



Neue Kunststoff- und alte Aluminiumvariante einer Drehmomentstütze

Metall ist die virtuelle Messlatte

Integrative Simulation. Mit der nochmals weiterentwickelten Integrativen Simulation (Teil 3) lassen sich Festigkeit und Bruchverhalten hoch belasteter Kunststoffbauteile wie Motorstützen oder Fahrwerkklager sehr genau vorhersagen. Auf diesem Weg sind nun Anwendungen in Kunststoff realisierbar, die bislang ausschließlich metallischen Werkstoffen vorbehalten waren.

**STEFAN GLASER
ANDREAS WÜST
BERNHARD AUMER**

Neben den Aspekten Sicherheit und Komfort wird die Entwicklung moderner Kraftfahrzeuge heute von dem Bedürfnis nach Kosteneinsparung und vor allem nach Gewichtsverminderung und damit nach Verbrauchs- und Emissionsreduktion getrieben. Obwohl unter der Motorhaube schon zahlreiche Stahl- und Aluminiumteile leichteren und stärker funktionsintegrierten Kunststoffbauteilen gewichen sind, waren lasttragende Strukturelemente davon bisher ausgenommen. Auch Triebwerkklager wie Motorlager, Pendelstützen oder Fahrwerksteile, die hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind, wurden bisher vornehmlich aus metallischen Werkstoffen hergestellt. Kunststoffe fanden in diesen Bereichen kaum

Anwendung, weil man über das Verhalten von Kunststoffen bei hohen Beanspruchungen wenig wusste und nicht in der Lage war, Bauteile in Kunststoff hinreichend genau auszulegen.

Um mit Kunststoffen in die Triebwerkklagerung vordringen zu können, müssen sie Festigkeitseigenschaften haben, die an metallische Werkstoffe heranreichen. Dafür kommen nur technische

Spannungs-Dehnungs-Kurven

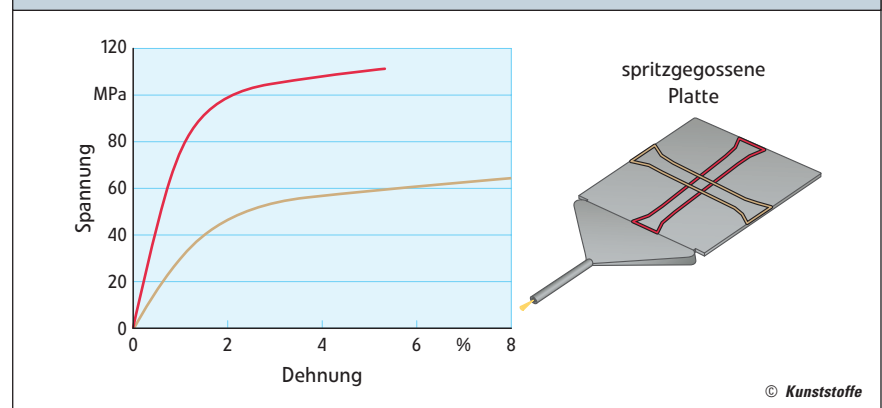
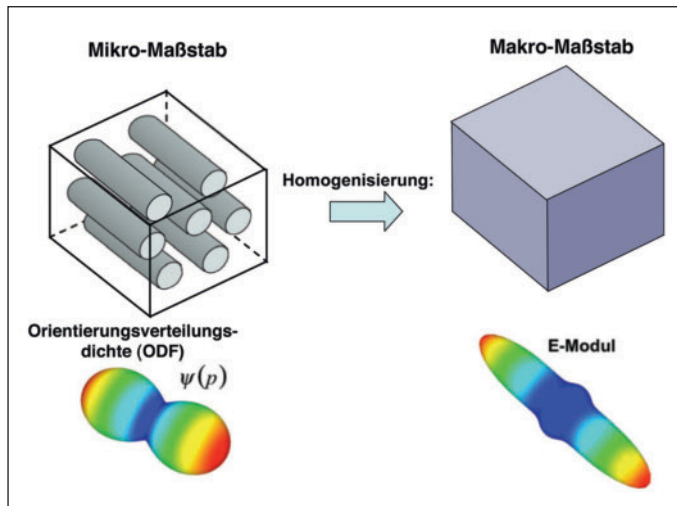


Bild 1. Materialverhalten in Abhängigkeit von der Faserorientierung

Bild 2. Virtuelle Modellierung von Compounds



Anteile, die bei Entlastung nicht mehr vollständig relaxieren. Kunststoffe zeigen also ein sehr komplexes nichtlineares Verhalten. Eine weitere Schwierigkeit in der numerischen Behandlung der hier betrachteten Bauteile verursacht die Füllung der Thermoplastmatrix mit Kurzglasfasern. Durch die Ausrichtung der Fasern während des Füllprozesses resultieren anisotrope, also richtungsabhängige mechanische Eigenschaften [6]. Dies bedeutet nicht nur anisotrope Steifigkeiten, sondern auch anisotrope Werte für Streckspannung und Bruchdehnung. Die verwendete numerische Materialbeschreibung des faserverstärkten Kunststoffs muss also in der Lage sein, die An-

Kunststoffe in Frage, die als Compound mit Verstärkungsfasern ausgerüstet sind. Diese Verstärkung macht die lokale Beschreibung des komplexen Materialverhaltens von Kunststoffen noch komplizierter: Zum einen bringen die Verstärkungsfasern eine Richtungsabhängigkeit in den Werkstoff, die an jedem Punkt im Bauteil variiert und stark vom Herstellungsprozess abhängt. Auf der anderen Seite bestehen komplexe Phasen-Wechselwirkungen zwischen Kunststoff und Verstärkungsfasern, die die Festigkeit des Compounds wesentlich bestimmen.

Mit der Integrativen Simulation der BASF ist es jetzt möglich, hoch belastete Kunststoffbauteile sehr genau auf Festigkeit auszulegen. Basis dafür ist ein spezielles Werkstoffmodell, das ähnlich wie bei der vor vier Jahren vorgestellten Crash-Simulation [1 bis 3] wesentliche Aspekte des Werkstoffverhaltens für Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen beschreibt [4, 5]. Während im Fall der Crash-Simulation das Bauteilverhalten beim kurzzeitigen Hochgeschwindigkeitsaufprall untersucht wird, geht es nun um die Festigkeit bei statischer Beanspruchung. Pedale, Motor- und Fahrwerkklager oder Koppelstangen, bisher z. B. aus Aluminium gegossen, sind nun auch für das Kunststoffspritzgießen interessant. Denn sie können mit dem nochmals erweiter-

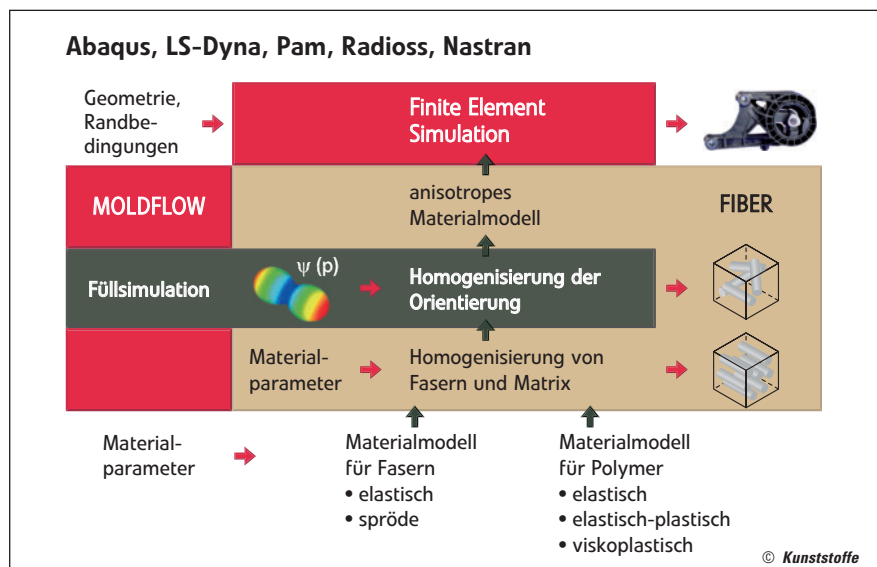


Bild 3. Integrative Simulation: Die Implementierung

ten Instrument der Integrativen Simulation virtuell am Computer ausgelegt werden. Wie in vielen anderen Fällen kann das nicht nur zu einer erheblichen Gewichtsreduktion führen, sondern es ermöglicht auch, komplexere Bauteile zu gestalten, weitere Funktionen zu integrieren und so gegenüber herkömmlichen Bauteilen die Kosten zu vermindern.

Kunststoffverhalten numerisch beschreiben

Eine der größten Herausforderungen in der Festigkeitsberechnung für thermoplastische Bauteile ist die numerische Beschreibung des kunststofftypischen Verhaltens. Dabei spielt das nichtlineare viskoplastische Verhalten der thermoplastischen Matrix eine wesentliche Rolle. So ist die Streckspannung bei vielen Kunststoffen im Druckbereich deutlich höher als im Zugbereich. Darüber hinaus bleiben bei großen Dehnungen inelastische

isotropie durch die Orientierung der Glasfasern, die nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung, die Dehnratenabhängigkeit, das anisotrope Versagen und die Zug-Druck-Asymmetrie zu beschreiben. Außerdem muss sich das Programmsystem einfach an die Prozesssimulation koppeln lassen. Diese Anforderungen an das Materialmodell überschreiten bei Weitem alles, was noch vor einigen Jahren in einer CAE-Auslegung behandelt werden konnte.

Anisotrope Materialeigenschaften

Bild 1 veranschaulicht einige der erwähnten Eigenschaften des Polymers [6]. Die gezeigten Spannungs-Dehnungskurven (Zug) unterscheiden sich durch ihre Orientierung (längs und quer). Dabei wird quer zur Faserorientierung eine wesentlich größere Bruchdehnung erreicht als längs. Umgekehrt ist die Bruch-

i	Hersteller
BASF SE Fachpressestelle Kunststoffe KT/KC - E100 D-67056 Ludwigshafen Tel. +49 (0) 6 21/ 60-43348 Fax +49 (0) 6 21/60-49497 www.basf.com	

spannung quer zur Faserorientierung niedriger als längs. Veranschaulichen kann man diese Effekte durch den Spannungsfluss im Compound. Längs der Fasern fließt die Spannung hauptsächlich in den Fasern, während quer belastet die Spannung über die Matrix abgetragen wird. Die Größenordnung der Unterschiede beträgt durchaus den Faktor zwei bis drei. Es ist also falsch anzunehmen, dass man mit einem universell gültigen, globalen Skalierungsfaktor arbeiten kann, der die längs gemessenen Kurven herunterkaliert, um die Orientierung zu berücksichtigen. Ein solcher Skalierungsfaktor kann nur für eine spezielle Antwort der Struktur (z. B. eine Verschiebung) in einem speziellen Lastfall gefunden werden. Wenn dieser Faktor auf dasselbe Bauteil in einem anderen Lastfall angewendet wird, führt das in der Regel zu falschen Aussagen. Der Grund dafür ist, dass im ersten Fall beispielsweise ein quer orientierter Bauteilbereich den höchsten Einfluss auf das Antwortverhalten besitzt, während im zweiten Lastfall ein längs orientierter Bereich in einer völlig anderen Bauteilzone verantwortlich ist.

Numerisches Materialmodell und Datenermittlung

Das Versagensverhalten eines speziellen Materials ist im Allgemeinen stark abhängig von mikromechanischen Daten des betrachteten Faser-Matrix-Verbunds. Ein numerisches Materialmodell, das in der Lage ist, die erwähnten Effekte zu beschreiben, wurde bei der BASF entwickelt und in eine FE-Analyse-Software integriert. Die numerische Beschreibung erfolgt hierbei durch ein Materialgesetz, das auf einem viskoplastischen Ansatz für das Polymermaterial und auf einem elastischen Modell für die Fasern beruht. Dieses wird mit einem mikromechanischen Modell zur Beschreibung des Werkstoffverbunds, d. h. des faserverstärkten Poly-

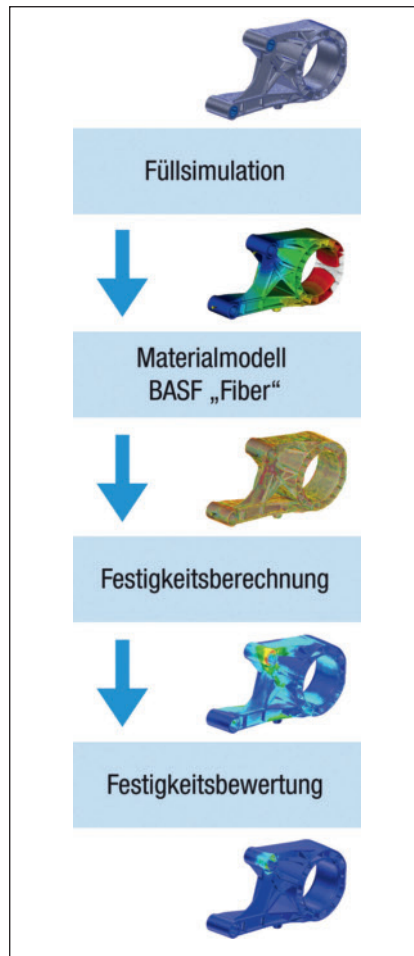


Bild 4. Integrative Festigkeitssimulation: Der Datenfluss

mermaterials, kombiniert. Das mikromechanische Modell des Werkstoffverbunds beruht auf einem Homogenisierungsverfahren nach Mori und Tanaka sowie Eshelby [1,7 bis 9]. Hier werden die Beiträge zum Materialverhalten der beiden Phasen, das heißt Polymer und Fasern, miteinander numerisch gewichtet. Als Parameter gelten hier Fasergehalt und -geometrie sowie Orientierungsverteilungsdichte der Fasern.

Durch das Materialgesetz lässt sich die Anisotropie durch die im Polymer enthaltenen Fasern, die Nicht-Linearität und die Dehnratenabhängigkeit, resultierend aus dem Polymerwerkstoff, sowie das Versagensverhalten beschreiben. Versagen tritt auf, wenn die Polymermatrix versagt, die Fasern brechen oder sich die Matrix von den Fasern löst. Zudem lässt sich das Materialgesetz auf einfache Weise mit einer Simulation für (an) den Prozess koppeln.

Die Bilder 2 und 3 zeigen die Hauptideen hinter der Methode der Integrativen Simulation. Die statistische Orientierungsverteilungsdichte (ODF: Orientation Distribution Function) beschreibt die Anzahl an Fasern, die in jeder gegebenen Richtung an jedem Materialpunkt des Kunststoffbauteils zu finden ist. In einer FE-Analyse muss die ODF an jedem Element-Integrationspunkt evaluiert werden. Aufbauend auf der ODF erfolgt auch die Homogenisierung von Faser-

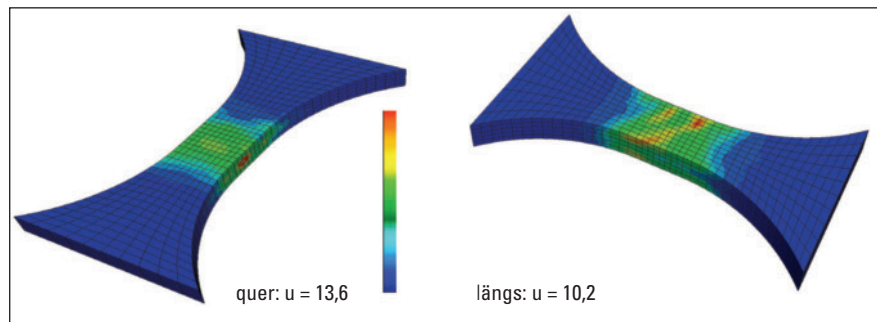


Bild 5. Der Beanspruchungsgrad eines Zugstabs (Angaben der Dehnung in mm; Farbe gibt den Beanspruchungsgrad an, z. B. rot: Ort hoher Beanspruchung)

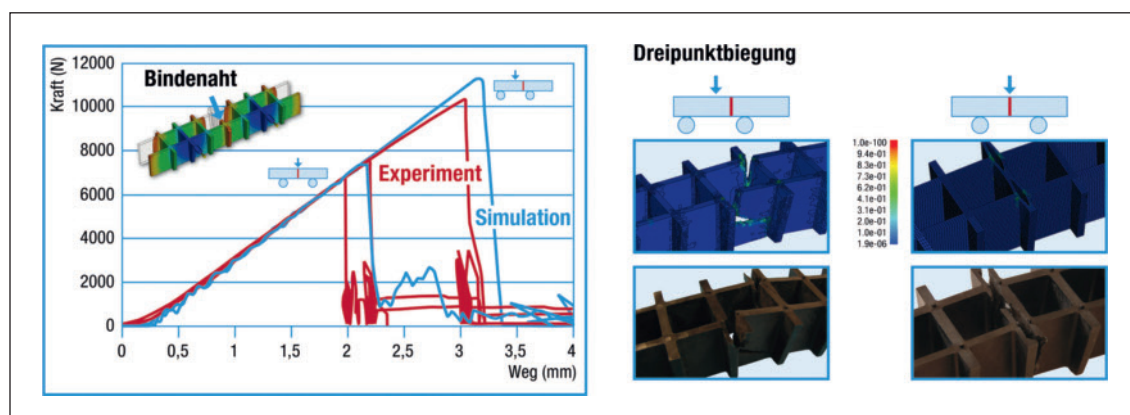


Bild 6. Ergebnisse der Dreipunktbiegung an einem verrippten Struktureinleger (rechts: die beiden Versuchsanordnungen, links: Auftragung von Kraft in N gegen Weg in mm für beide Versuche, jeweils Simulation und Experiment)

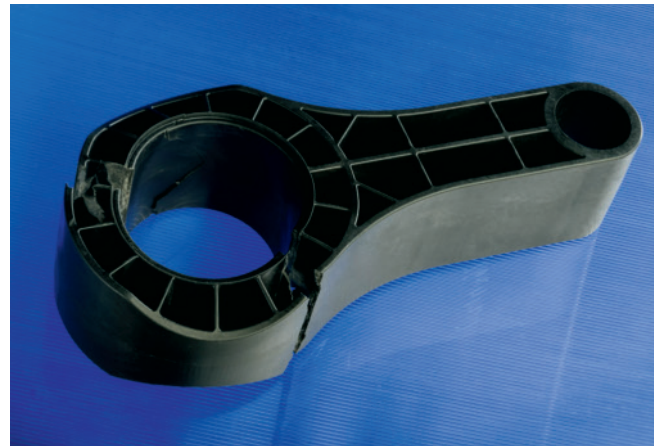
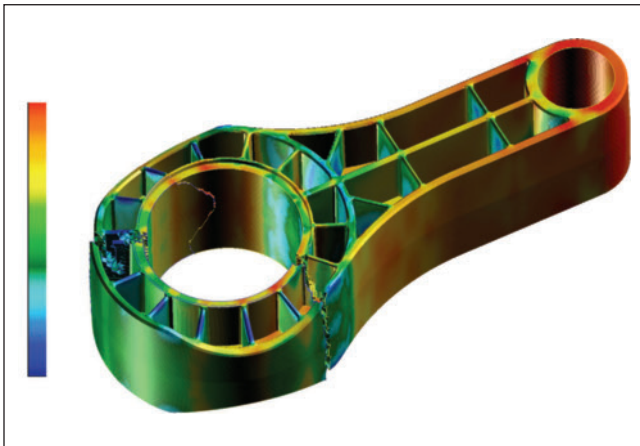


Bild 7. Der Prototyp einer Fahrwerkstütze aus dem Hochleistungspolyamid Ultramid CR bricht an der vorhergesagten Stelle

und Matrixmaterial zu einem homogenen Modell für den Materialverbund. Bild 4 zeigt den Ablauf der Integrativen Simulation an dem inzwischen serienreifen Beispiel einer Drehmomentstütze.

Es ist klar, dass jedes Materialmodell nur so gut sein kann wie die zugrunde liegenden Messdaten. Um die anisotrope und dehnratenabhängige Natur des Polymers zu erfassen, wurde ein optisches Hochgeschwindigkeitsmesssystem inklusive Steuer- und Auswertungssoftware bei der BASF entwickelt [6]. Für eine Reihe der Hochleistungspolyamide aus dem Ultramid CR-Sortiment der BASF liegen diese Materialdaten bereits vor. Diese Kunststoffe sind exakt auf die hohen Bauteilanforderungen abgestimmt und unterliegen einer besonders engen Materialspezifikation sowie intensiven Qualitätskontrollen.

Fallbeispiele für Anwendungen

Zugstab: Das einfachste Bauteil zur Überprüfung der Methodik ist der Zugstab, der aus Kunststoffplatten (150 mm × 150 mm) herausgeschnitten wird. Basierend auf der berechneten Faserorientierung wird der Zugversuch an je einer längs und quer zur Spritzrichtung entnommenen Probe simuliert (Bild 5). Die Farben auf den Probekörpern stellen den Beanspruchungsgrad dar. Dieser ist ein Maß für die Schädigung des Werkstoffs und dient als Indikator für das Materialversagen. Der Kraft-Weg-Verlauf ergibt sich analog zu Bild 1. Wie gefordert, gibt die Simulation das Experiment gut wieder.

Rippenstruktur: Ein komplexeres verripptes Bauteil wird im Dreipunktbiegeversuch auf Festigkeit getestet. In Bild 6 links oben ist die Füllung über zwei seitliche Angusspunkte sowie die berechnete Faserorientierung erkennbar. Diese Angussposition führt zu einer Bindenaht

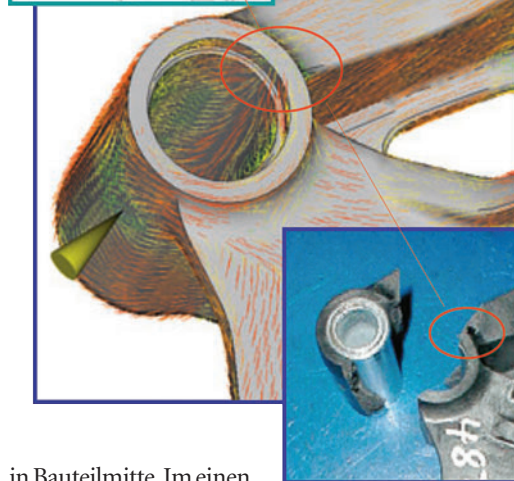
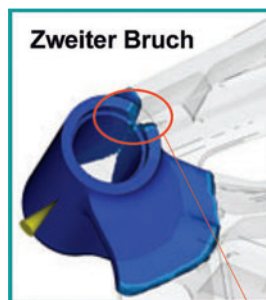


Bild 8. Vergleich zwischen Berechnung und Experiment: Das Versagen der Drehmomentstütze kann sehr genau vorhergesagt werden; gezeigt sind die Erst- und die Zweitbruchstelle

in Bauteilmitte. Im einen Lastfall wird das Bauteil über die Mitte gebogen. Es versagt in der Bindenaht, die längs in der Mittelrippe verläuft. Bild 6 ganz rechts zeigt das Bauteil und die Simulation. Bei einem homogenen Material würde man erwarten, dass das Bauteil aufgrund der Kerbwirkung in den Ecken zu den Rippen aufreißt. Aufgrund der Faserorientierung befindet sich die schwächste Stelle jedoch direkt in der Mittelrippe, wo das Bauteil dann auch versagt. In einem zweiten Lastfall wurde das Bauteil außermittig um ein Rippenfeld versetzt gebogen. Das beobachtete und berechnete Versagensbild ist in Bild 6 Mitte dargestellt. Man sieht sehr gut, wie die Simulation in der Lage ist, inhomogene Materialeigenschaften abzubilden und das Versagensverhalten vorherzusagen. Der linke Teil von Bild 6 zeigt im Vergleich das

Kraft-Weg-Diagramm für die zwei Varianten, jeweils gemessen und gerechnet [10, 11]. Um den Einfluss der Faserorientierung weiter zu untersuchen und um eine optimale Faserorientierung für den Biegebelastfall zu erhalten, wurde das Werkzeug umgebaut und das Bauteil längs angespritzt. Die Tragfähigkeit des Bauteils steigt dann um etwa 30 % auf etwa 14 000 N.

Fahrwerkstütze: Die Festigkeitsauslegung einer Stütze in Bild 7, ein Prototyp aus Ultramid CR, zeigt die kritischen Stellen des Bauteils. Wie in der Simulation vorhergesagt, bricht das Bauteil im mittleren Bereich. Weitere kritische Stellen sind in den Endbereichen, am Auge auf der Innenseite sowie gegenüber an der Bindenaht.

Drehmomentstütze von Conti-Tech Vibration Control für Opel

Ein weiteres Beispiel für die Festigkeitsauslegung mit der Integrativen Simulation der BASF ist das seit 2006 in Serie befindliche Motorlager des Opel Vectra. Hier ist es gelungen, ein Aluminiumteil im Motorraum durch ein Kunststoffteil zu ersetzen und so speziell im Vorderachsbereich deutlich Gewicht einzusparen. Das Bauteil bricht an zwei Stellen, die jeweils eine unterschiedliche Faserausrichtung vorweisen (Bild 8). Den Vergleich zwischen Experiment und Vorhersage der maximal möglichen Belastung ►

**Bild 9. Vorausgesagte
Bruchlast: 14,4 kN;
geprüfte Bruchlast:
14,4 bis 15,0 kN**



stellt Bild 9 dar. Der Bruch erfolgt an der vorhergesagten Stelle unter den vorhergesagten Bedingungen [12].

Fazit

Mit der von der BASF nochmals weiterentwickelten Integrativen Simulation ist es nun möglich, die Festigkeit und das Bruchverhalten hoch belasteter Kunststoffbauteile wie Motorstützen oder Fahrwerkklager unter Einbeziehung des Herstellungsprozesses sehr genau vorherzusagen. Durch die Projektion der herstellprozessabhängigen lokalen Materialeigenschaften (Faserorientierung) auf das mechanische FE-Modell des Bauteils wird die Aussagekraft der Ergebnisse auf ein bisher nicht erreichtes Niveau angehoben. So lassen sich jetzt Anwendungen in Kunststoff realisieren, die bislang ausschließlich metallischen

Werkstoffen vorbehalten waren. Die Integrative Simulation dient der exakten Erfassung von lokalem Materialverhalten. Zusammen mit numerischen Optimierungsverfahren, die eine optimale Gestaltung des Bauteils erlauben, wird es möglich, sehr schnell und zielsicher Bauteile auf spezifische Belastungen auszulegen. Viele Validierungen – Vergleiche mit Tests an realen Bauteilen – bestätigten die Simulationsergebnisse in vollem Umfang. Das von ContiTech und BASF für Opel entwickelte und von ContiTech produzierte Triebwerkklager, das vor Kurzem in Serie gegangen ist, stellt eine besonders eindrucksvolle Bestätigung des Simulationsinstruments dar. ■

LITERATUR

Interessenten können die umfangreiche Literaturliste anfordern unter der E-Mail-Adresse: sabine.philipp@basf.com

DIE AUTOREN

DR. STEFAN GLASER, geb. 1961, ist Leiter der Einheit für die Entwicklung von CAE-Methoden und deren Anwendung bei den Technischen Kunststoffen der BASF SE, Ludwigshafen.

DIPL.-ING. ANDREAS WÜST, geb. 1965, ist in der Entwicklung von CAE-Methoden und deren Anwendung bei den Technischen Kunststoffen der BASF beschäftigt.

DIPL.-ING. BERNHARD AUMER, geb. 1957, ist in der Anwendungsentwicklung für die Technischen Kunststoffe der BASF auf dem Spezialgebiet Automobilantriebsstrang tätig.

Kontakt: sabine.philipp@basf.com

SUMMARY KUNSTSTOFFE INTERNATIONAL

Metal as the Virtual Benchmark

INTEGRATIVE SIMULATION. *With Integrative Simulation (Part 3), which has now been further refined once again, it is possible to predict the strength and fracture behavior of highly-stressed plastic parts, such as engine supports or chassis bearings in a highly accurate manner. This makes it possible to implement applications in plastics that were formerly confined exclusively to metals.*

NOTE: You can read the complete article in our magazine **Kunststoffe international** and on our website by entering the document number **PE104283** at www.kunststoffe-international.com