

# Herstellung und Charakterisierung hochfester Kunststoff-Metall-Hybride

Die Werkstoffe Metall und Kunststoff traten lange Zeit eher im Wettbewerb unter dem Aspekt „Kunststoff substituiert Metall“ auf. Bekannte Ausnahmen bildeten die Insert- und die Outserttechnik. Sie basieren im Wesentlichen auf der Integration von lokal angeordneten Elementen der einen Materialkomponente in zusammenhängenden Strukturen des anderen Werkstoffs.

## Autoren



DR.-ING. LEO HOFFMANN  
ist Projektleiter Kunststoffverarbeitung bei der Neue Materialien Fürth GmbH.



DR. BIRGIT FAIßT  
ist Leiterin des Kundenapplikationszentrums der TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH in Ditzingen.



DR.-ING. KIM KOSE  
ist Senior Experte für FE-Simulation bei der inpro Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH in Berlin.



FRED EGGERS  
ist Entwicklungsingenieur bei der Daimler AG in Hamburg.

Tragende, multifunktionale Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen, die durch das Umspritzen von großflächigen Blechstrukturen mit Kunststoff entstehen, berücksichtigen die beiden Werkstoffe gleichberechtigt und kombinieren ihre werkstofflichen und fertigungstechnischen Vorteile. Das Umspritzen ist gleichzeitig Urform- und Montageprozess. So ermöglichen Hybridstrukturen durch Synergie stärkere Leichtbaueffekte als singuläre Blechstrukturen oder singuläre verrippte Kunststoffstrukturen.

Die Kunststoffstrukturen erhöhen nachweisbar die Leistungsfähigkeit der Metallkonstruktionen, indem sie einwirkende

Kräfte optimal in das Bauteil einleiten und darin verteilen. Die Kunststoff-Metall-Verbindungen weisen aufgrund der hohen Dehnfähigkeit des Kunststoffs eine hohe Arbeitsaufnahme bei Schlagbeanspruchungen auf. So bieten Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen gegenüber vergleichbaren, reinen Metallkonstruktionen auch deutliche Kosten- und Gewichtsvorteile, die umso größer ausfallen, je höher der Grad der Integration von Zusatzfunktionen in das Bauteil ist.

Mittlerweile besitzen realisierte Serienanwendungen einen großen Stellenwert in der Automobilindustrie (Instrumententafelträger, Frontend etc.) und werden seit etwa

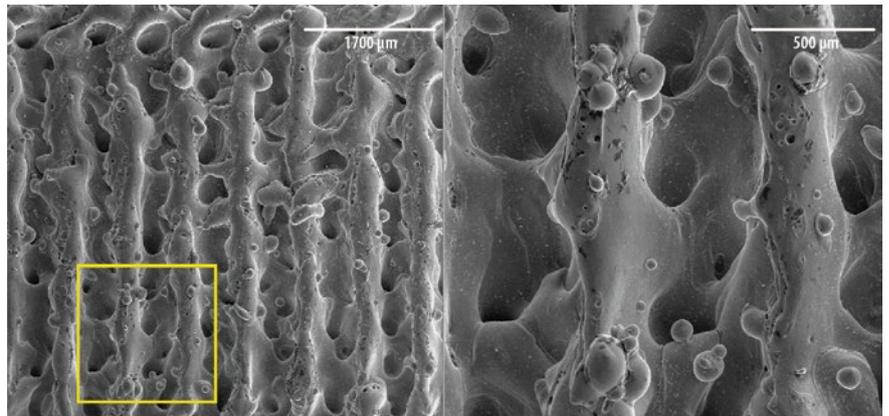
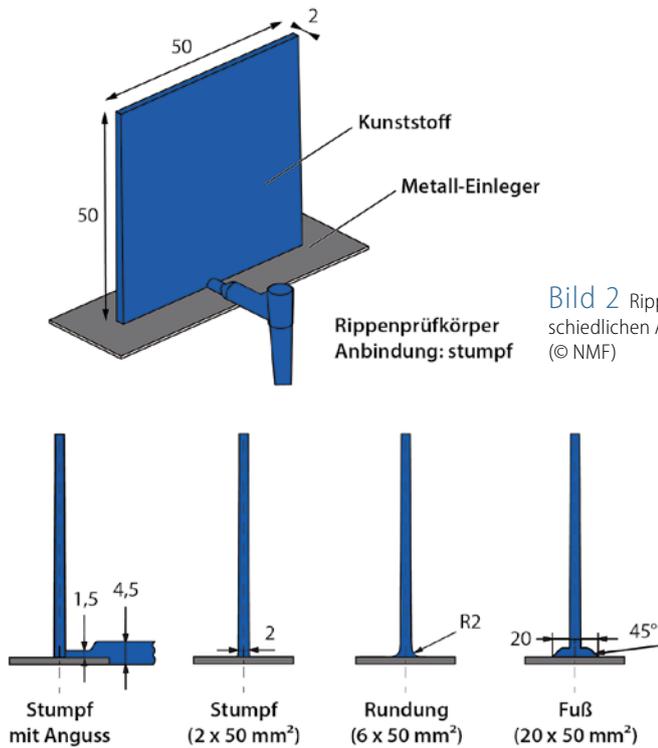


Bild 1 Laserstrukturierte Stahloberfläche (© TRUMPF)



**Bild 2** Rippenprüfkörper mit unterschiedlichen Anbindegeometrien (© NMF)

biniertes Schmelz- und Verdampfungsabtrag gewählt, wie er auch beim Schneiden oder Bohren eingesetzt wird. Der durch den Rückstoßdruck des Dampfes erzeugte Schmelzaustrieb wird hier genutzt, um die Hinterschnidungen zu formen.

Insbesondere bei längeren Laserpulsen mit großem Schmelzaufkommen und großen Intensitäten kann sich ein Teil der zähflüssigen Phase in Form von Tropfen ablösen und aus der Wechselwirkungszone geschleudert werden. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen, dass der Schmelzaustrieb beim Strukturieren mit kurzen Laserpulsen zeitlich verzögert und über einen die Pulslänge um ein Vielfaches überschreitenden Zeitraum erfolgt. Die Pulsdauern beim kombinierten Schmelz- und Verdampfungsabtrag liegen im Bereich von einigen ns bis zu wenigen ms. Um ein Verdampfen des Werkstoffs zu ermöglichen, werden Intensitäten größer als  $100 \text{ W/cm}^2$  benötigt. Die Bearbeitung erfolgte mit den Hochleistungsnanosekundenlasern TruMicro 7050 und TruMicro 7240.

Es konnten auf Stahl mit Flächenraten zwischen  $0,2$  und  $1,25 \text{ cm}^2/\text{s}$  (Geschwindigkeit von  $20,8 \text{ mm/s}$  bei  $6 \text{ mm}$  Strukturbreite) hinterschnittige Strukturen hergestellt werden. Ein Beispiel auf Stahl ist in **Bild 1** gezeigt. Bei Aluminium konnten noch höhere Flächenraten bis zu  $3 \text{ cm}^2/\text{s}$  erzielt werden.

## Charakterisierung hochfester Kunststoff-Metall-Verbunde

Zur Charakterisierung der Kunststoff-Metall-Hybride wurde ein Prüfkörper konzipiert, der die Prüfung von Haftfestigkeiten in einem weiten Festigkeitsbereich und unter verschiedenen Belastungsarten ermöglicht. Dieser sogenannte Rippenprüfkörper besteht aus einem Blech mit den Abmessungen  $40 \times 70 \text{ mm}$ , auf das im Spritzgießprozess eine Kunststoffrippe aufgebracht wird. Dabei kann variiert werden:

- ▶ Dicke des Blechs im Bereich von  $1$  bis  $2 \text{ mm}$
- ▶ Geometrie der Rippe ( $2$  oder  $4 \text{ mm}$  Dicke)
- ▶ Anbindegeometrien der Rippe (Fußgeometrie).

Der Prüfkörper und die Variationen der Fußanbindung sind in **Bild 2** dargestellt.

20 Jahren erfolgreich in Großserien der Automobilindustrie eingesetzt. Den überwiegend derzeit in Serie befindlichen Anwendungen ist gemein, dass der Verbund zwischen Metall und Kunststoff über Formschluss, zum Beispiel Durch- und Umspritzungen an Bohrungen und Sicken, realisiert wird.

## Realisierung hochfester Kunststoff-Metall-Verbunde

Untersuchungen von Zhao [2], die am Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Universität Erlangen-Nürnberg durchgeführt wurden, machen deutlich, welches Potenzial Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen bieten, wenn man einen großflächigen Haftverbund zwischen Kunststoff und Metall realisieren kann. Sowohl die Steifigkeit als auch die Festigkeit werden durch eine Haftverbindung deutlich erhöht. Die Biege- und Torsionsfestigkeit konnte gegenüber konventioneller Bauweise (punktuelle Formschluss über Bohrungen und Sicken) um circa  $45 \%$  erhöht werden. Die Torsionssteifigkeit konnte gar verdoppelt werden. Diese großflächige Haftverbindung verhindert zudem das Ausbeulen der dünnwandigen Metallbleche und die relative Bewegung zwischen Kunststoff- und Metallkomponente. Der Haftverbund wurde bei den Arbeiten von

Zhao durch ein Aufheizen der Bleche bis in den Bereich der Schmelzetemperatur der Kunststoffkomponente erreicht. Der Haftungsverbund versagte allerdings unter Temperatur-Wechselbeanspruchungen.

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Hybridtechnik mit der Zielstellung eines dauerhaften Haftverbunds konzentrieren sich auf die Entwicklung haftungskompatibler Primer-Schichten (Hybrid-Plus [3], HyLight [4]) oder den Ersatz der Metallkomponente durch sogenannte Organobleche, das heißt gewebeverstärkte Thermoplaste [5].

Ansätze zur Haftungsverbesserung über eine Mikrostrukturierung der Metallkomponente wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens ExtraLight systematisch untersucht. Die Strukturierung der Metallkomponente erfolgt dabei mit der Zielstellung, eine hinterschnittige Topologie zu erzeugen. Der Kunststoff dringt während der Verarbeitung in hinterschnittige Bereiche der Metallkomponente ein und verbindet sich mit dieser über einen Mikro-Formschluss.

## Strukturierung der Bleche mittels Laser

Um die notwendigen hinterschnittigen Strukturen zu erzeugen und den Prozess energetisch effizient zu halten, wird ein kom-

Zur Herstellung der Rippenprüfkörper werden die Bleche zunächst auf der festen Werkzeugseite mit mechanischen Klemmen fixiert, bis die bewegliche Werkzeugseite die Fixierung der Bleche über einen gefederten Einsatz beim Schließen des Werkzeugs übernimmt. Die gefederten Einsätze erlauben die Verwendung beliebiger Blechdicken in einem Bereich von 1 bis 2 mm. Das Werkzeug verfügt über 3 Kavitäten. Das variable

Die Erwärmung der Blecheinleger verhindert ein frühzeitiges Einfrieren der Kunststoffschmelze und begünstigt die Füllung der Hinterschnitte mit der Kunststoffmatrix. Da die hinterschnittigen Strukturen mit einigen Zehntel Millimetern relativ groß sind, können auch Fasern von faserverstärkten Kunststoffen in die Hinterschnitte eindringen, Bild 4.

Zur Charakterisierung der Stirnabzugs- und Scherfestigkeit werden Blech und Kunst-

Vorwärmung der Bleche profitieren als Al-Bleche. Dies lässt sich unter anderem durch die bessere, das heißt stärker hinterschnittige Strukturierbarkeit der Al-Bleche erklären.

Des Weiteren wurden die so ermittelten Versagensspannungen unter den getrennt eingebrachten Belastungsrichtungen als Grundlage für die Simulation komplexer Geometrien verwendet.

## Sowohl die Steifigkeit als auch die Festigkeit werden durch eine Haftverbindung deutlich erhöht.

Angussystem erlaubt die gleichzeitige oder die serielle Füllung der Kavitäten, sodass der Einfluss unterschiedlicher Fließbedingungen evaluiert werden kann.

Die mittlere Blecheinlegestation kann über eine im Werkzeug befindliche Spule induktiv erwärmt werden. Die induktive Erwärmung erfolgt innerhalb weniger Sekunden auf die gewünschte Temperatur, die auch während der Einspritz- und Nachdruckphase aufrechterhalten werden kann. Die Abweichung der Temperatur von der eingestellten Solltemperatur beträgt im Bereich der Anbindung nur wenige Kelvin, Bild 3.

stoffrippe in den entsprechenden Prüfvorrichtungen mit definiertem Anzugsmoment eingespannt und mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min relativ zueinander bis zum Versagen bewegt. Die Prüfungen wurden bei -40 °C, Raumtemperatur und bei 80 °C (PP) beziehungsweise 90/100 °C durchgeführt.

Die Ergebnisse erlauben in erster Linie den Vergleich verschiedener Materialpaarungen unter verschiedenen Verarbeitungsbedingungen. In Bild 5 ist der Einfluss der Blechvorwärmung für Einlegebleche aus Stahl, Aluminium und Magnesium dargestellt. Es zeigt sich, dass Mg- und St-Bleche stärker von einer

## Demonstrator „Berliner Träger“

In realen Bauteilen wirken an den Verbindungsstellen zwischen Metall und Kunststoff komplexe mehrachsige Spannungszustände. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde mit dem sogenannten „Berliner Träger“ ein Prüfbauteil entwickelt, das im Vergleich zum Rippenprüfkörper über eine komplexe Geometrie verfügt, sich aber dennoch mit vergleichsweise einfachen Mitteln auf Biegung und Torsion prüfen lässt.

Der Berliner Träger baut auf den Erfahrungen der weithin verbreiteten Trägerstrukturen (zum Beispiel „Erlanger Träger“) auf, hat aber ein einzigartiges Gestaltungsmerkmal: Nur die Wangen bestehen aus Metall, sodass

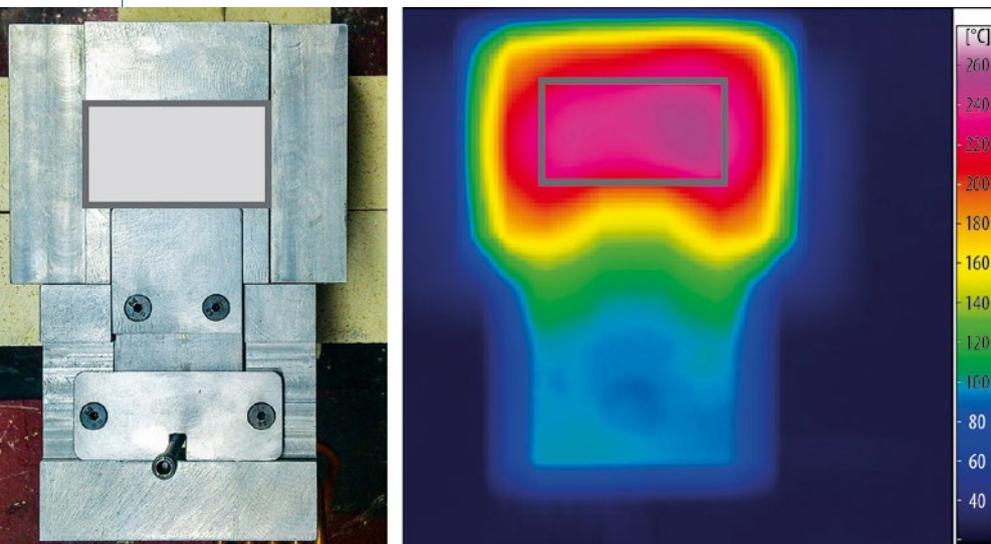


Bild 3 Temperaturverteilung in der mittleren Kavität bei Erwärmung mittels Induktion (© NMF)

## ExtraLight

Das Forschungsvorhaben „ExtraLight“ zum Thema „Multimaterialsysteme – Zukünftige Leichtbauweisen für ressourcensparende Mobilität“ wurde innerhalb des Rahmenprogramms „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft – WING“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projekträger VDI betreut, Förderkennzeichen 03X3037. Beteiligte Unternehmen waren Albis Plastic GmbH, Allod Werkstoff GmbH & Co. KG, Audi AG, BASF SE, Daimler AG, inpro Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH, Neue Materialien Fürth GmbH, SABIC Innovative Plastics, Technische Universität Berlin, thyssenkrupp Steel Europe AG, TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH und die Volkswagen AG.

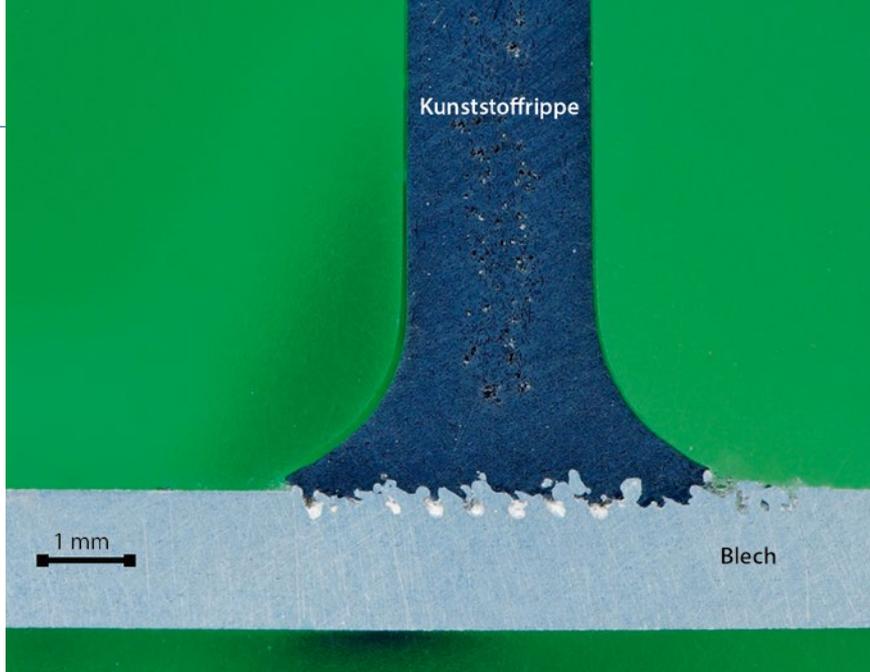


Bild 4 Querschliff durch einen Rippenprüfkörper (PA6-GF30/Aluminium, grobe Strukturierung) (© NMF)

der Verbund des Bauteils ausschließlich über die angespritzte Kunststoffkomponente hergestellt wird. Die Übertragung der Kräfte zwischen Metall und Kunststoffkomponente erfolgt dabei nur über Haftschluss oder Mikroformschluss, es existieren keinerlei Durchspritzungen oder Umspritzungen der Metallkomponente, Bild 6.

Das Werkzeug verfügt über einen Dreifach-Heißkanal. Die Anspritzpunkte können einzeln oder in Kombination verwendet werden, sodass der Einfluss verschiedener Füllszenarien auf die Verbundfestigkeit getestet werden kann. Es werden offene Düsen verwendet, um die Schädigung der Fasern bei langfaserverstärkten Kunststoffen möglichst gering zu halten. Wie bei dem Rippenwerkzeug können die eingelegten Bleche optional über eine werkzeugintegrierte Induktionsheizung auf die gewünschte Temperatur eingestellt werden.

### Prüfungen am „Berliner Träger“

Die Prüfungen am Berliner Träger erfolgten durchgehend bei Raumtemperatur. In einer ersten Torsions-Versuchsreihe konnte gezeigt werden, dass der Verbund zwischen Polymerkern und Außenblechen entscheidend für die Gesamtsteifigkeit des Bauteils ist. In Bild 7 sind der Aufbau und die Einspannung im Torsionstest zu sehen. Der Schwerpunkt bei der Entwicklung der Einspannung lag auf der möglichst spannungsfreien Einspannung im makroskopisch deformationsfreien Zustand. Deshalb wurde eine in sich starre Konstruktion gewählt, in die der Träger sozusagen hineinfallen kann, Schubverzerrungen an den Enden werden dadurch unterbunden. In Bild 8 sind die Ergebnisse der Torsionstests an den verschiedenen Komponenten und den vollständigen Berliner Trägern im Vergleich dargestellt. Der Kunststoff ist hierbei ein LNP VERTON RV00AESP (PA66LGF50) von SABIC, im Folgenden kurz Verton, das Aluminium ein AlMg3, 3.3535 mit 1 mm Blechdicke.

Zu sehen ist, dass die Bleche für sich allein nur eine sehr geringe Torsionssteifigkeit besitzen, ebenso ist der Polymerkern sehr torsionsweich, wenn auch auf höherem Niveau. Werden beide Komponenten gemeinsam tordiert,

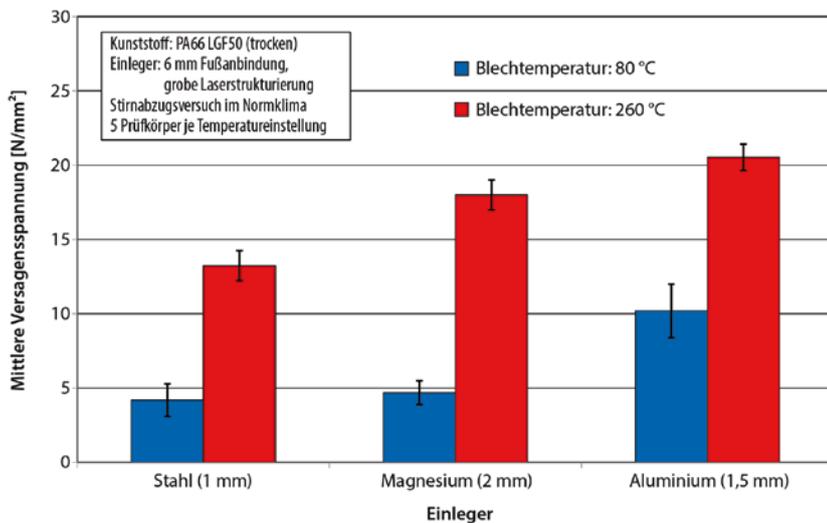


Bild 5 Einfluss der Blechvorwärmung bei St, Mg, Al (© NMF)

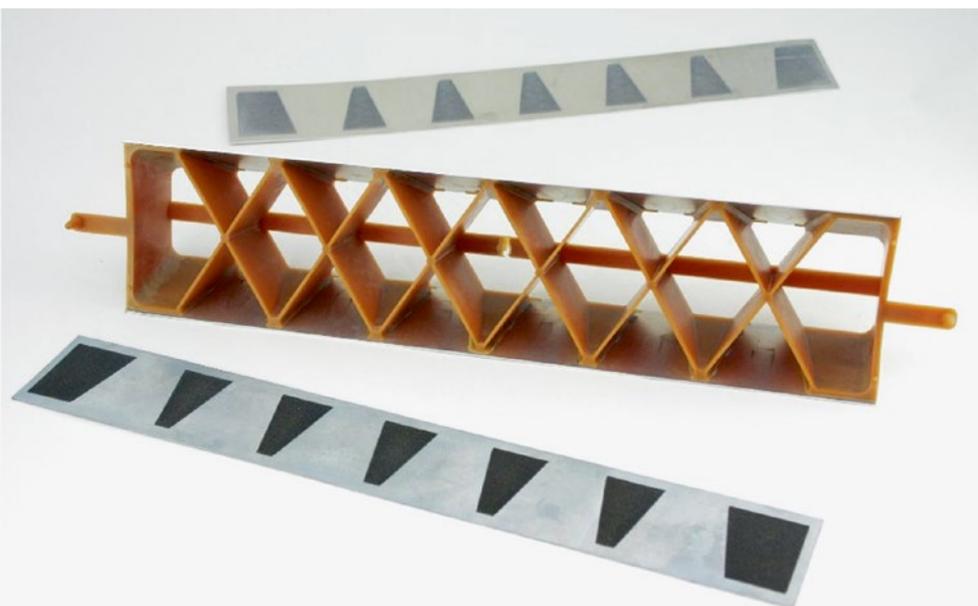
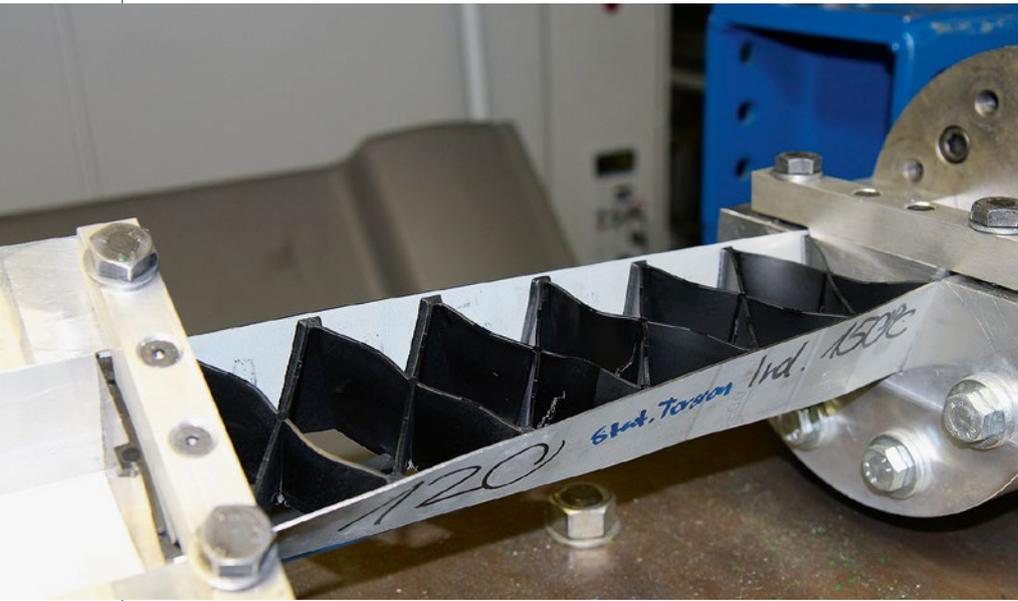
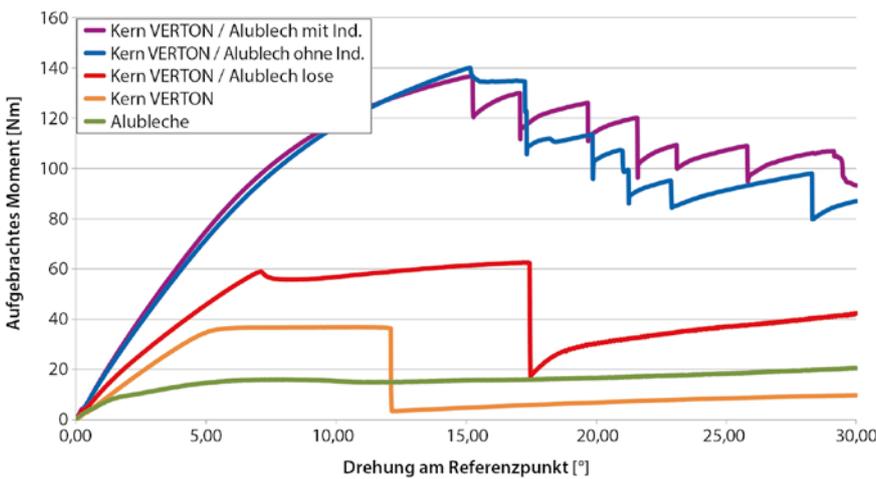


Bild 6 Laserstrukturierte Bleche und Probekörper „Berliner Träger“ (© NMF)



**Bild 7** Aufbau des Torsionstests des Berliner Trägers, deutlich ist das Versagen der Rippenstruktur zu erkennen (© inpro)



**Bild 8** Torsionsergebnisse der einzelnen Bestandteile und des gesamten Berliner Trägers (© inpro)

allerdings ohne, dass ein Verbund existiert, dann ergeben sich im wesentlichen addierte Torsionssteifigkeiten, wobei es bei größeren Torsionswinkeln durch die gegenseitigen Behinderungen der Deformation durchaus zu einem anderen Verlauf kommt.

Wird nun ein Verbund zwischen Polymer und Metall erzeugt, dann ergeben sich völlig andere Kurvenverläufe, die Torsionssteifigkeit ist wesentlich höher und das erste Versagen tritt bei einem größerem Torsionswinkel auf, wobei sich auch auf Videoaufnahmen nicht unterscheiden lässt, ob dies durch Beulen im Metall, durch Ablösungen von Kunststoff vom Metall oder Risse im Kunststoff entsteht. Die verbleibende Restfestigkeit ist auch bei einem großen Torsionswinkel

höher als die der ungeschädigten, nicht verbundenen Einzelkomponenten.

Für die Biegeversuche am Berliner Träger wurde eine Vierpunktbiegung durchgeführt,

ten Kontakt zwischen Stempel und Berliner Träger. Sowohl die drehbaren Auflager als auch Stempel wirken jeweils auf das Polymer, um etwaige Schälereffekte zu vermeiden. Bei diesen Versuchen war die freie Länge zwischen den Auflagern 250 mm, bei einer Gesamtlänge von 350 mm des Trägers.

Am deformierten Träger in Bild 9 ist zu erkennen, dass auch hier der Verbund zwischen Metall und Kunststoff intakt geblieben ist. Das Metall hat sich sehr stark verformt, im Polymer kommt es an der Unterseite zu Brüchen, da dort das Dehnungsvermögen überschritten wird. Nach Erreichen der Lastspitze (erstes Beulen des Metalls) kommt es zu einem Abfall der aufgebracht Kraft. Nachfolgende stärkere Abfälle werden sowohl durch weiteres Beulen als auch durch Brüche im Polymer verursacht.

### Anwendungen in Erprobung, Übertragung auf Demonstrator Cockpitquerträger

Die Anwendbarkeit der ExtraLight-Technologie wurde an einem aktuellen Hybridbauteil der MFA1-Plattform untersucht und mit dem Serienstand verglichen. Bei dem Bauteil handelt es sich um einen Cockpitquerträger in Kunststoff-Metall-Hybridbauweise (PA-GF60/Al), Bild 10. Die stoffschlüssige Anbindung zwischen Kunststoff und Metall erfolgt bei dem Serienprozess mit einem Copolyamid-Schmelzklebstoff (Vestamelt).

Notwendige Voraussetzung für den Einsatz der ExtraLight-Technologie im Serieneinsatz war, dass der Strukturierungsprozess voll automatisierbar ist, in den Spritzgießprozess integriert werden kann und sich die Zykluszeit dadurch nicht verlängert.

## Ansätze zur Haftungsverbesserung über eine Mikrostrukturierung der Metallkomponente wurden systematisch untersucht.

indem der Stempel durch einen Quader realisiert wurde. Direkt nach Aufbringen der ersten Last mit der ersten nachfolgenden Deformation besteht nur noch an den beiden Kan-

Zur Untersuchung der Festigkeiten wurden die Querträger bei der Firma TRUMPF an zwei Anbindepositionen (GEO2, GEO3), Bild 10, mittels Laser strukturiert und

anschließend in den Serienfertigungsprozess eingeschleust. Bei der Strukturierung wurden zwei verschiedene Strukturierungen aufgebracht, die sich im Wesentlichen durch ihre Hauptorientierungsrichtungen (längs, quer) unterscheiden. Ein Teil der hergestellten Querträger wurde thermischen und mechanischen Wechselbelastungen unterworfen.

Die thermische Alterung bestand aus einer Schnellkonditionierung nach DIN ISO1110 und zehn Temperaturwechselzyklen mit je zwei Stunden bei RT, -30°C und 100°C. Der Temperaturwechsel erfolgte mit 1 K/min. Die so behandelten Querträger werden mit „ALT“ bezeichnet. Die Anbindeflächen der Position GEO3 wurden zusätzlich einem mechanischen Dauertest unterzogen. Diese bestand aus einer Torsionswechselbelastung

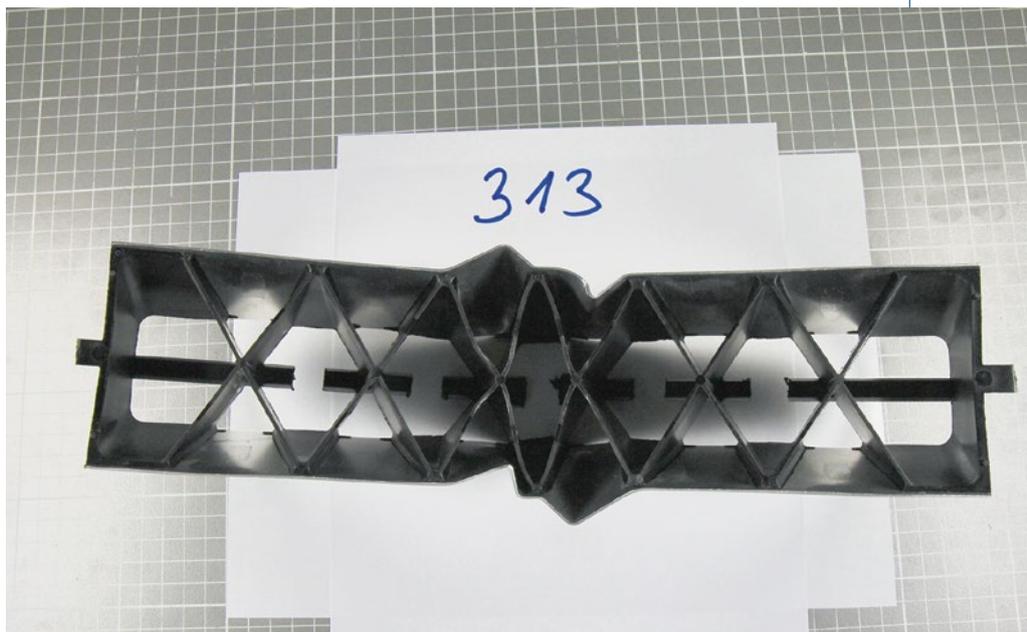


Bild 9 Berliner Träger nach Biegetest: Deutlich sind die gefalteten Außenbleche zu sehen; der Kunststoff folgt so, dass der Verbund erhalten bleibt (© inpro)

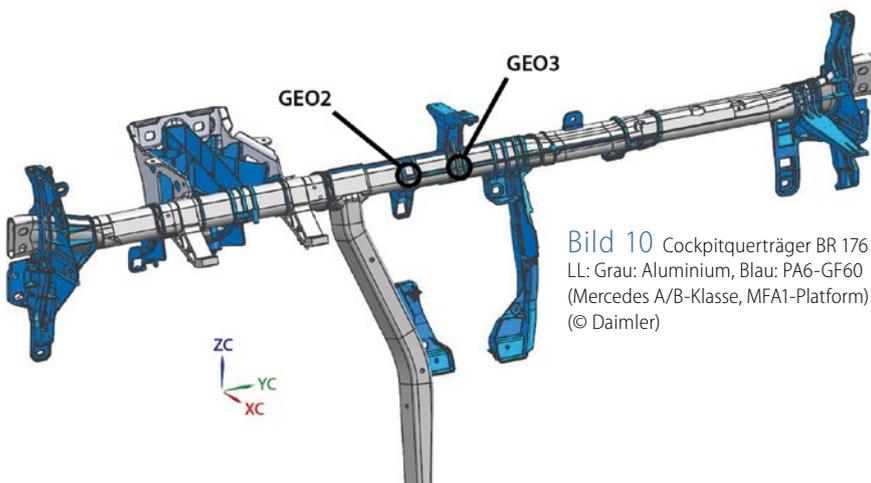


Bild 10 Cockpitquerträger BR 176  
LL: Grau: Aluminium, Blau: PA6-GF60  
(Mercedes A/B-Klasse, MFA1-Plattform)  
(© Daimler)

von -18 bis 6 Nm über eine Schwingspielzahl von 380.000 Zyklen bei einer Frequenz von 2,8 Hz (Bezeichnung „belastet“).

Zur Charakterisierung der mechanischen Festigkeiten wurden an den entsprechenden Positionen GEO2 und GEO3 Rohrsegmente herausgesägt und die Kunststoffteile in Rohrrichtung mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min abgeschert. Bild 11 zeigt die Ergebnisse der Scherprüfung. Alle Prüflinge erreichen die geforderte Mindestfestigkeit von 10 N/mm<sup>2</sup>. Die Strukturierungsrichtung übt einen deutlichen Einfluss auf die ermittelten Festigkeiten aus. Thermische und mechanische Belastungen führten im betrachteten Rahmen zu keinem Abfall der Festigkeiten. ◀

## Literaturhinweise

- [1] Hoffmann, L; Zhao, G.; Ehrenstein, G.W.: Leichtbauteile in Kunststoff-Metall-Hybridtechnik. Symposium Metalle und Kunststoffe – Verbindungen für die Zukunft, Fürth 2002
- [2] Zhao, G.: Spritzgegossene, tragende Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen, Konstruktion, Prozessanalyse und Charakterisierung. Dissertation, technisch-wissenschaftlicher Bericht, Erlangen 2002
- [3] Michel, P.; Riepenhausen, H.: Neuartiger Metall-Kunststoffverbund als Struktur-Leichtbauelement am Beispiel Heckklappe. Kunststoffe im Automobilbau, Mannheim 2008, VDI Kunststofftechnik
- [4] Drummer, D. (Hrsg.): Handbuch Kunststoff-Metall-Hybridtechnik. Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Erlangen 2015
- [5] Hoffmann, L.; Linn, C.; Drummer, D.; Gröschel, C.: Hochleistungsfaserverbundbauteile aus der Spritzgießmaschine – Ein Verfahrensbaukasten für innovative Bauteilentwicklungen. Kunststoffe im Automobilbau, Mannheim 2014, VDI Kunststofftechnik

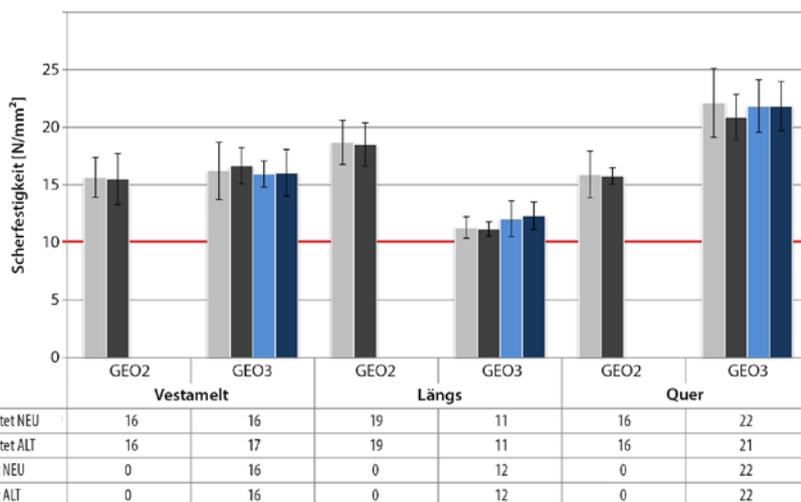


Bild 11 Scherfestigkeiten unterschiedlich strukturierter Alu-Rohre im Vergleich zum Serienstand „Vestamelt“ an den Positionen GEO2 und GEO3 (© Daimler)