

ATZ

produktion

03 September 2012 | 5. Jahrgang

 **BASF**
The Chemical Company

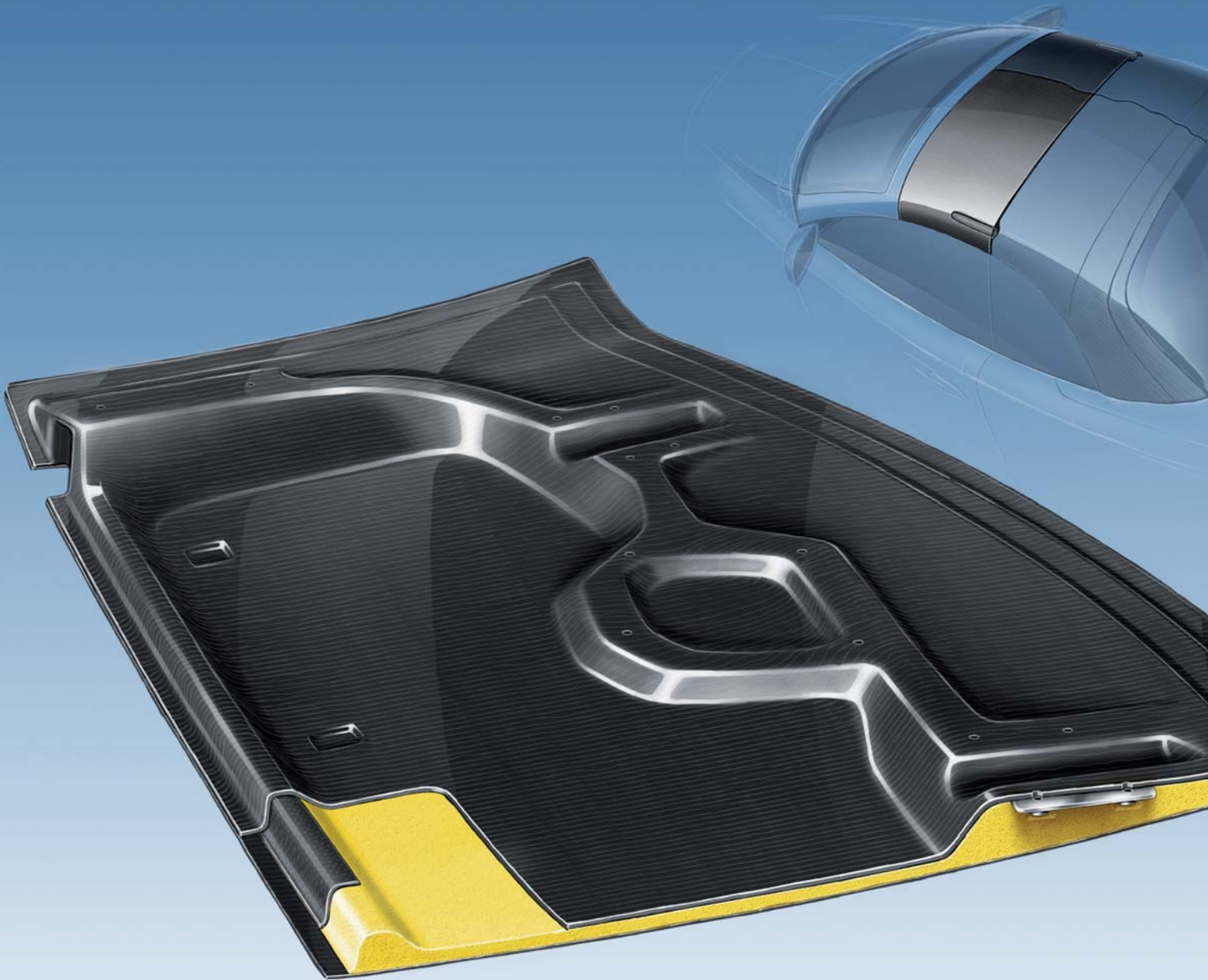
 **EDAG**

Sonderdruck

aus ATZproduktion 03.2012
Springer Vieweg
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH



FASERVERBUNDKONZEPT FÜR EIN CABRIO-DACHMODUL



FASERVERBUNDKONZEPT FÜR EIN CABRIO-DACHMODUL

Ein von Edag und BASF gemeinschaftlich erarbeitetes Cabrio-Dachmodul in Faserverbund-Sandwich-Bauweise zeigt im Vergleich zu metallischen Konzepten ein hohes Leichtbaupotenzial. Der Demonstrator stützt sich dabei auf maßgeschneiderte, aufeinander abgestimmte Werkstoffsysteme sowie serientaugliche Produktionsverfahren bei kurzen Zykluszeiten und somit vertretbaren Kosten.

AUTOREN



DR. CLAUD DALLNER

leitet das bereichsübergreifende Lightweight-Composites-Team der BASF SE in Ludwigshafen.



DR. JAN SANDLER

ist Leiter Forschung für Automobil-Faserverbundwerkstoffe in der Material- und Systemforschung der BASF SE in Ludwigshafen.



DR. MARTIN HILLEBRECHT

leitet das Competence Center Leichtbau, Werkstoffe und Technologie bei der Edag GmbH & Co KGaA in Fulda.



WOLFGANG REUL

leitet die Abteilung Package und Konzepte bei der Edag GmbH & Co KGaA in Fulda.

AUFGABENSTELLUNG

Die Fahrzeugmasse ist in der städtischen Mobilität der Zukunft ein wichtiger Faktor für den Energiebedarf des konventionell oder elektrisch angetriebenen Fahrzeugs. Rollwiderstand und Aerodynamik sind zwar ebenfalls bedeutsam, ihr Einfluss aber wegen der zahlreichen Beschleunigungs- und Bremsmanöver im Fahrbetrieb in der Stadt deutlich zweitrangig.

Der Umsetzungsdruck für neue Leichtbaumaßnahmen, die über den heutigen Stand der Technik hinausgehen, ist auch deshalb so hoch, weil Strafzahlungen auf die Automobilhersteller warten, wenn sie die ambitionierten CO₂-Grenzwerte von morgen nicht erreichen.

Um die Möglichkeiten der Gewichtsreduktion und Funktionsverbesserung mit neuartigen Faserverbundkunststoffen (FVK) greifbar zu machen, haben die Kunststoffexperten der BASF in Zusammenarbeit mit dem Engineering-Unternehmen Edag einen Faserverbund-Sandwich-Demonstrator am Beispiel eines Cabrio-Verdeckmoduls entwickelt. Der Demonstrator zeigt die typischen Merkmale und das Leichtbaupotenzial eines maßgeschneiderten FVK-Bauteils. Er demonstriert, wie sich solche sehr leichten Bauteile für automobiler Anwendungen lastgerecht dimensionieren und in kurzen Prozesszykluszeiten sowie zu vertretbaren Kosten herstellen lassen. Die Faserverbund-Sandwich-Bauweise ist auf normale Dachsysteme in Mischbauweise und andere Automotive- aber auch auf Non-Automotive-Anwendungen übertragbar.

IDEE UND TECHNIKEN

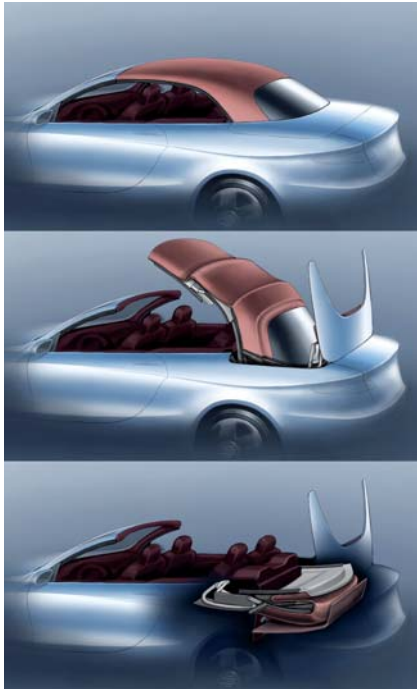
Bei dem geplanten Faserverbund-Demonstrator fiel die Wahl auf ein Cabrio-Dachmodul, da es wegen der relativ moderaten Stückzahl von circa 20.000 pro Jahr einen relativ schnellen Markteintritt verspricht. Die Stückzahlen sind dabei einerseits noch überschaubar aber andererseits schon so großvolumig, dass ohne industrielle und automatisierte Herstellprozesse eine FVK-Technik wirtschaftlich nicht realisierbar wäre.

Ein Cabrio-Dachmodul eignet sich auch deshalb als Demonstrator, da eine Gewichtsverminderung oberhalb des Fahrzeugschwerpunktes positiv auf die Fahrdynamik wirkt. So lässt sich die im Vergleich zu Stahl oder Aluminium kostenintensivere FVK-Leichtbauweise eher zur Umsetzung bringen.

Darüber hinaus machen die Verstärkungs- und Versteifungsmaßnahmen in der Karosserie ein Cabriolet im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug besonders schwer. Das ist ein weiteres Argument für Leichtbau. Auf der anderen Seite könnten die Kunden in diesem ohnehin hochpreisigen Segment die Mehrkosten für aufwendige FVK-Leichtbaumaßnahmen, die diesen Gewichtsnaheile wieder teilweise kompensieren, durchaus akzeptieren, ①.

Allerdings bestehen bei der Umsetzung von neuartigem FVK-Leichtbau in der automobilen Großserienproduktion trotz des hohen Potenzials zur Gewichtseinsparung noch Hemmnisse. Das sind aus heutiger Sicht:

- : die noch relativ hohen Kosten im Verhältnis zum eingesparten Gewicht
- : die fehlende Erfahrung bei OEMs und Zulieferern, die einzelnen Fertigungskompetenzen in der Lieferantenlandschaft erfolgreich zu einer durchgängigen Wertschöpfungskette zusammenzuführen.



1 Das Cabrio-Dach-Konzept „EDroof“ bietet Cabrioherstellern durch die Kombination der Funktionalität eines Retractable-Hardtops (RHT) mit den Design-Merkmalen eines textilen Softtops neue Alleinstellungsmerkmale

Lastfall		Anforderung
Modalanalyse		Abstimmung der Eigenfrequenzen für neutrales Verhalten im Gesamtfahrzeug
Schneelast		Schadenfreie Komponente und Umfeld bei hoher Schneelast auf dem Verdeck
Windlast		Schadenfreie Komponente bei im Fahrtwind stehendem Verdeck ($V_{max} = 50 \text{ km/h}$)
Beulsteifigkeit Hagelschlag		Vermeidung von bleibender Verformung durch Hagelschlag
Beulsteifigkeit Polieren		Vermeidung von erhöhter Durchbiegung und bleibender Verformung durch flächige Last
Mittelblockade		Schadenfreie Komponente bei Fehlfunktion im Schließsystem
Crashlast		Vermeidung von Bauteilversagen durch Rückverlagerung Frontscheibenrahmen im Frontalcrash

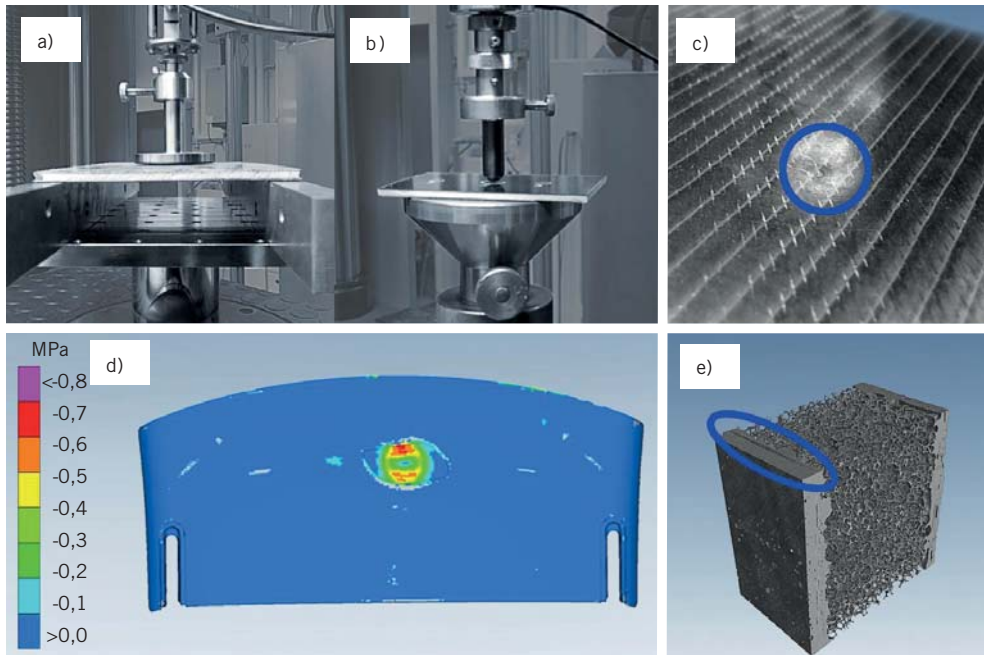
2 Auslegungslastfälle für die zwei Referenzbauweisen und das generische Faserverbundkonzept des Dachmoduls

Während Edag Fahrzeugentwicklungsexpertise in die Kooperation einbrachte, konnte die BASF ihr inzwischen umfangreiches Produktportfolio und Verarbeitungs-Know-how in den drei Werkstoff-




klassen Epoxidharz, Polyurethan und Polyamid beisteuern.

Durch die in der Automobilindustrie angestrebten Kunststoffanwendungen in der Karosserie und im Chassis, die den nächsten

großen Sprung in Sachen Gewichtsreduktion ermöglichen sollen, werden die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Materialien auf ein neues, bisher nicht erreichtes Niveau angehoben. Daher hat das Che-



3 Für die Lastfälle Poliersteifigkeit (a) und Hagelschlag (b) wurden die Stabilität des Sandwich-Bauteils, aber auch die Güte der Oberfläche nach Belastung (c) orientierend untersucht; die Auslegung des Faserverbund-Sandwichs hinsichtlich der Beulsteifigkeit erforderte ein Zusammenspiel zwischen Entwicklung, CAE (d) und dem akkreditierten Prüflabor der Edag; die computertomografische Aufnahme der Probe (e) zeigt Delaminationseffekte des Geleges bei etwa 7,5-facher Überlast

Konzeptvergleich	Referenz A: Stahlbauweise	Referenz B: Aluminiumbauweise	Generisches Konzept: FVK-Sandwich-Bauweise
			
Bauweise	Zweischalig: Innengerippe + Außenhaut	Zweischalig: Innengerippe + Außenhaut	Sandwich aus CFK-Deckschichten und PUR-Schaumkern mit Einlegern
Charakteristische Merkmale	<u>Blechteile Stahl:</u> Außenhaut 0,7 mm Innengerippe 0,8 mm Verstärkungen lokal 1,2 mm – 2,0 mm Anbindungselemente Dichtsystem, Kleber	<u>Blechteile Aluminium:</u> Außenhaut 1,15 mm Innengerippe 1,0 mm Verstärkungen lokal 2,0 mm Anbindungselemente Dichtsystem, Kleber, Verstärkung Beulsteifigkeit	<u>CFK-Aufbau</u> Deckschicht oben + unten 1,4 mm: zwei Lagen unidirektionales Gelege (UD), Orientierung 0°, 90°, +45°, -45°, zus. UD-Streifen an Hinterkante Matrix-System: Epoxy Schaumkern: 80 g/l PUR Einleger Anbindungspunkte Kinematik, Schliess- und Dichtsystem: PA6 GF30, Aluminium
Gewichtvergleich	8298 g	4553 g	2915 g

4 Konzept- und Gewichtvergleich mit charakteristischen Merkmalen für Referenzbauweisen und Faserverbund-Sandwich-Konzept

mieunternehmen Mitte 2011 ein bereichs- und materialübergreifendes Lightweight-Composite-Team gegründet und seine Kompetenzen rund um die drei Kunststoffmatrixsysteme bezüglich großserienfähiger Endlosfaserverstärkung gebündelt. Dies wird im vorgestellten Sandwich-Dachmodul am Beispiel des Resin-Transfer-Molding-Verfahrens (RTM) demonstriert. Bei dieser Methode entstehen große und komplexe Verbundbauteile in einem Harzinjektions-Press-Form-Prozess aus mehrlagigen Faser- oder Textilstrukturen und zunächst sehr niedrigviskosen, dann schnell härtenden Kunststoffen.

BAUTEILKONZEPT UND -AUSLEGUNG

Zunächst entstand durch die Analyse von Benchmark-Informationen ein generisches Referenz-Dachmodul. Aus der Basis konstruktion wurde je eine Variante in Stahl und Aluminium abgeleitet. Mithilfe der zugrunde liegenden Auslegungslastfälle konnte die Referenz in einer CAE-gesteuerten Entwicklung auf minimales Gewicht und Herstellbarkeit dimensioniert und kalibriert werden. Diese Referenz sollte eine heute übliche Bauweise hinsichtlich ihrer technischen Funktionalität, ihres Gewichts und ihrer Herstellkosten herstellerübergreifend abbilden, 2.

Aus einer Vielzahl verschiedenartiger Herstellungsprinzipien und Bauweisen,

die für ein RTM-Verfahren grundsätzlich geeignet sind und die Funktionalität des Bauteils gewährleisten, wurde für das Dachmodul ein One-Shot-Verfahren mit Schaumkern ausgewählt: Imprägnierung der trockenen Carbonfaser-Decklagen mit eingebettetem Schaumkern in einem Prozessschritt.

Unter Berücksichtigung der geometriebestimmenden und funktionellen Merkmale wie der Anbindungspunkte für Kinematik und Schließsystem sowie der Dichtungen ließ sich dann das erste konstruktive Konzept ableiten. In mehreren Entwicklungsschleifen konnte der Lagenaufbau hinsichtlich Funktion und Gewicht verbessert werden. Zudem wurden Aluminiumeinleger integriert, lokal applizierte unidirektionale Verstärkungen eingebracht und die Drapierbarkeit der Gelege abgesichert.

Grundlage für den simulationsgetriebenen Entwicklungsprozess waren eigens erstellte CAE-Materialmodelle, die basierend auf Messungen an Probekörpern aus den verschiedenen Faser-Matrix-Kombinationen ermittelt wurden.

OPTIMIERUNG DES FASERVERBUND-SANDWICHS

Im engen Zusammenspiel zwischen Konstruktion, CAE und akkreditiertem Prüflabor bei Edag wurden die Beanspruchungs- und Missbrauchslastfälle im Rahmen der

Optimierungsschleifen gezielt untersucht und erfüllt. Dazu kamen lokale Anforderungen an den Sandwich-Verbund wie beispielsweise Widerstandsfähigkeit gegen Hagelschlag. Auf diese Weise erhält das Faserverbund-Sandwich eine hohe Bauteil-Gesamtsteifigkeit und größtmögliche Funktionsintegration.

Übertragen auf ein großserientaugliches Verfahren würde dann in diesem Konzept ein vorgeformter Kern, beidseitig mit den gewählten Textilstrukturen bestückt, in ein RTM-Werkzeug eingelegt und in einem One-Shot-Verfahren vollständig imprägniert.

Das resultierende Faserverbund-Sandwich-Dachmodul ist mit einem Gewicht von nur 2,9 kg gegenüber der Aluminium-Referenz über 35 % leichter. Gegenüber einer Stahl-Bauweise können sogar bis zu 65 % Gewicht eingespart werden. Darüber hinaus lässt der Herstellungsprozess deutlich geringere Kosten pro eingespartem Kilogramm erwarten als bei aktuell noch üblichen Faserverbund-Bauweisen, 3, 4 und 5.

Nach der Entwicklung, Dimensionierung und Optimierung erfolgte schließlich die prototypenhafte Fertigung von Form, Schäumling und Einzelbauteilen des Dachmoduls. Den Abschluss machte ein Briefing-Dokument für künftige Hersteller, das alle notwendigen Voruntersuchungen und technische ebenso wie wirtschaftliche Abschätzungen enthält, 6 und 7.

Auslegung Funktionen	Referenz A: Stahlbauweise	Referenz B: Aluminiumbauweise	Generisches Konzept: FVK-Sandwich-Bauweise
<u>Modalanalyse</u>			
1. Biege/1. Torsions-Eigenfrequenz > 35 Hz Spreizung Torsion – Biegung > 5 Hz	59,7 Hz/45,9 Hz 13,8 Hz ✓	59,4 Hz/48,4 Hz 11,0 Hz ✓	70,9 Hz/64,5 Hz 6,4 Hz ✓
<u>Schneeelast</u>			
Keine plastische Deformation Elastische Deformation < 1,5 mm	erfüllt ✓ 0,9 mm	erfüllt ✓ 0,8 mm	erfüllt ✓ 1,5 mm
<u>Windlast</u>			
Keine plastische Deformation	erfüllt ✓	erfüllt ✓	erfüllt ✓
<u>Beulsteifigkeit Hagelschlag</u>			
Max. Versagenskriterium CFK < 1,0 Max. Druck-/Schubspannung Schaum < zul. Keine plastische Deformation (Blech) Max. Verformung < 7,5 mm	– * – * erfüllt ✓ 4,0 mm	– * – * erfüllt ✓ 5,2 mm	0,10 erfüllt – * – * 0,8 mm
<u>Beulsteifigkeit Polieren</u>			
Max. Versagenskriterium CFK < 1,0 Max. Druck-/Schubspannung Schaum < zul. Keine plastische Deformation (Blech) Max. Verformung < 7,5 mm	– * – * erfüllt ✓ 7,6 mm	– * – * erfüllt ✓ 7,0 mm	0,20 erfüllt – * – * 2,5 mm
<u>Mittelblockade</u>			
Keine plastische Deformation	erfüllt ✓	erfüllt ✓	erfüllt ✓
<u>Crashlast</u>			
Kein Versagen	erfüllt ✓	erfüllt ✓	erfüllt ✓

Legende

* Nicht relevantes Kriterium

Symbole

✓ = Ergebnis erreicht Zielwert

● = Ergebnis überschreitet Zielwert geringfügig, aber noch akzeptabel

5 Vergleich der Ergebnisse aller relevanten Auslegungslastfälle für Referenzbauweisen und Faserverbund-Sandwich-Konzept; die Ergebnisse zeigen eine Vergleichbarkeit der Bauteileigenschaften zwischen herkömmlicher und Faserverbund-Sandwich-Bauweise, bei signifikantem Gewichtsvorteil

WERKSTOFFE UND INTEGRIERTE FUNKTIONEN

Neben der mechanischen Leistungsfähigkeit des Faserverbund-Bauteils sind das gute Fließvermögen der Harz-Matrixsysteme (auch bei langen Fließwegen), die Imprägniergüte und die kurze Aushärtezeit der Kunststoffkomponenten bei allen drei Materialgattungen, die für das RTM-Ver-

fahren in Frage kommen, von zentraler Bedeutung. Auch lassen sich Epoxidharz, Polyurethan und Polyamid auf gängigen Hoch- und Niederdruckanlagen verarbeiten.

Im Demonstrator des Dachmoduls sind die Werkstoffe dabei gezielt aufeinander abgestimmte Systemkomponenten der BASF: Die zentrale Schicht der Sandwich-Struktur besteht aus einem geschlossenzelligen PUR-Strukturschaum der Marke

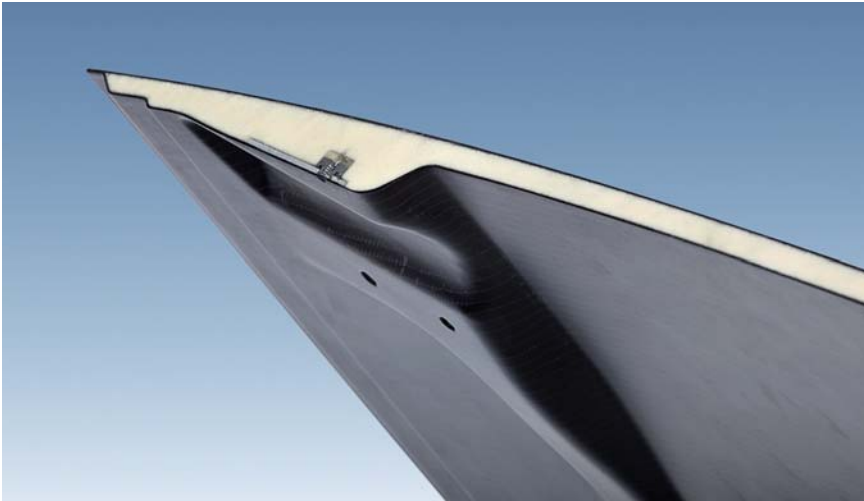
Elastolit D. Er dient bei geringem Raumgewicht als Abstandshalter zwischen den carbonfaserverstärkten Laminatdeckschichten und ermöglicht so die hohe Bauteilsteifigkeit. Darüber hinaus verleiht er dem Dachmodul gute Dämmeigenschaften – ein Aspekt, der für zukünftige Elektrofahrzeuge, die ja nicht mehr auf die Abwärme eines Verbrennungsmotors zurückgreifen können,



6 Polyurethan-Schaumkern mit geringer Dichte und hoher Druckbeständigkeit; das Herstellungskonzept im Sinne eines One-Shot-RTM-Prozesses basiert auf einem urgeformten Schaumkern mit integrierten Einlegern aus Aluminium und kurzfaserverstärkten Kunststoffen



7 Das Dachmodul ist mit nur 2,9 kg deutlich leichter als eine 4,5 kg schwere analoge Aluminiumbauweise; das generische Bauteil beinhaltet alle typischen Merkmale eines Faserverbund-Sandwichs für eine großserientaugliche Produktion im RTM-Verfahren



8 Querschnitt des Demonstrators: von den charakteristischen Merkmalen des neuartigen Faserverbundkonzepts sind hier der Polyurethan-Schaumkern, die imprägnierten CFK-Deckschichten sowie ein metallischer Einleger zu sehen

noch interessant wird. Der PUR-Schaumstoff, der in einem Arbeitsgang im RTM-Werkzeug ummantelt wird, zeichnet sich durch eine hohe Druckfestigkeit und Temperaturbeständigkeit bei niedriger Dichte aus. So lässt sich eine Komprimierung des Schaumkerns während der Injektionsphase vermeiden. Nach außen vor UV-Strahlung und anderen Umwelteinflüssen geschützt ist das Bauteil schließlich durch einen Lack mit dem

BASF-Additiv Tinuvin CarboProtect.

Insgesamt umfasst das Cabrio-Dachmodul die folgenden sechs zentralen Merkmale für die entwickelte Faserverbund-Sandwich-Bauweise:

- : trockene CFK-Gelege mit lastgerecht ausgewählter Faserausrichtung
- : Polyurethan-Schaumkern mit geringer Dichte und hoher Druckbeständigkeit
- : gut fließende und schnellaushärtende RTM-Harzsysteme

- : unidirektionale Verstärkungen
- : metallische Einleger an Kräfteinleitungspunkten
- : Inserts aus kurzfaserverstärkten Kunststoffen.

Der Schnitt beziehungsweise das Prinzipbild des Cabrio-Dachmoduls zeigt einige dieser typischen Merkmale, 8.

ZUSAMMENFASSUNG

Das vorgestellte Beispiel eines Cabrio-Dachmoduls in Faserverbund-Sandwich-Bauweise zeigt im Vergleich zu metallischen Konzepten ein hohes Leichtbaupotenzial.

Der Demonstrator stützt sich dabei auf maßgeschneiderte, aufeinander abgestimmte Werkstoffsysteme von BASF sowie serientaugliche Produktionsverfahren bei kurzen Zykluszeiten und somit vertretbaren Kosten.

Die Faserverbund-Sandwich-Bauweise ermöglicht zudem eine weitere deutliche Reduzierung des Gesamtenergiebedarfs des Fahrzeugs durch eine verbesserte Dämmung des Innenraums gegenüber der Umgebung. Das ist vor allem für Fahrzeuge mit Elektroantrieb von Bedeutung, da der Energiebedarf zur Kühlung und Erwärmung des Innenraums die Reichweiten erheblich verkürzt.



LEICHTBAU DURCH HOCHLEISTUNGS- VERBUNDWERKSTOFFE



The Chemical Company

Automotive Solutions Performance Passion Success

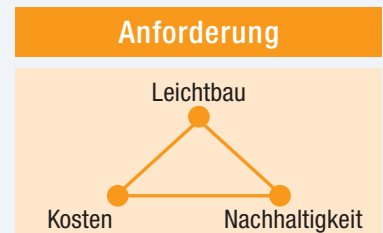
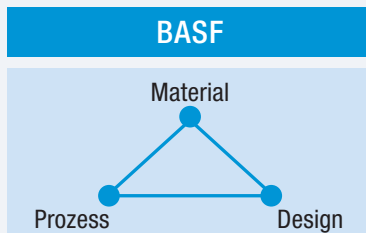
STRUKTURBAUTEILE MIT KONTINUIERLICHER FASERVERSTÄRKUNG



Zukünftige Leichtbaukonzepte

- mehr als 50 % Gewichtsreduktion in Strukturbauteilen
- neue Verarbeitungstechnologien, Matrixwerkstoffe und Fasern
- kontinuierliche Faserverstärkung mit mehr als 50 % Faseranteil
- eingesetzt werden Kohlenstoff- und Glasfasern
- maximaler Leichtbau durch den gezielten Einsatz von Multi-Materialsystemen

HOLISTISCHER LEICHTBAUANSATZ



Kosten- und öko-effizienter Leichtbau durch holistische Innovationen in Werkstoff, Prozess und Design/Simulation

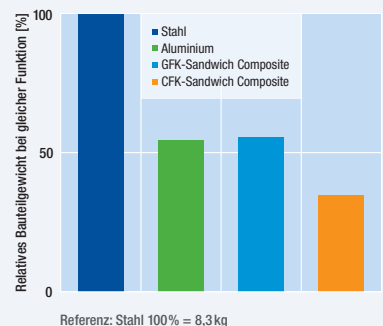
- ausgewählte BASF-Leichtbauwerkstoffe: Polyamid, Polyurethan, Epoxy
- angepasstes verarbeitungsgerechtes Design durch Simulation mit Ultrasim®
- Verarbeitung zu Multi-Materialsystemen

FUNKTIONSINTEGRIERTER LEICHTBAU DURCH BASF-SYSTEMLÖSUNGEN

Konzeptstudie Leichtbau-Sandwich-Dachmodul



- generisches Faserverbund-Sandwich-Konzept mit aufeinander abgestimmten Systemkomponenten der BASF
- Aufbau:
 - ▶ leichter Polyurethan-Schaumkern, Elastolit® D
 - ▶ steife CFK-Deckschicht mit BASF-Matrix
 - ▶ UV-geschützt mit Tinuvin® CarboProtect-Lack



- ▶ Gewichtsreduktion durch CFK-Sandwich über 60% im Vergleich zu Stahl