

AUTOREN



DIPL.-ING. ANDREAS WÜST
leitet das Team Optimization
and Crash Analysis bei Engineering
Plastics Europe, BASF SE in
Ludwigshafen.



DR. STEFAN GLASER
ist Head of Simulation
Engineering bei Engineering
Plastics Europe, BASF SE
in Ludwigshafen.



DR. ANDREAS WOLLNY
ist Product Manager
Polyamide Specialties bei
Engineering Plastics Europe,
BASF SE in Ludwigshafen.



DR. HEIKO HESS
ist tätig im Business
Development Interior/Exterior;
Engineering Plastics Europe, BASF
SE in Ludwigshafen.

METALLSUBSTITUTION IM BEREICH CRASHSICHERHEIT

In sicherheitsrelevanten Einsatzbereichen wie im Fußgänger- und Insassenschutz, aber auch im Fahrzeugschutz, also der versicherungstechnischen Einstufung, sind die Anforderungen besonders hoch. Gerade hier hat die BASF mit ihrem inzwischen sehr breit einsetzbaren Simulationswerkzeug Ultrasim in den vergangenen Jahren wichtige Beiträge zu innovativen Anwendungen von Kunststoffen geleistet [1-6]. Speziell glasfaserverstärkte Kunststoffe erfordern bereits bei der Vorhersage ihrer anisotropen, also richtungsabhängigen Steifigkeitseigen-

schaften eine angepasste Behandlung. Kunststoffbauteile losgelöst von ihrer Herstellung als isotropen, weichen Stahl zu betrachten, führt nicht zu optimal gestalteten, festigkeits- und steifigkeitsoptimierten Bauteilen. Hier sind vielmehr moderne numerische Methoden zur Materialbeschreibung sowie mathematische Methoden zur Optimierung im täglichen CAE-Einsatz unverzichtbar [7]. Auf der Materialseite stellt die BASF nun mit dem neuen Ultramid Structure ihre ersten langglasfaserverstärkten Polyamide vor, die – begleitet von angepassten Vorhersagemethoden – die nächste Welle der Metallsubstitution im Bereich Crashesicherheit auslösen können.

HERAUSFORDERUNG VERSAGENSMODELLIERUNG

Neben der dauerfesten Auslegung von Bauteilen unter statischen oder dynamischen Lasten bei unterschiedlichen Einsatztemperaturen und Umgebungsbedingungen ist die Auslegung auf ein kontrolliertes Verhalten in Crashlastfällen hin eine weitere Herausforderung für den Entwicklungsingenieur. Dazu muss zunächst der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung auch bei Überschreitung eines ertragbaren Zustands numerisch geeignet beschrieben werden, ❶. Die ausgeprägte Asymmetrie der Kennlinie in Zug und

MEHR CRASHSICHERHEIT DURCH HOCHLEISTUNGSPOLYAMIDE UND OPTIMIERTE SIMULATIONSMETHODEN

Thermoplastische Kunststoffe sind aus dem modernen Automobilbau nicht wegzudenken. Der Anteil von Bauteilen aus technischen Kunststoffen in praktisch allen Fahrzeughauptkomponenten nimmt stetig zu. In dem Maße, wie der Trend zum Leichtbau und damit zur Metallsubstitution anhält, werden auch Kunststoffe weiterentwickelt. Parallel dazu müssen jedoch auch die dazu passenden Simulationen zur virtuellen Auslegung zur Verfügung stehen. Die Autoren von BASF zeigen, dass sich nur in dieser Kombination heute und in Zukunft hochanspruchsvolle Aufgaben, die bis vor wenigen Jahren Stahl und Aluminium vorbehalten waren, von Thermoplasten erfüllen lassen.

Druck ist leicht erkennbar: Einerseits ist die maximal ertragbare Spannung unter Druck höher als unter Zug, andererseits versagt das Material unter Druckbelastung ganz anders als im Zug. Die Energie, die das Material aufnimmt (als Fläche unter der Kurve) kann unter Druck um ein Vielfaches höher sein als unter Zug.

Die Abbildung zeigt den vereinfachten Fall einer konstanten Dehnrate. Es bestehen jedoch weitere Abhängigkeiten im Versagensverhalten, die mit herkömmlichen Materialformulierungen auch nicht annähernd abbildbar sind. Bei Verwendung von Versagensmodellen, die sich aus der Berechnung von Metallen ableiten, die beispielsweise auf plastischen Dehnungen beruhen und meist nur an einfachen Zugversuchen kalibriert sind, wird sich ein Kunststoffbauteil daher meist anders verhalten als numerisch vorhergesagt. Grund dafür ist nicht zuletzt das vollständige und schlagartig einsetzende Verschwinden der Elemente in der Finite-Element-Analyse bei Erreichen eines vorgegebenen Versagenswerts. Diese Vorgehensweise ist unphysikalisch, führt daher in einer FE-Analyse auch zu

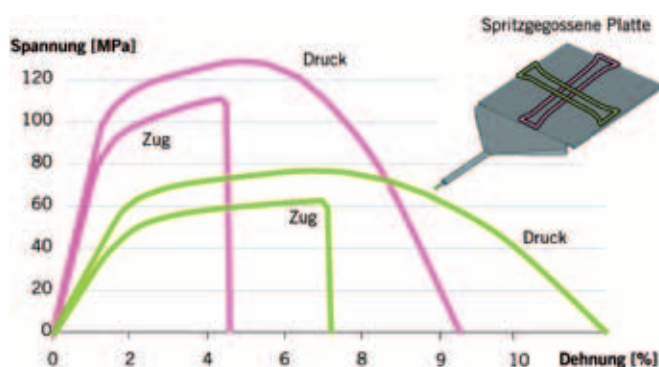
unphysikalischen Antworten und damit zu falschen Vorhersagen.

Die vollständige Beschreibung des Versagensverhaltens unter Berücksichtigung all dieser Einflussgrößen ist mit den in Ultrasim verwendeten numerischen Methoden möglich. Voraussetzung für den Einsatz dieses anspruchsvollen Verfahrens ist die korrekte Kalibrierung der Materialgesetze. Dazu sind außer Hochgeschwindigkeits-Zugversuchen an anisotropen Probekörpern weitere Material- und Bauteiluntersuchungen nötig, welche die erforderlichen Daten liefern: Für die bis-

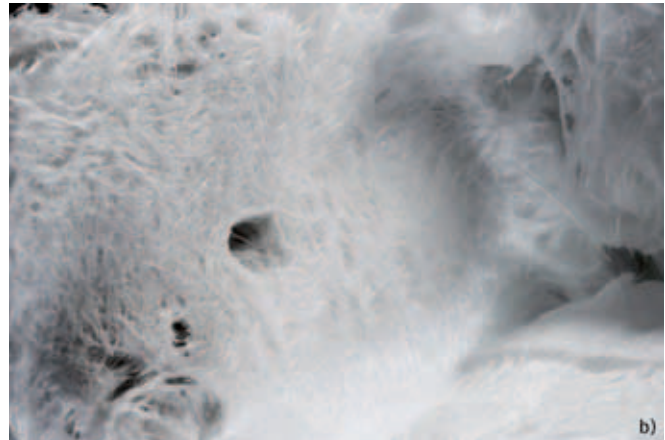
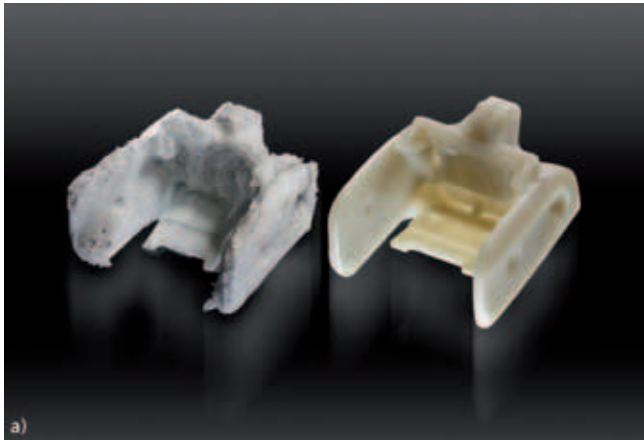
her in crashrelevanten Anwendungen verwendeten Kunststoffe der BASF liegen diese Kenntnisse vor [3].

MEHR LEISTUNG MIT LANGGLASFASERVERSTÄRKTEN POLYAMIDEN

Seit kurzem verfügt die BASF jedoch über eine Klasse von Hochleistungspolyamiden, die Crashanforderungen besser erfüllen können als traditionelle Kunststoffe. Zur Kunststoffmesse K 2010 hat das Unternehmen dem Markt seine neuen Ultramid Structure-Polyamide mit Langglasfaser



① Exemplarische Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Kennlinien eines kurzglasfaserverstärkten Polyamids für längs und quer zur Faserorientierung ausgearbeitete Proben; Einflussgrößen sind die Faserorientierung und der hydrostatische Spannungsanteil



② a) Die besondere Eigenschaft von Polyamiden mit Langglasfaser-Verstärkung besteht darin, dass sie während des Spritzgießens ein dreidimensionales Glasfasernetzwerk ausbilden (links, weiß), das dem Bauteil – hier einer Skibindung – seine außergewöhnliche mechanische Leistungsfähigkeit verleiht; b) dreidimensionales Fasernetzwerk im veraschten Bauteil (Großaufnahme)

(LF)-Verstärkung vorgestellt. Diese neue Produktgruppe stellt einen deutlichen Leistungssprung in Richtung Metallsubstitution dar. Denn wo selbst hoch optimierte kurzglasfaserverstärkte Produkte an ihre Grenzen stoßen, bieten LF-Polyamide neue Möglichkeiten.

Das außergewöhnlichste Merkmal von Bauteilen aus langglasfaserverstärktem Kunststoff ist das dreidimensionale Glasfasernetzwerk, das sich direkt im klassischen Spritzguss ausbildet und dem Endbauteil seine enormen mechanischen Eigenschaften bei tiefen wie auch bei hohen Temperaturen verleiht. Das Fasernetzwerk bildet das Skelett des Bauteils und bleibt

selbst beim Veraschen des Kunststoffs vollständig erhalten, ② a und b. Diese Struktur ist dafür verantwortlich, dass sich Verzug, Kriechverhalten und Energieaufnahme der Materialklasse bereits stark den Metallen annähern, ohne dabei die klassischen Vorteile eines Thermoplasten zu verlieren.

Durch eine günstige Verteilung der Fasern im Kunststoff-Bauteil bildet sich das dreidimensionale Fasernetzwerk aus größtenteils 3 bis 6 mm langen Fasern direkt und ohne größeren Zusatzaufwand aus. Der Verarbeiter erspart sich hohe Investitionen und hat trotzdem Zugang zu einer anspruchsvollen neuen Materialart. Sie

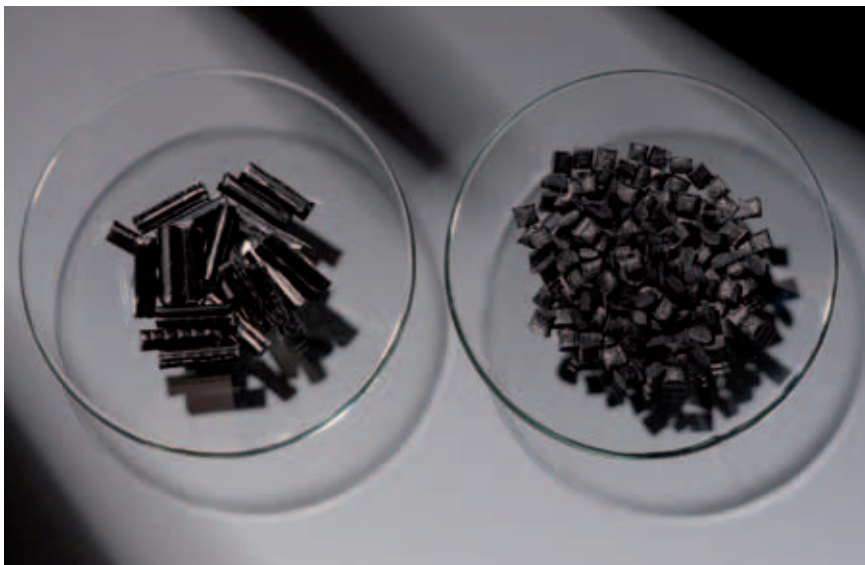
ermöglicht im Vergleich zu klassischen, mit nur etwa 0,3 mm kurzen Fasern verstärkten Polyamiden, ganz neue Bauteileigenschaften, ③.

Diese außerordentlichen Bauteileigenschaften kommen durch die erhöhte mechanische Leistungsfähigkeit zustande, für die die langen Glasfasern verantwortlich sind: Die LF-Polyamide Ultramid Structure sind auch noch bei hohen Temperaturen sehr steif und fest, während sie bei niedrigeren Temperaturen eine sehr hohe Kälteschlagzähigkeit aufweisen. Dazu kommt das günstige Kriechverhalten, der geringe Verzug sowie die im Vergleich zu konventionellem kurzglasfaserverstärktem Polyamid deutlich höhere Energieaufnahme und damit Crash-Performance, ④.

Mit diesen Kunststoffen lassen sich nun hochanspruchsvolle Fahrzeugbauteile noch effizienter und sicherer entwickeln: Dazu gehören Motorlager, Sitzstrukturen und vor allem Crashabsorber, die beim Aufprall gezielt zerbersten, um möglichst viel Zerstörungskraft vom Rest des Fahrzeugs fern zu halten.

SIMULATION VON LF-POLYAMIDEN

Die Vorteile von LF-Materialien für Energie absorbierende Strukturbauteile wie den Crashabsorbern können in der Simulation allerdings nur mit modifizierten Methoden abgebildet werden. Einerseits muss die gegenüber kurzglasfasergefüllten Werkstoffen geänderte Faserorientierung im Füllprozess ausreichend genau beschrieben werden, andererseits muss



③ Granulatlängen im Vergleich: Ultramid Structure (links) und Standard-Polyamid mit Kurzglasfasern

das Versagensverhalten mit allen wichtigen Einflussgrößen erfasst werden.

Fasergefüllte Thermoplaste sind im Schmelzzustand strukturviskos (scherentzähend). Sie bilden durch die beim Spritzgießen induzierte Rheologie eine über der Wanddicke veränderliche, mehrschichtige Faserorientierung im Bauteil aus, ⑤ [8]. Gegenüber der bei Kurzglasfasern auftretenden meist relativ dünnen Mittelschicht, führt die Verwendung längerer Fasern zu anderen Schichtverteilungen über der Wanddicke und geänderten Orientierungsgraden. Dies hängt mit den stärker ausgeprägten Wechselwirkungen der längeren Fasern zusammen [9].

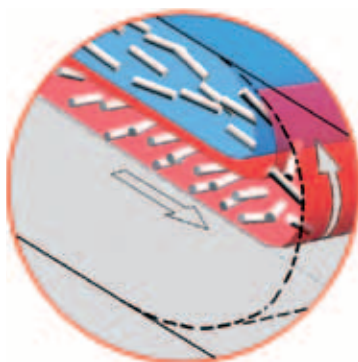
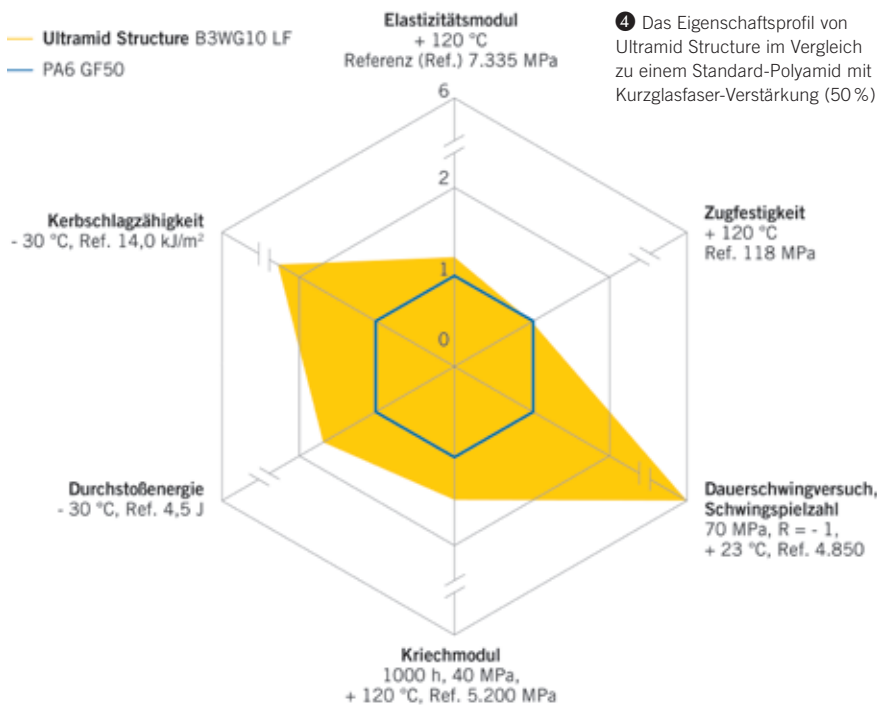
AUSLEGUNG EINER CRASHABSORBERGEOMETRIE – MATHEMATISCHE OPTIMIERUNG

Bauteile wie der Crashabsorber, ⑥, aus Ultramid Structure dienen der Aufnahme von Energie durch kontrollierte Zerstörung im Crashlastfall. ⑦ a und b zeigt das reale und berechnete Verhalten des Bauteils bei einem Impact mit einer 25 km/h schnellen und 60 kg schweren Masse. Man erkennt, dass die Struktur von oben nach unten ideal und kontrolliert, praktisch nur an der Kontaktfläche zum Impaktor versagt. Mit Ultramid Structure A3WG10 LF, einem LF-Polyamid

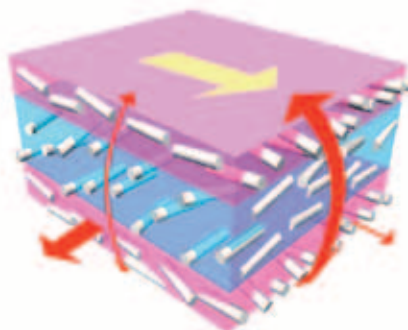
mit 50 % Fasergewichtsanteil, lassen sich so auf einem Impaktortweg von zirka 75 mm 1500 J Energie aufnehmen. Das etwa 150 g schwere Bauteil wird dabei nur knapp zur Hälfte zerstört.

Die Methoden zur Versagensmodellierung sind notwendig, aber nicht hinreichend, um ein solches Bauteilverhalten vorherzusagen. Vielmehr ist neben der lokal richtigen Beschreibung des Materialverhaltens, also der richtigen Berechnung des Bauteils, auch die Auswahl einer angepassten Gestalt unverzichtbar, also die Berechnung des richtigen Bauteils. Diese Unterscheidung ist von Bedeutung, denn sonst können die vorhandenen Methoden und Kunststoffeigenschaften nicht optimal genutzt werden. Zur Auslegung des betrachteten Absorbers wurde nach Wahl einer Grundgestalt zunächst ein FE-Schalenmodell erstellt, und für die numerische Optimierung parametrisiert. Neben drei Wanddicken sind weitere Geometrieparameter mit Hilfe von Morphing-Methoden realisiert [10]. Dadurch lässt sich einerseits die Welligkeit der axial angeordneten Rippen beeinflussen, andererseits kann die zunächst linear angenommene Konizität der Bauteilgrundgestalt gezielt variiert werden, ⑧.

Die unterschiedlichen Wanddicken und Geometrieparameter dienen bei einer mathematischen Optimierung als Designvariablen. Als Optimierungsziel wird die maximale Energieaufnahme gefordert. Haupteinschränkung ist eine nicht zu über-



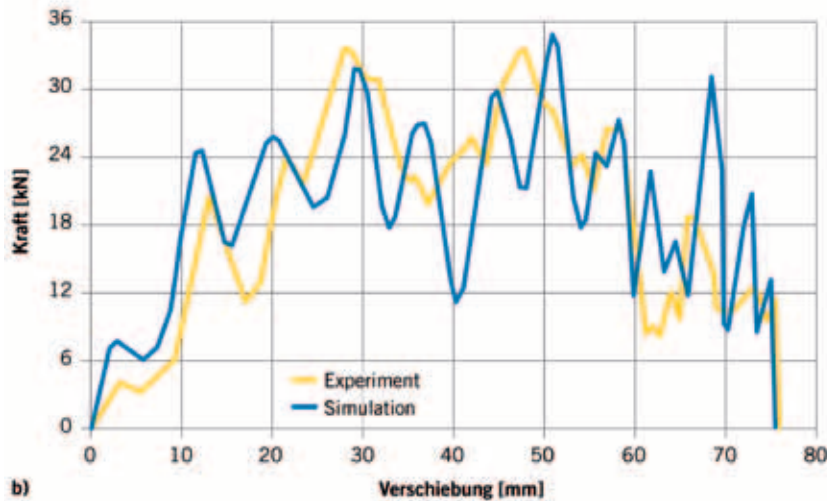
⑤ Je nach rheologischem Verhalten des Kunststoffs unterscheidet sich die Orientierung der Fasern zwischen Mittel- und Randschichten des Bauteils – links: Fasertransport im Spritzgießvorgang; rechts: Faserschichtaufbau im Compound



⑥ Der sehr nah an Serienbauteilen orientierte Crashabsorber aus Ultramid Structure, entwickelt und gefertigt in den Labors der BASF, liefert in der Simulation und im Experiment das Datenmaterial für zukünftige Projekte mit den Automobilherstellern; die Abmessungen des Bauteils betragen 150 x 60 x 60 mm



a)



b)

7 a) Die Vorhersagegenauigkeit der Simulation ist außerordentlich hoch: oben: realer Hochgeschwindigkeits-crash, unten: Simulation desselben Vorgangs mit Ultrasim; b) die Grafik bestätigt die hohe Übereinstimmung von Experiment und Simulation: das gezielte Versagen des Crashabsorbers aus Ultramid Structure beim Aufprall wird durch Ultrasim genau abgebildet und vorhergesagt.

schreitenden Maximalkraft. Dadurch wird ein möglichst homogener Kraftverlauf erzwungen. Die Optimierung erfolgt über ein Successive Response Surface-Verfahren mit einem auf radialen Basisfunktionen basierenden Ansatz für das Metamodell [11]. Die Signifikanz der Designvariablen

bezüglich der Systemantworten kann über Korrelationen oder Varianzanalysen aus einem vorgeschalteten Screening ermittelt werden. Bereits die einfache Betrachtung des Bauteilverhaltens bei ausgewählten Variablenkombinationen ermöglicht ein tieferes Verständnis für das System: Das

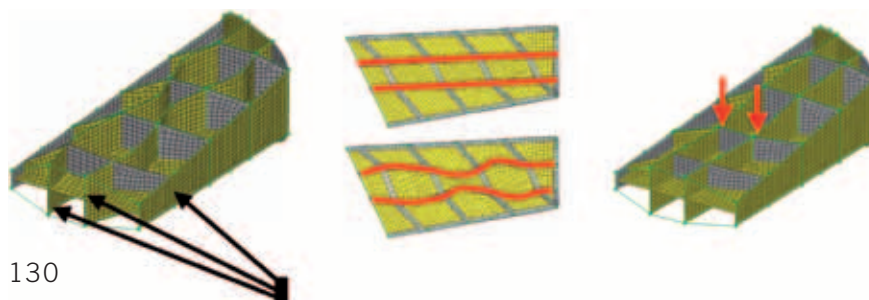
gezielte, kontrolliert und axial fortschreitende Versagen stellt sich nur dann ein, wenn die einzelnen Wanddicken richtig miteinander kombiniert werden.

STAND DER TECHNIK UND AUSBLICK

In zahlreichen Impact-Bauteiltests unter Variation der Materialien (Matrixmaterial, Glasfasergehalt und -länge), der Umgebungsbedingungen (Temperatur/Feuchte) und der Impactorgeschwindigkeiten konnte das Langglasfaser-Material Ultramid Structure seine außerordentliche Eignung unter Beweis stellen. Gegenüber Kurzglasfaser-Material breiten sich Risse deutlich weniger aus, so dass ein gewünschtes, kontrolliert axial stabil fortschreitendes Versagen mit der gewählten Bauteilgestalt besser erzielt werden kann. Diese Beobachtung passt genau zu den im Schlagbiegeversuch ermittelten Schlagzähigkeitswerten von LF-Materialien [12].

Die Energiemengen, die mit diesem Bauteilkonzept, bezogen auf Bauteilmasse und -volumen, absorbiert werden können, machen den gezeigten Absorber besonders interessant für den Einsatz im Fußgängerschutz (Lower/Upper Leg Impact) und im sekundären Lastpfad im Vorderwagen, zum Beispiel für die Energieabsorption im Reparaturcrash, 9.

Mit den beschriebenen Verfahren zur Versagensmodellierung, der Bauteilauslegung mit mathematischen Optimierungsmethoden und Hochleistungspolyamiden wie Ultramid Structure lassen sich die Einsatzgebiete von Kunststoff im Automobilbau beträchtlich erweitern. In dieser Kombination sind nun weitere, zum Teil völlig andere Absorberkonzepte realisierbar, die nicht notwendigerweise dem Prinzip einer kontrollierten Zerstörung folgen, sondern auf einen gezielten, berechenbaren und einstellbaren Kraftabbau abzielen. Beispielsweise sind Anwendungen beim Kopfaufschlag auf die Motorhaube oder beim Insassenschutz Gegenstand aktueller Entwicklungen. In Kombination



8 Beim Morphing, einer speziellen Art der Gestalt- oder Shape-Optimierung, wird jeder Parameter – hier sind es drei Wanddicken (links), die geometrische Vorverformung der Rippen (Mitte; oben: null; unten: maximal) und die Konizität (rechts) – direkt als kontinuierliche Variable im Optimierungsproblem verwendet und trägt entsprechend dem gewählten Optimierungsziel zu einer Bauteilverbesserung bei

mit leichten Metallschalen oder intelligenten Metallverstärkungen sind auch Hybridlösungen in modernen Fahrzeugkonzepten möglich: Innovative Bauteile, die noch vor einigen Jahren in dieser Form aus Kunststoff undenkbar erschienen.

LITERATURHINWEISE

- [1] Frik, S.; Erzgräber, M.; Wüst, A.; Glaser, S.: Entwicklung eines thermoplastischen Lower Bumper Stiffeners für den Fußgängerschutz. Kunststoffe im Automobilbau, VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, Tagung Mannheim 2006, S. 125, VDI-Verlag Düsseldorf
- [2] Glaser, S.; Wüst, A.: Modellierung am Computer. In: Kunststoffe 03/2005, S. 132 ff.
- [3] Glaser, S.; Wüst, A.; Jansen, J.: Crashbelastete Bauteile virtuell entwickeln. In: Kunststoffe 09/2006, S. 168 ff.
- [4] Wüst, A.; Hensel, T.; Jansen, D.: Integrative optimization of injection molded plastic parts. 7th European LS-Dyna Conference, Salzburg 2009
- [5] Kraft, W.-W.; Jakobi, R.; Glaser, S.; Wüst, A.: Simulieren, Herstellen, Prüfen – Komplettes Paket für die Kunststoffbauteil-Entwicklung. In: ATZ 05/2009, S. 368
- [6] Bernnat, A.; Wüst, A.: Excellent Processing of Engineering Plastics. Proceedings of the Polymer Processing Society, 26th Annual Meeting (PPS-26 IST), October 20-23, 2010 Istanbul (Turkey)
- [7] Wüst, A.: Vom Groben ins Detail. In:



konstruktionspraxis 12/2007, S. 20

- [8] Advani, S. G.; Tucker III, C. L.: A tensor description of Fiber orientation in short fiber composites. Proc 43rd Ann Tech Conf, SPE (1985), pp 1113 – 1118
- [9] Phelps, J. H.; Tucker III, C. L.: An anisotropic rotary diffusion model for fiber orientation in short- and long-fiber thermoplastics. J Non-Newtonian Fluid Mech. 156 (2009), pp 165 – 176
- [10] Korbettis, G.; Siskos, D.: Multi-disciplinary design optimization exploiting the efficiency of ANSA-LSOPT-META Coupling. 7th European LS-Dyna Conference, Salzburg 2009
- [11] Stander, N.; et. al.: LS-OPT User Manual, Version 4.0, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 2009

- [12] Produktbroschüre Ultramid Structure, Von führenden Testern empfohlen, BASF SE, 2010
- [13] Kunststoffe im Automobilbau. VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, Tagung Mannheim 2010, VDI-Verlag Düsseldorf



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.ATZonline.de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
order your test issue now:
SpringerAutomotive@abo-service.info

XL2

AKUSTIK + AUDIO-ANALYSATOR

Schallpegel IEC 61672, Klasse 1

Terz / Oktav IEC 61260, Klasse 0

FFT-Analyse Schmalband-Analyse

Schall-Aufzeichnung (WAV)

Nachhallzeit ISO 3382, Terz + Oktav

STI-PA Sprach-Verständlichkeits-Index

DIN15905-5 Veranstaltungs-Überwachung

Audioanalyse THD, RMS, Frequenz

TESTGERÄT KOSTENLOS ANFORDERN!

Schalltechnik SÜD & NORD
PROFESSIONELLE SCHALLMESSGERÄTE
info@akustiktest.de
Regensburg (Zentrale): 0941/94 555 85
Essen (Vertriebsb. Nord): 0201/54 56 980

XL2-Komplettset: 1275 €

inkl. Schallpegelmessgerät, Schallaufzeichnung (als Wav-File, simultan zur Messung!), Terz-, Oktav-, FFT-Nachhallzeit-Analyse, Scope-Funktion, RMS-Pegel, THD+N, Akustische Laufzeitmessung, M4260-Mikrofon, Lithium-Akku und 2GB Mini-SD-Karte

