

Iterationsschritte bis zum finalen Produkt: Designraum (1), FEM-Analyse (2), optimiertes Bauteil (3), Bauteil mit gewickelten Endlosfaserverstärkungen (4), reales Spritzgussteil mit Verstärkungsstrukturen und metallischen Kräfteinleitungspunkten (5) (Bild: Fraunhofer ICT)

**Multi-Material-Design.**

Zunehmende Anforderungen an Leichtbaulösungen sind meist durch reine Materialsubstitution nicht mehr zu bewältigen.

Ganzheitliche Betrachtungsweisen und die ge-

zielte Kombination der Vorzüge unterschiedlicher Materialien sind der Schlüssel zu effizienten Leichtbauweisen.

# Ressourceneffizienter Leichtbau für die Großserie

**ALEXANDER ROCH  
TIMO HUBER U. A.**

Steigende Rohstoffpreise, die Forderung nach immer geringeren Bauteilgewichten und der Kostendruck aus Fernost oder anderen Niedriglohnländern erfordern innovative Leichtbaulösungen, um Bauteile in integrierten Prozessen wirtschaftlich und in großer Stückzahl herstellen zu können. Dieser Artikel zeigt am Beispiel der lokalen Endlosfaserverstärkung das Potenzial hybrider Leichtbauweisen auf und stellt ein

**ARTIKEL ALS PDF** unter [www.kunststoffe.de](http://www.kunststoffe.de)  
Dokumenten-Nummer KU110840

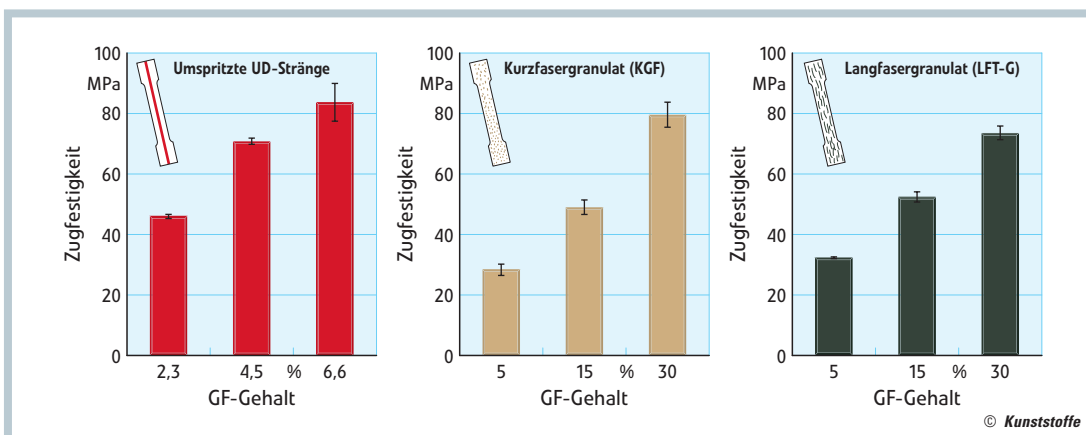
neues, großserienfähiges Tapelegeverfahren vor.

**Lokale Endlosfaserverstärkung:  
Tailored Injection Molding**

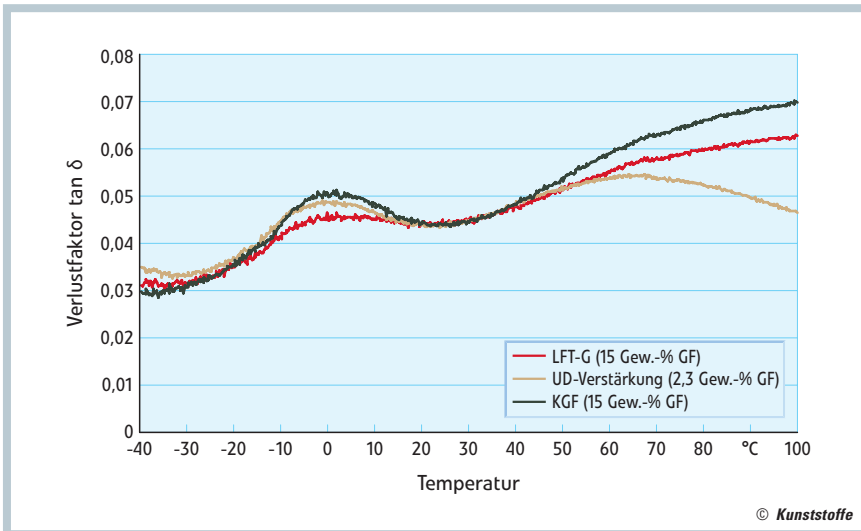
Rechnergestützte Analysen können Bauteile, deren Belastungsart und Designraum bekannt sind, in belastete und weniger belastete Bereiche unterteilen. Dadurch lassen sich im Bauteil sogenannte Kraftflusslinien ermitteln, die modellhaft den Verlauf der Kraftübertragung darstellen. Werden Endlosfaserstrukturen entlang dieser Linien zwischen den Kräfteinleitungspunkten eingebracht, entstehen hoch belastbare Hybridbauteile mit ho-

hen gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften [1]. Essenziell wichtig dabei sind die lastorientierte Ausrichtung und eine möglichst direkte Einleitung der äußeren Lasten in die Verstärkungsfasern. Diese werden nur an solchen Stellen im Bauteil angeordnet, wo sie erforderlich sind („Tailoring“, gezielte Bauteilverstärkung).

Am besten lässt sich das Potenzial der endlosen lokalen Faserverstärkung am Beispiel einer einfachen Zugstabgeometrie verdeutlichen: In Grundlagenuntersuchungen am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT), Pfanzeltal, wurden unidirektionale Glasfasereinleger (UD-Stränge) durch einen Pultrusions-



**Bild 1. Zugprüfkörper (PP-GF) mit UD-Verstärkung erreichen eine hohe Zugfestigkeit mit geringerem Fasergehalt als im Falle einer Kurzglasfaserverstärkung (KGF) oder Langglasfaserverstärkung (LFT-G)** (Quelle: Fraunhofer ICT, [5])



**Bild 2. Ergebnisse der dynamisch-mechanischen Analyse (DMA) von Zugprüfkörpern (PP-GF): Bei Temperaturen über 60 °C kommen die Vorteile der UD-Verstärkung gegenüber KGF bzw. LFT-G besonders zum Tragen** (Quelle: Fraunhofer ICT, [5])

ab Temperaturen von ca. 60 °C die Eigenschaftsvorteile der UD-Verstärkung gegenüber KGF bzw. LFT-G zum Tragen kommen (Bild 2) [3-5].

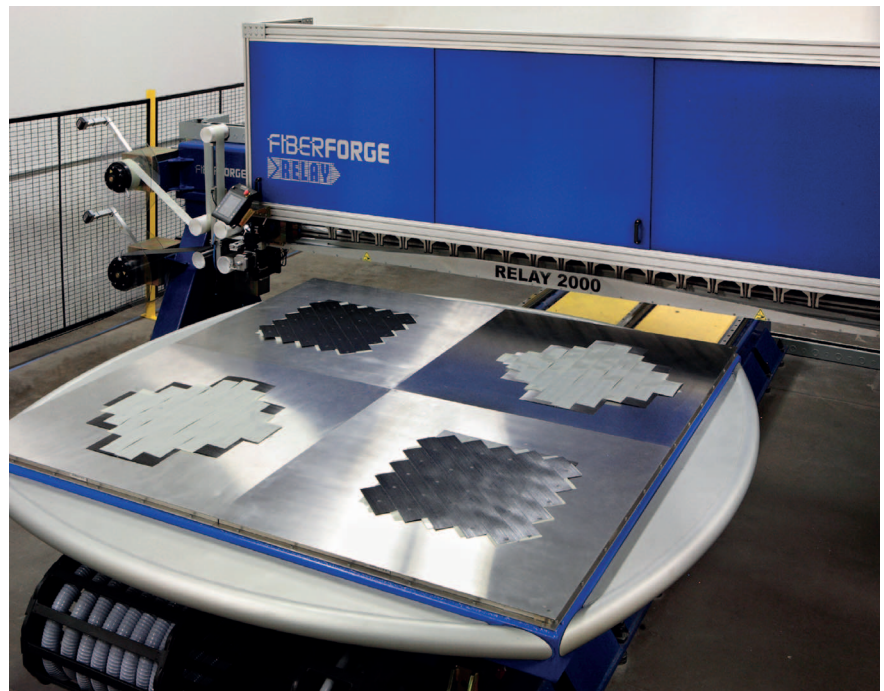
### Instrumententafel-Querträger als Beispiel für das thermoplastische Tapelegen

Eine Möglichkeit zur lokalen Verstärkung thermoplastischer Strukturbauteile stellt das Tapelegen vorimprägnierter UD-Bänder dar. Für Großserienanwendungen sind zwei wesentliche Voraussetzungen zu erfüllen, damit dieses Verfahren wirtschaftlich eingesetzt werden kann: eine automatisierte Ablegeprozedur sowie ein ausreichend hoher Materialdurchsatz. Das von der Fiberforge Corp., Glenwood Springs, Colorado/USA, entwickelte Relay-Verfahren erfüllt diese beiden Bedingungen.

prozess aus Hybridrovings (PP-GF60) hergestellt und anschließend mit unverstärktem Polypropylen umspritzt. Dabei wurden Zugprüfkörper axial mit einem, zwei und drei UD-Strängen verstärkt und mit Referenzprüfkörpern der gleichen Zugstabgeometrie mit Kurz- (KGF) und Langglasfasergranulat (LFT-G) und unterschiedlichen Glasfaseranteilen verglichen [2]. So lassen sich durch gerichtete Endlosfasern bei einem Glasfaseranteil von lediglich 6,6 Gew.-% (drei UD-Stränge) Zugfestigkeiten erreichen, für die etwa 30 Gew.-% KGF oder LFT-G notwendig wären (Bild 1).

Bei Verwendung von Kurz- oder Langfasergranulaten werden alle Zonen eines Bauteils gleichermaßen durch Fasern verstärkt. Durch die höhere Dichte der Fasern gegenüber der Matrix erhöht sich das Gesamtgewicht des Bauteils, da auch weniger oder teilweise unbelastete Bauteilbereiche mit Fasern verstärkt werden.

Im Vergleich zu rein kurz- oder langfaserverstärkten Kunststoffen zeichnen sich Endlosfaserverstärkungen außerdem durch eine geringere Kriechneigung sowie eine höhere Wärmeformbeständigkeit aus. Dies verdeutlicht u. a. die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften bei dynamischer Belastung (dynamisch-mechanische Analyse, DMA). Der

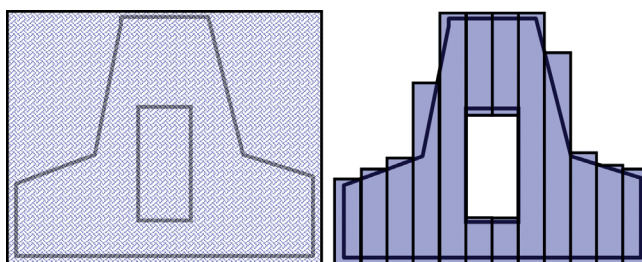


**Bild 3. Mit der thermoplastischen Tapelegeanlage „Relay 2000“ können UD-Tapes mit beliebiger Orientierung und unterschiedlicher Lagenanzahl abgelegt werden** (Foto: Fiberforge Corp.)

mechanische Verlustfaktor  $\tan \delta$ , der das Verhältnis zwischen Verlust- und Speichermodul bei einer zyklischen Belastung darstellt, lässt erkennen, dass besonders

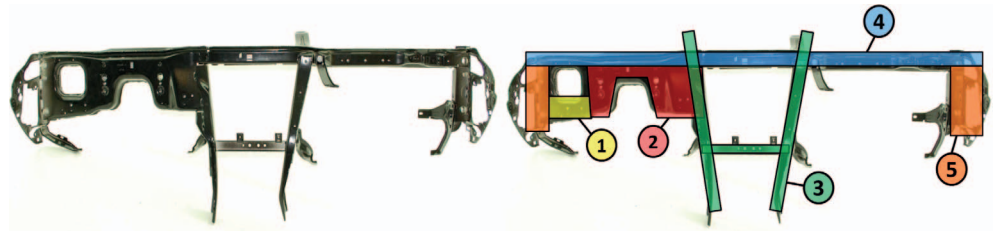
Die vorimprägnierten UD-Tapes werden auf einem verfahrbaren Tisch schichtweise zu einem Gelege angeordnet. Dabei kann die Orientierung der Tapes (und somit der Fasern) nahezu stufenlos über die Rotation des Tisches eingestellt und an den jeweiligen Belastungsfall angepasst werden. Um die weiterführende Handhabbarkeit der Gelege sicherzustellen, werden die Einzelschichten zudem durch Ultraschallschweißen punktuell miteinander verbunden. Zukünftig können am Fraunhofer ICT mit einer weltweit einzigartigen Anlage dieses Typs Gelege

**Bild 4. Die Verwendung von Tape-Gelegen (rechts) reduziert den Verschnitt im Vergleich zu Gewebhalbbeugen (links) auf ein Minimum** (Bild: Fraunhofer ICT)



**Bild 5. Anwendung der lokalen Endlosfaserverstärkung am Beispiel eines Instrumententafel-Querträgers: Die Gelegeaufbauten können in allen Teilbereichen (siehe Text) individuell an die Belastungen angepasst werden**

(Bild: A2Mac1 / Peguform GmbH)



mit einer Größe von bis zu 2 m × 2 m hergestellt werden (Bild 3).

Zu den Vorzügen dieses Verfahrens zählen:

- die schnelle, positionsgenaue Tape-Abgabe mit beliebiger Orientierung,
- die Möglichkeit zur Variation der Wanddicke,
- die Minimierung der Produktionsabfälle und
- die Herstellung hybrider Gelege.

Insbesondere der minimierte Verschnitt ist dabei ein grundlegender Vorteil gegenüber Gewebhalbzügen (Bild 4).

Bei der Verarbeitung reiner Gelege beschränkt der hohe Fasergehalt unidirektionaler Tapes (ca. 40 bis 60 Vol.-%) die Umformbarkeit und Fließfähigkeit. Komplexe Geometrien (z. B. Rippen) zu verwirklichen, mehrere Funktionen

Strukturen von Vorteil. Darüber hinaus können die Gelegeaufbauten in allen Teilbereichen (1 bis 5) individuell an die Belastungen angepasst werden. Hoch belastete Bereiche sind durch die lokale Verwendung von Kohlenstofffasern anstelle von Glasfasern (2, 4) oder durch Stapelung mehrerer Tapes möglich (variierende Wanddicken; 1, 5). Bereiche mit niedriger Belastung, komplexe Strukturen (3) oder die Einbindung metallischer Einleger (5) können beispielsweise im Spritzgießprozess dargestellt werden.

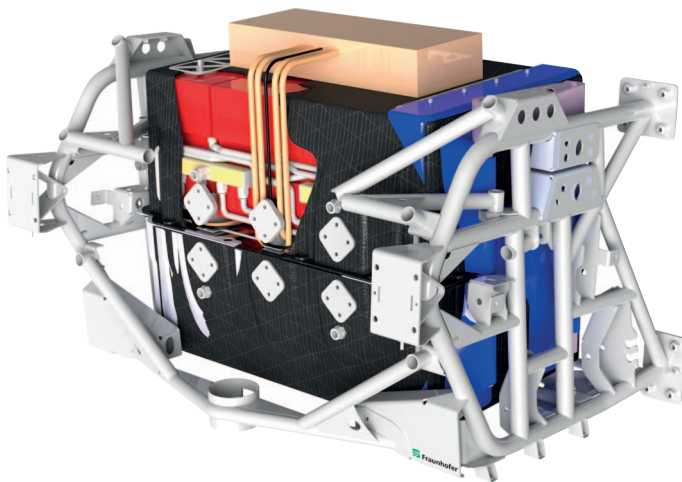
### Batterieschutzgehäuse im Multi-Material-Design

Im Gemeinschaftsprojekt Systemforschung Elektromobilität (FSEM) der Fraunhofer Gesellschaft haben unter-

struktur) als Hybridbauteil zu fertigen, wurden am Standort Pfnitztal Leichtbauteilewerkstoffe in einen bestehenden großserienfähigen Prozess (D-LFT im Fließpressverfahren) integriert [8, 9]. Das Skelett der Baugruppe besteht aus dünnen CFK-Halterungen und einem intrusionsgeschützten LFT-Batterieschutzgehäuse. Zur Aussteifung des Gehäuses sind intrinsische Metallverstärkungen (Tailored-LFT) und Leichtmetall-Traversen eingebracht. In einem zukünftigen Schritt können die CFK-Halterungen mithilfe thermoplastischer Tapelegeverfahren (z. B. Relay) weiter optimiert werden.

Die im FSEM-Projekt aufgebaute Lithium-Ionen-Batterie besteht aus 16 Einzelmodulen mit einem Gesamtgewicht von 350 kg und wird durch zwei gespiegelte Batteriekastenhälften getragen (Bild 6). Das Konzept ist für eine Beschleunigung im Fahrbetrieb von 3 g (Erdbeschleunigung  $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$ ) und im Crash-Fall von 10 g ausgelegt. Beim Batterieschutzgehäuse wurde das LFT-Basismaterial mit zwei Lagen vollkonsolidierten PP-GF47-Gewebes (Typ: Tepex; Hersteller: Bond-Laminates GmbH, Brilon) kombiniert. Die Lasten der Batteriemodule werden über Leichtmetall-Traversen aus AlMgSi0,5 und innenliegende Stahl-Inlays aus H420LA [10] in den GewebelFT-Aufbau der Seitenwand und des Bodenbereichs eingeleitet. Beispielsweise vergrößert der Einsatz des intrinsischen Metalleinlegers die Querauszugkraft um den Faktor 2 und unterdrückt, nach jetzigem Stand, die Kriechneigung.

Ein Bauteilversuch unter Annahme quasistatischer Last bestätigte die berechneten Simulationsergebnisse der Mises-Spannungen im Crash-Fall. Die Untersu- →



**Bild 6. Für den Aufbau des Batterieschutzgehäuses, befestigt im Fahrzeugheckrahmen, wurde das LFT-Basismaterial mit zwei Lagen vollkonsolidierten PP-GF47-Gewebes kombiniert**

(Foto: Fraunhofer ICT)

(Schraubdome, Schnapphaken etc.) zu integrieren und den Designraum auszufüllen, erfordert eine Kombination mit kurz- oder langfaserverstärktem Material. Hierzu eignet sich insbesondere das Umspritzen bzw. Umpressen von lasttragenden Elementen im hochautomatisierten Spritzgieß- oder Fließpressverfahren.

Ein Instrumententafel-Querträger, gemeinsames Entwicklungsprojekt zwischen Fraunhofer ICT und Peguform GmbH, Bötzingen, veranschaulicht die Möglichkeiten der Relay-Technik und deren Kombination mit weiteren Verfahren (Bild 5). Insbesondere die Reduzierung des Verschnitts ist bei derart komplexen

schiedliche Forschungsgruppen in den vergangenen zwei Jahren das Thema Elektromobilität bearbeitet. Am Fraunhofer ICT wurde das Ziel verfolgt, ein Batterieschutzgehäuse in einem Multi-Material-Ansatz aus D-LFT, maßgeschneiderten lokalen Endlosfaserstrukturen sowie intrinsischen Metalleinlegern zu entwickeln (Bild 6).

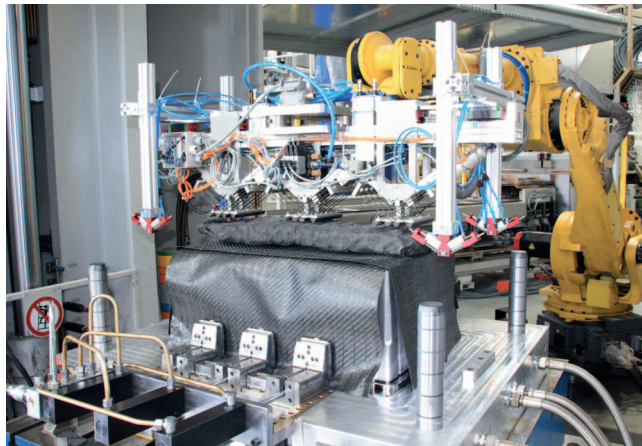
Die dabei zum Einsatz kommenden langfaserverstärkten Thermoplaste (LFT) sind seit vielen Jahren als semistrukturierter Werkstoff in der Automobilindustrie im Einsatz. Die Materialkombination aus Polypropylen und Glasfasern ist in vielen Bereichen Stand der Technik [6, 7]. Um das Batterieschutzgehäuse (inkl. Trag-

**i Kontakt**

Nähere Informationen zum „ressourcen-effizienten Leichtbau“ vermittelt die Autoren Besuchern der **Fakuma 2011** auf dem Stand des Fraunhofer ICT:  
**Halle B2, 2104**  
 → [www.ict.fraunhofer.de](http://www.ict.fraunhofer.de)



**Bild 7. Eine eigens zu diesem Zweck konstruierte Handhabungseinheit legt LFT-Plastifikat und Gewebezuschnitt im Werkzeug ab** (Foto: Fraunhofer ICT)



chungen zum Kriechverhalten des multi-materialen Werkstoffaufbaus werden momentan abschließend evaluiert.

Der gesamte Prozess wurde als teilautomatisierte Fertigung zur Prototypenherstellung des Batteriegehäuses am ICT aufgebaut (**Bild 7**). Bei einer Wanddicke zwischen 5 und 6 mm beträgt die Kühlzeit 45 s; der gesamte Zyklus kann mit 65 s abgebildet werden. Das auf einer D-LFT-Anlage (Hersteller: Dieffenbacher GmbH + Co. KG, Eppingen) aufbereitete LFT-Plastifikat wird zusammen mit vollkonsolidiertem Glasfasergewebe von einem Roboter mit Nadelgreifer ins Presswerkzeug eingelegt. Das PP/GF-Hybridgewebe wird in einem Paternoster-Umluftofen (Hersteller: HK Präzisionstechnik GmbH, Oberndorf) auf Verarbeitungstemperatur aufgeheizt. Über ein zweites Infrarothheizfeld wird in gleicher Weise der zweite Gewebezuschnitt vorkonfektioniert und zusammen mit den intrinsischen metallischen Verstärkungsstrukturen händisch eingelegt und anschließend durch eine parallelaufgeregelter Oberkolbenfließpresse (Typ: Compress Plus DCP-G; Schließkraft: 36 000 kN) zum Bauteil verpresst.

### Fazit

Um mit thermoplastischen Matrices weiter in Strukturanwendungen vordringen zu können (Metallsubstitution) oder um das Bauteilgewicht bereits bestehender Thermoplastlösungen weiter zu reduzieren, stellen Multi-Material-Lösungen einen vielversprechenden Ansatz dar. Die Motivation, hierfür Investitionskosten für neue Anlagentechnik oder eine anspruchsvollere Produktion in Kauf zu nehmen, ist dabei aber nicht allein im verringerten Bauteilgewicht zu suchen. Die Möglichkeit einer gesteigerten Funktionsintegration mit neuen Funktionalitäten oder verbesserte Materialeigenschaften zählen ebenso als treibende Kraft.

Bauteile im Multi-Material-Design basieren auf einem Materialmix, bei dem die verschiedenen Werkstoffe jeweils dort eingesetzt werden, wo sie die meisten Vorteile bieten. Eine Optimierung für eine bestimmte Anwendung bedeutet immer auch eine Spezialisierung. Endlosfaserverstärkte Bauteile beispielsweise, die unvorhergesehen senkrecht zur Faserorientierung belastet werden, zeigen ein sehr

ungünstiges Werkstoffverhalten und versagen meist bei geringen Lasten. Geeignete Methoden zur Vorauslegung (mittels Simulation) sowie eine Strategie zur Recyclingfähigkeit von Multi-Material-Bauteilen müssen hierzu ebenfalls angepasst bzw. entwickelt werden. ■

### DANK

Für die finanzielle Unterstützung danken die Autoren der Fraunhofer Gesellschaft, dem BMBF, dem Freistaat Bayern sowie der Stadt Augsburg.

### LITERATUR

Das Literaturverzeichnis ist kostenlos abrufbar unter [www.kunststoffe.de/A060](http://www.kunststoffe.de/A060).

### DIE AUTOREN

DIPL.-ING. ALEXANDER ROCH, geb. 1983, ist seit 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer ICT, Pfinztal; [Alexander.Roch@ict.fraunhofer.de](mailto:Alexander.Roch@ict.fraunhofer.de)

DIPL.-ING. TIMO HUBER, geb. 1981, ist Teamleiter der Gruppe Thermoplastverarbeitung am Fraunhofer ICT; [Timo.Huber@ict.fraunhofer.de](mailto:Timo.Huber@ict.fraunhofer.de)

DIPL.-ING. MANFRED REIF (BA), geb. 1976, ist seit 1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer ICT; [Manfred.Reif@ict.fraunhofer.de](mailto:Manfred.Reif@ict.fraunhofer.de)

DIPL.-ING. BENJAMIN HANGS, geb. 1983, ist seit 2010 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer ICT; [Benjamin.Hangs@ict.fraunhofer.de](mailto:Benjamin.Hangs@ict.fraunhofer.de)

### SUMMARY

#### RESSOURCE EFFICIENT LIGHTWEIGHT CONSTRUCTION FOR MASS PRODUCTION

MULTI-MATERIAL DESIGN. While demands placed on lightweight constructions are growing, it is frequently not sufficient to merely replace materials. Holistic approaches and the targeted combination of different materials with their specific benefits are the key to efficient lightweight design.

*Read the complete article in our magazine*

*Kunststoffe international* and on

[www.kunststoffe-international.com](http://www.kunststoffe-international.com)