5 m ² /g
Wollastonite	IMERYS - Aspect 3000	7 * 50 µm	
Carbonate	IMERYS - Polcarb 90	d50=1 µm	
Glass Fiber	Market Grade	diameter 13 µm	

2.3 Polypropylene

The polypropylene (PP) grade is a homopolymer, Moplen 501 L from Lyondell Basell. It has an MFR of 6 g/10 min measured at 2.16 kg and 230°C.

2.4 Processing

The samples are blended using a Haake PolyLab internal mixer from ThermoFischer. All mixes are prepared to reach 80% volume chamber filling, set at 190°C with rotors rotating at 100 rpm. The PP resin is introduced first, melted for 2 minutes, then the graphites and additives are added and the blend is mixed for another 5 minutes. 10 s before the end of the mixing phase, the torque is noted in order to evaluate the viscosity of the system.

To mold disks and holders for further characterization, a Thermofischer Minijet Pro is used.

2.5 Characterization

For thermal conductivity, a Laser Flash LFA 447 from Netzsch is used. Tensile tests are performed on an Instron Dynamometer 5966, 10 kN.

3 Results and discussion

3.1 Performance of highly filled polypropylene graphites

The selected graphites are evaluated at 60% weight loading in the PP in order to first compare their through-plane TC.

Adding 60% synthetic graphite to the PP matrix reaches a through-plane TC of 1.8 to 2.7 W/m.K. The shaped graphites SLP 50 and HRG 250 have values in the same range as KS 5-75 which is a synthetic graphite with irregular spheroid morphology, meaning there are no clear benefits of using these additionally treated graphites for reaching high through-plane TC.

The flaky natural graphites M100 and 20x50 reach a TC of 3 to 4.5 W/m.K. The best performing PP containing 60% carbon additive is made with the C-THERM™ MAX HD and reaches a TC of 5.6 W/m.K, up to three times higher than with some synthetic graphites.

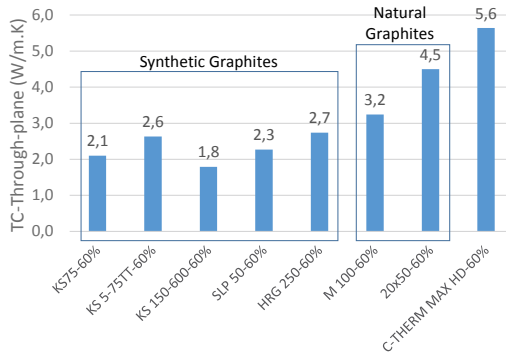


Fig. 4: Through-plane thermal conductivity of 60% graphite-modified PP

Three graphites were evaluated at 70% in PP. The through-plane TCs obtained for the composites reach 5.2 to 5.6 W/m.K with higher values for the synthetic grades KS 75 and KS 150-00 over the natural graphite M100.

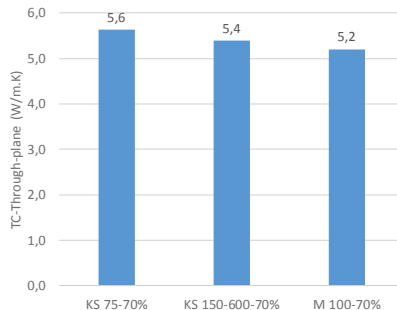


Fig. 5: Through-plane TC of PP modified with 70% graphite

The effect of graphite loading is studied by using the synthetic graphite KS 150-600 with 60% to 85% content (Fig 6). The TC is strongly influenced by the graphite loading: for example the through-plane TC of the 75% modified PP is 5 times higher than the one with the 60% graphite compositions. This effect is linked to the improvement of phonon transfer thanks to the reduction of graphite-matrix contact points.

The results confirm it is possible to design PP composites reaching through-plane TCs of 10 W/m.K or higher but only at very high loading of graphite, as of 75%.

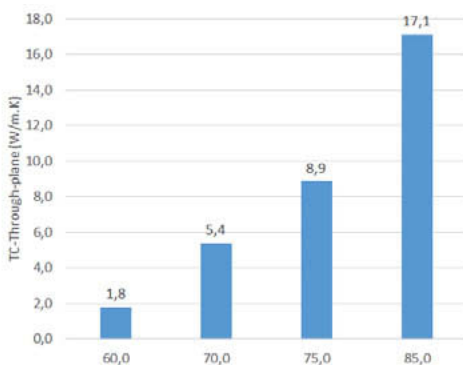
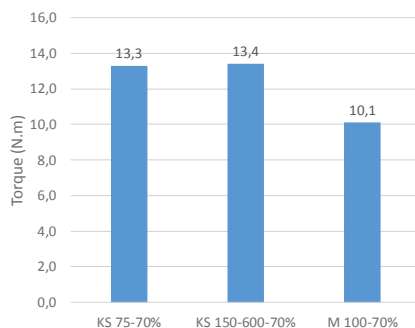
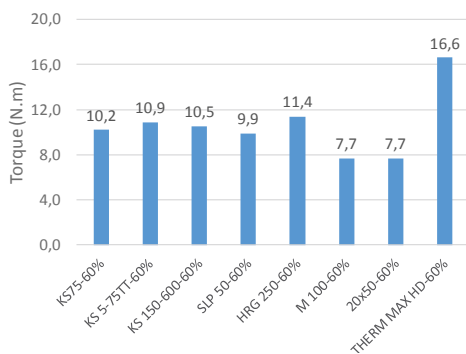


Fig. 6: Effect of KS150-600 loading on PP composites through-plane TC

The influence of graphite on the fluidity of resin is evaluated by the torque of the melt mixing operation. The viscosity of the 60% and 70% graphite/PP blends is high (Figs. 7 and 8). Using natural graphite enables a reduction in viscosity of 30% as compared to the addition of synthetic graphite.

Conversely, replacing natural or synthetic graphite with high-aspect-ratio C-THERM™ MAX HD leads to a viscosity increased by 60% above synthetic graphites. This is induced by the high specific surface of the high-aspect-ratio graphite.



Figs. 7 and 8: Torque of the PP containing 60% (left) and 70% (right) graphite

The tensile modulus of the PP/graphite composites at 60% loading is plotted in Fig. 9. A high modulus is reached because of the 60% graphite level. It appears that finer graphites provide

composites with the higher stiffness: KS150-600, with its particles comprised between 150 and 600 μm , has a tensile modulus much lower than KS 75 and KS 5-75 which have 90% of the particles below 90 μm . In the same way, KS 5-75, a grade based on KS75 but without fine particles, provides lower stiffness than the KS 75. The same trend is visible in the natural graphites: M100 having particles below 150 μm is much stiffer than the coarser 20x50, with particles ranging from 300 to 800 μm .

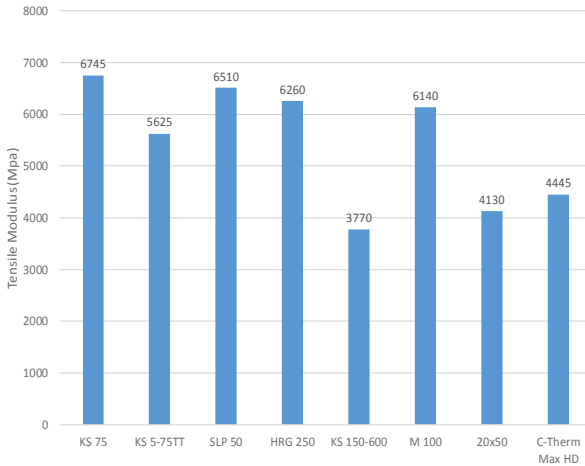


Fig. 9: Tensile modulus of 60% graphite PP compositions.

For tensile strength (Fig. 10), a similar trend is observed: the synthetic graphites, which have finer particle size distribution, i.e. KS 75, KS 5-75, SLP 50 and HRG 50, have a stress at break higher than the coarser KS 150-600 and the natural graphite. The high-aspect-ratio graphite C-THERM™ MAX HD offers a good compromise of stiffness/tensile strength although it is coarse. This might be due to its higher aspect ratio: consequently thinner particles and less stress concentration, which would be in favor of tensile resistance.

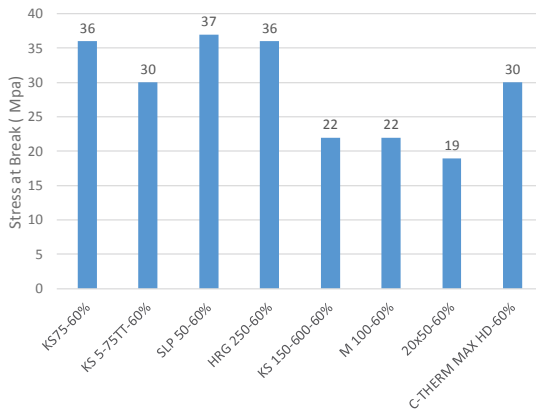


Fig. 10: Tensile stress at break of 60% graphite PP compositions.

3.2 Results for polypropylene with blends of graphites and mineral

The results obtained with pure graphite blends show high through-plane TC values – however they do exhibit relatively high viscosity. For this reason, different compromises of TC and viscosity are studied by partially substituting the graphite by minerals.

Replacing 15% of graphite in a 75% KS 150-600 loaded PP is tested with 8 different additives. The through-plane TC is reduced approximately by half (Fig. 11) when 15% graphite KS150x600 is replaced by the additives. However the compositions containing 60% graphite and 15% mineral still exhibit a TC of around 4 to 4.5 W/m.K – more than double that of the pure 60% KS 150-600 composition. The highest values are obtained with boron nitride and with the HAR talc. The lowest performing blends for TC are made with carbonate and glass fiber.

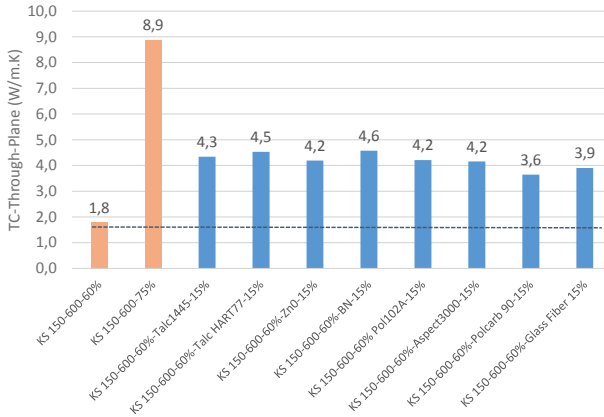


Fig. 11: Through-plane TC of PP composites containing 15% mineral as replacement of graphite

The viscosity of most of the blends with 60% KS150-600 /15% mineral (Fig. 12) is lower than for the pure 75% KS 150-600. It confirms that using mineral blends is a good way of reducing viscosity. However they are still higher than the viscosity of the pure 60% KS 150-600 formulations. The most efficient fillers for viscosity reduction are talc HAR T77 and calcined clay Polarite 102 A having a torque 26 % lower than the 75% graphite composition.

The 60% KS150-600/15% glass fiber blends have however a higher torque than the 75% graphite PP, showing the strong effect of glass fiber on the viscosity of the system. The formulations containing boron nitride and wollastonite also present a higher viscosity than the other mineral fillers.

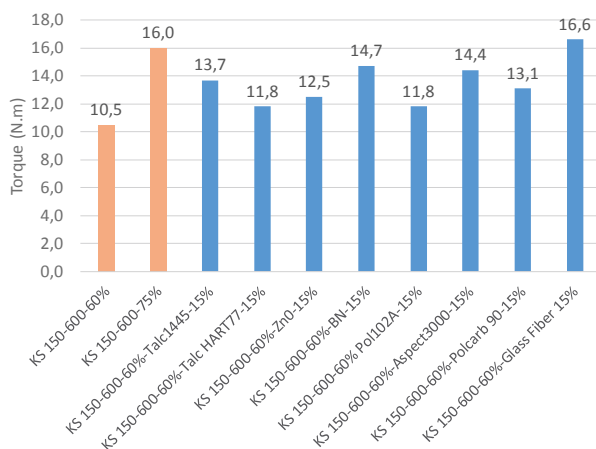


Fig.12: Torque of the 60% graphite /15% mineral PP blends

To evaluate higher mineral additives, the talc loading is increased by up to 35% while keeping the total additive loading at 75% (Figs. 13 and 14). With higher talc loading, the through-plane TC and the torque of the blends decrease. However the torque seems to reach a plateau at 25% talc. The 50 % KS 150-600/25% talc blend has the same viscosity as the 60% KS150-600 formulation and still has 50% higher thermal conductivity, which could be interesting with regard to performance optimization.

If one needs to retain a high through-plane TC, eg 10 W/m.K, it would be necessary to maintain high graphite loading and introduce a level of fillers in the lower range, probably 5-15%.

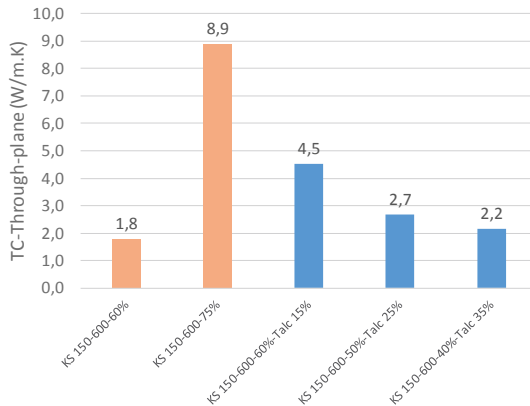


Fig. 13: Through-plane values for graphite PP blends with an increasing HAR T77 talc level

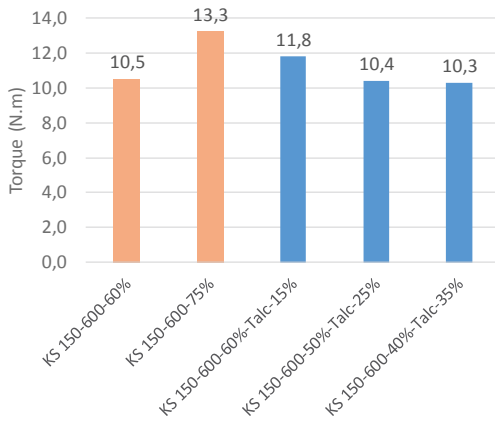


Fig. 14: Torque of graphite PP blends with increasing HAR T77 talc level

4 Conclusions

PP graphite blends are an efficient solution for preparing thermally conductive compounds. New possibilities for the preparation of cost-effective composites were identified, not only by playing with high loading of various graphites but also by the partial addition of minerals. Although the through-plane TC is always lower than the in-plane TC in polymer parts due to polymer and filler anisotropy, the results summarized confirm the possibility of designing

graphite-based PP formulations with a high through-plane TC. High loading of graphites, for example, 70% and above, would be required to reach conductivities above 10 W/m.K. Both synthetic and natural graphite can be used for that purpose. Synthetic graphites outperform the tested natural graphites in mechanical performance, particularly tensile strain at break, and at 70% for through-plane TC. They would also make possible a guaranteed higher purity level. At high loading levels of 70-80%, the ash content of natural graphite (in the 4-5% range) might become problematic depending on the ash composition and lot-to-lot variations linked to the graphite ore. In addition to this, some abrasives in the associated minerals could create issues for the process or final application. For this reason the high purity of synthetic graphite, with a carbon content superior to 99.9%, is mandatory for some applications, such as bipolar plates for fuel cells.

In the case of the natural graphites, which are naturally flaky, high TC levels are obtained in 60% loaded PP, up to 30% higher than with synthetic graphites. Viscosity of the coarse natural graphite PP blends is 30% lower than that of those based on the synthetic graphites, which could offer a wider process-window or the possibility of introducing a higher loading of additives in the formulations. To improve mechanical performance, with regard to both the modulus and strain at break, using the finer grade Timrex M100 is recommended rather than the coarser TIMREX® 20x 50. It is worth mentioning that Imerys has full control of the natural graphite supply chain and is able to supply flake graphite of consistently high quality, which is not so easy to find on the market.

The high-aspect-ratio graphite TIMREX® C-THERM™ MAX HD provides superior through-plane TC, more than double the values of the synthetic graphites and 25% better than the best natural graphites evaluated, i.e. TIMREX® 20x50. This benefit allows the formulators to reduce the amount of carbon-based additive and, if need be, to fine-tune polymer formulations with other mineral additives. It does however induce a higher viscosity, which needs to be tackled.

The partial replacement of graphite by a mineral filler or an additive has been evaluated. In a 75% graphite-based PP, it is possible to replace 15% of the graphite by mineral while keeping the through-plane TC level still double that of the 60% graphite-based PP. The best performing mineral in that regard is the high-aspect-ratio talc HAR T77 and the boron nitride. The replacement of 15% of the graphite by mineral could also be used to reduce the viscosity of the formulations provided the mineral is properly selected. Up to 26% lower torque is measured when 15% high-aspect-ratio talc HART77 or calcined clay Polarite 102A replaces

the graphite. On the other hand, graphite replacement by 15% glass fiber resulted in a higher viscosity, meaning that a careful choice of filler is required if viscosity reduction is desired. Further graphite replacement with higher talc loading leads to viscosity decreasing until a plateau is reached with 25% talc loading. This also leads to lower TC values, although they remain higher than for the 60% graphite PP compositions.

Based on these findings, opportunities have been identified to design graphite/mineral PP based formulations with a high through-plane TC and good processability. Further work is needed to fine-tune their performance.

5 Acknowledgements:

The author would like to give warm thanks to those Imerys Graphite and Carbon R&D colleagues who participated in this study: Guglielmo Fieni, Angelo Guglielmi, Mathilde Socie-Tournou, Pascual Garcia and Raffaele Gilardi.

References

- [1] Gilardi R., Bonacchi D. : Improved carbon-based thermally conductive additives for polymers. High Performance Plastics 2011.
- [2] Novak I., Chodák I.: Electrically and thermally conductive polyethylene/graphite composites and their mechanical properties, Synthetic Metals, Sept. 2004, pp. 245-252
- [3] Krause B., Rzeckowski P., Pötscke P. : Thermal conductivity and electrical resistivity of melt-mixed polypropylene composites containing mixtures of carbon-based filler, Polymers 2019, 11, pp. 1073- 1087
- [4] Bonacchi D.: Effects of graphite selection on thermally conductive compounds for LED heat sinks, ANTEC 2017
- [5] Mighri F, Huneault M., Champagne M. : Electrically conductive thermoplastic blends for injection and compression molding of bipolar plates in the fuel cell application. Polymer Engineering and Science, Vol. 44, No. 9, Sept. 2004, pp. 1755-1765
- [6] Rueda M. M., Fulchiron R., Sonntag P., Cassagnau P.: Rheology and applications of highly filled polymers: A review of current understanding, Progress in Polymer Science, December 2017, pp.22-53



VDI-Berichte 2369

ISBN 978-3-18-092369-7